

## CONTENIDO

2	INFRAESTRUCTURA PROYECTADA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS .....	1
2.1	DISPOSICIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN –POZOS INYECTORES .....	1
2.1.1	Localización del proyecto y área de influencia .....	1
2.1.1.1	Identificación de fuentes hídricas.....	4
2.1.1.2	Inventario de fuentes de aguas subterráneas en el área de influencia de los pozos de reinyección.....	4
2.1.2	Modelo hidrogeológico conceptual para los pozos de Reinyección unidad K1 yK2, areniscas de la formación Guadalupe. ....	9
2.1.2.1	Modelo matemático.....	9
2.1.2.1.1	Modelación en estado estacionario .....	10
2.1.2.1.2	Modelación en estado transitorio .....	10
2.1.2.1.3	Parámetros del modelo.....	11
2.1.2.2	Unidades estratigráficas .....	26
2.1.3	Análisis calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas aledañas a pozos Inyectores..	32
2.1.3.1	Consideraciones técnicas a nivel estructural de la reinyección .....	32
2.1.3.1.1	Correlación de la formación receptora con pozos aledaños .....	32
2.1.4	Características petrofísicas de las unidades geológicas .....	33
2.1.4.1	Afectación de la formación receptora por el proceso de reinyección .....	33
2.1.4.1.1	Pruebas de inyectividad.....	33
2.1.4.1.2	Historia pozo de Reinyección-1 .....	33
2.1.4.1.3	Diseño de la prueba de inyectividad pozo de reinyección-1 - Octubre 09/2011: .....	34
2.1.4.1.4	Conclusiones y recomendaciones prueba de reinyección - Octubre 09/2011. ....	35
2.1.5	Caracterización de fluidos.....	36
2.1.5.1	Caracterización de los fluidos de producción .....	36
2.1.5.2	Agua de formación.....	37
2.1.6	Sistema tratamiento previo al vertimiento.....	41
2.1.7	Estado mecánico de los pozos inyectores.....	41
2.1.8	Sistema de inyección .....	43
2.1.8.1	Clúster y línea de reinyección.....	43
2.1.9	Programa de pruebas de integridad del sistema de reinyección.....	44
2.1.9.1	Criterios para las pruebas de integridad .....	44
2.1.9.2	Pruebas de integridad mecánica y periódica.....	44
2.1.9.3	Aislamiento de los horizontes de reinyección.....	46
2.1.9.4	Medidas de contingencia en caso de falla del sistema de reinyección .....	46
2.1.10	Abandono de los pozos de reinyección .....	46
2.2	DISPOSICIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN–ÁREA DE SOSTENIBILIDAD EN AGROENERGÍA - ASA.....	48
2.2.1	Antecedentes .....	49
2.2.2	Alcances.....	54
2.2.3	Descripción del proyecto.....	54
2.2.3.1	Localización .....	54
2.2.3.2	Líneas de flujo.....	58
2.2.3.3	Características del proyecto .....	59
2.2.3.4	Resultados y conclusiones de Corpoica en el proyecto piloto del ASA .....	114

2.3	CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LA SEGUNDA LÍNEA DE VERTIMIENTO SOBRE EL RÍO GUAYURIBA .....	120
2.3.1	Generalidades.....	120
2.3.2	Antecedentes .....	121
2.3.2.1	Permisos de vertimiento existentes. ....	121
2.3.2.2	Producción de agua asociada al tratamiento de crudo en el campo Castilla.....	121
2.3.3	Descripción del proyecto.....	122
2.3.3.1	Localización .....	122
2.3.3.2	Características del proyecto .....	123
2.3.3.3	Modelación para el río Guayuriba.....	123
2.3.3.4	Constante de DBO - Kd .....	131
2.3.3.5	Alternativas de trazado .....	176
2.3.3.6	Métodos constructivos instalaciones de apoyo y prueba hidrostática.....	176
2.3.3.7	Procesos constructivos en cruces especiales .....	182
2.3.3.8	Prueba hidrostática .....	183
2.3.3.9	Infraestructura existente .....	184
2.3.4	Uso, aprovechamiento y afectación de recursos naturales.....	185
2.3.5	Generación, manejo y disposición de residuos .....	186
2.3.6	Estimativos de maquinaria equipos y mano de obra .....	187
2.3.7	Infraestructura social o económica a intervenir .....	188
2.3.8	Etapas y cronograma estimado de ejecución.....	189
2.3.9	Desmantelamiento y restauración de las áreas intervenidas .....	189
2.4	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS – CONSTRUCCIÓN Y ADECUACIÓN DE ZODMES .....	190
2.4.1	Localización .....	190
2.4.1	Diseño tipo del ZODME .....	193
2.4.2	Actividades de cierre y clausura para Zodmes.....	193
2.4.3	Balance de masas .....	194
2.4.4	Consideraciones adicionales .....	194
2.5	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS –CENTROS PARA EL ACOPIO Y MANEJO DE LODOS Y CORTES DE PERFORACIÓN. .....	195
2.5.1	Aspectos generales y localización.....	195
2.5.1.1	Localización centro de acopio campo Castilla.....	195
2.5.1.2	Localización centro de acopio campo Chichimene .....	196
2.5.2	Vías e infraestructura existente .....	197
2.5.3	Características del proyecto .....	198
2.5.3.1	Objetivos .....	198
2.5.3.2	Características técnicas .....	198
2.5.3.3	Diseños tipo de infraestructura a construir y adecuar .....	199
2.5.4	Actividades a desarrollar.....	199
2.5.4.1	Descripción del proceso de tratamiento .....	199
2.5.4.2	Transporte de residuos líquidos y sólidos de perforación .....	200
2.5.4.3	Especificaciones técnicas de la localización. ....	201
2.5.4.4	Métodos constructivos .....	201
2.5.5	Instalaciones de apoyo .....	202
2.5.5.1	Casetas de almacenamiento de químicos, otros insumos y residuos sólidos .....	202
2.5.5.2	Laboratorio de química .....	203
2.5.5.3	Equipo de control de incendios o de contingencias .....	203

2.5.5.4	Casetas de celaduría .....	203
2.5.6	Estimativo de la demanda de recursos naturales para obras civiles y operación .....	203
2.5.6.1	Recurso agua.....	203
2.5.6.2	Materiales de construcción .....	204
2.5.6.3	Vertimientos .....	204
2.5.6.4	Recurso forestal .....	204
2.5.6.5	Demandas de energía .....	205
2.5.6.6	Tipos de residuos generados en la etapa de obras civiles.....	205
2.5.6.7	Manejo, sistemas de tratamiento y disposición de residuos institucionales.....	205
2.5.7	Estimativo de maquinaria, equipos y personal .....	206
2.5.7.1	Etapas del proyecto .....	207
2.5.7.2	Cronograma de ejecución .....	208
2.5.7.3	Costos estimados para la construcción de un centro de acopio. ....	209
2.6	OPTIMIZACIÓN Y MANEJO DE RESIDUOS ACEITOSOS .....	209
2.6.1	Descripción del proyecto.....	209

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1	Fuentes de agua superficial presentes en el AID de los clúster 1, 3 y 4 .....	4
Tabla 2-2	Inventario puntos de agua subterránea en el área de influencia del Clúster 1 .....	5
Tabla 2-3	Determinación muestra de pozos a monitorear clúster 1 .....	6
Tabla 2-4	Inventario puntos de agua subterránea en el área de influencia del Clúster 3 .....	6
Tabla 2-5	Determinación muestra de pozos a monitorear en el clúster 3 .....	7
Tabla 2-6	Identificación de pozos de agua subterránea en el área de influencia del clúster 4 Reinyección de agua 4.....	8
Tabla 2-7	Determinación muestra de pozos a monitorear en el clúster 4 Reinyección de agua. 9	
Tabla 2-8	Puntos de agua identificados en la zona de influencia de los pozos de Reinyección. 9	
Tabla 2-9	Distribución pozos de reinyección.....	10
Tabla 2-10	Coordinadas área del modelo .....	11
Tabla 2-11	Capas definidas para el modelo de pozos de reinyección formación K1 y K2 .....	13
Tabla 2-12	Conductancia del lecho del río .....	16
Tabla 2-13	Parámetros hidráulicos empleados en el modelo .....	17
Tabla 2-14	Parámetros del solucionador WHS .....	20
Tabla 2-15	Resultados de los escenarios de simulación .....	25
Tabla 2-16	Registro de presión durante la prueba de reinyección .....	35
Tabla 2-17	Inventario de muestras.....	36
Tabla 2-18	Análisis fisicoquímico agua de formación pozos productores (1) – Feb/Mar 2011 ...	38
Tabla 2-19	Análisis fisicoquímico agua de formación pozos productores (2) – Feb/Mar 2011 ...	38
Tabla 2-20	Análisis fisicoquímico agua de formación pozos productores (3) – Feb/Mar 2011 ...	38
Tabla 2-21	Análisis fisicoquímico agua de formación T2 pozos productores (1) – Ago. 2011 ...	39
Tabla 2-22	Análisis fisicoquímico agua de formación T2 pozos productores (2) – Ago. 2011 ...	39
Tabla 2-23	Análisis fisicoquímicos agua de formación T2 pozos productores (3) – Ago. 2011 ..	39
Tabla 2-24	Caracterización del crudo Campos Castilla y Castilla Norte 2011 .....	40
Tabla 2-25	Caracterización de crudo de Chichimene y Chichimene SW en 2011 .....	40
Tabla 2-26	Cortes de destilación simulada de crudos Campos Castilla y Chichimene 2011 .....	41
Tabla 2-27	Coordinadas del ASA.....	55
Tabla 2-28	Líneas de Flujo ASA.....	58
Tabla 2-29	Actividades a realizar .....	59

Tabla 2-30	Requerimiento de clima y suelos del cultivo de Yopo.....	62
Tabla 2-31	Requerimientos del cultivo de Gmelina arbórea. ....	63
Tabla 2-32	Requerimientos del cultivo de Eucalipto pellita.....	64
Tabla 2-33	Requerimientos para el cultivo de Acacia mangium Willd .....	65
Tabla 2-34	Requerimientos para el cultivo de palma de aceite .....	66
Tabla 2-35	Requerimientos para el cultivo de palma de Pasturas.....	67
Tabla 2-36	Distribución de áreas por coberturas .....	68
Tabla 2-37	Suelos monitoreados en el ASA (27 al 29 de diciembre/11) .....	69
Tabla 2-38	Resultados de Análisis de Suelos en el ASA.....	72
Tabla 2-39	Leyendaunidades del suelo según sistema Alfred Zinck .....	77
Tabla 2-40	Resultados del cálculo de la precipitación efectiva según la metodología propuesta por la FAO .....	88
Tabla 2-41	Lamina rápidamente aprovechable.....	90
Tabla 2-42	Balance a escala decadal. ....	91
Tabla 2-43	Resumen del cálculo de requerimiento critico de riego .....	93
Tabla 2-44	Análisis de frecuencia con base en intervalos de lámina de lluvia diaria. Datos obtenidos con base en los registros diarios multianuales del C.I La Libertad – Villavicencio.....	94
Tabla 2-45	Valores CN para el cálculo de escorrentía .....	94
Tabla 2-46	Descripción de grupos hidrológicos para el cálculo de escorrentía.....	95
Tabla 2-47	Tiempo de aireación en horas, requerido para diferentes texturas de suelo .....	96
Tabla 2-48	Volúmenes de aguas por distrito de riego .....	98
Tabla 2-49	Área neta de cada distrito .....	99
Tabla 2-50	Indicadores generales de vías y canales de riego y drenaje. Valores calculados con base en el área neta.....	100
Tabla 2-51	Indicadores generales de obras de arte.....	100
Tabla 2-52	Indicadores de infraestructura distrito 1 .....	101
Tabla 2-53	Indicadores de obras de arte para el distrito 1 .....	101
Tabla 2-54	Indicadores de infraestructura distrito 2.....	101
Tabla 2-55	Indicadores de obras de arte para el distrito .....	102
Tabla 2-56	Indicadores de infraestructura distrito 3.....	102
Tabla 2-57	Indicadores de obras de arte para el distrito 3.....	102
Tabla 2-58	Indicadores de infraestructura distrito 4.....	102
Tabla 2-59	Indicadores de obras de arte para el distrito 4.....	103
Tabla 2-60	Indicadores de infraestructura distrito 5.....	103
Tabla 2-61	Indicadores de obras de arte para el distrito 5.....	103
Tabla 2-62	Indicadores de infraestructura distrito 6.....	104
Tabla 2-63	Indicadores de obras de arte para el distrito 6.....	104
Tabla 2-64	Eficiencia de riego por distrito de riego .....	105
Tabla 2-65	Modulo de riego del sistema .....	105
Tabla 2-66	Volúmenes de agua a drenar por distrito bajo condición más crítica .....	106
Tabla 2-67	Volúmenes de aguas por distrito de riego .....	106
Tabla 2-68	Rugosidades (n) por superficie .....	106
Tabla 2-69	Coordenadas piezómetros propuestos .....	113
Tabla 2-70	Resultados esperados, obtenidos e indicadores verificables .....	117
Tabla 2-71	Productos y/o procesos generados e impactos .....	117
Tabla 2-72	Coordenadas flauta de la línea proyectada .....	122
Tabla 2-73	Datos de entrada del Modelo QUAL2K.....	124

Tabla 2-74	Principales determinantes que modela QUAL2K.....	128
Tabla 2-75	Ubicación del Río Guayuriba dentro del sistema regional de cuencas .....	132
Tabla 2-76	Precipitación pluviométrica – Estación Acacías.....	133
Tabla 2-77	Información general Estación Hidrológica.....	134
Tabla 2-78	Caudales Medios Días Consecutivos 1 y 15 - Río Guayuriba - Estación Puente Carretera .....	136
Tabla 2-79	Ánálisis de frecuencia – estadígrafos y caudales máximos Río Guayuriba – estación Puente Carretera – Periodo 1969 a 1994 .....	136
Tabla 2-80	Ánálisis de frecuencia – estadígrafos y caudales mínimos Río Guayuriba – estación Puente Carretera – Periodo 1969 a 1994 .....	137
Tabla 2-81	Caudales registrados - Diciembre de 2011 - Río Guayuriba - Estación Puente Carretera .....	137
Tabla 2-82	Aforo del brazo derecho del Río Guayuriba – frente al vertimiento .....	139
Tabla 2-83	Aforo del brazuelo del Vertimiento – Diciembre 10 de 2011.....	139
Tabla 2-84	Aforo del brazuelo derecho frente a Casa de Bombas – Antes del Vertimiento ....	140
Tabla 2-85	Resumen de los resultados de aforo sobre el río Guayuriba.....	143
Tabla 2-86	Características hidráulicas básicas del cuerpo de agua medidas por aforo.....	143
Tabla 2-87	Parámetros morfológicos de la corriente en el punto de vertimiento.....	144
Tabla 2-88	Cálculo de la longitud de mezcla .....	148
Tabla 2-89	Caudal – R. Guayuriba – sector de vertimiento .....	149
Tabla 2-90	Calidad del agua – R. Guayuriba – pH, Temperatura y OD .....	149
Tabla 2-91	Calidad del agua – R. Guayuriba – Conductividad, DBO <sub>5</sub> y G&A .....	150
Tabla 2-92	Calidad del agua – R. Guayuriba – HC, SST y CL .....	150
Tabla 2-93	Calidad del agua – R. Guayuriba – Cd, Cr y Pb .....	150
Tabla 2-94	Calidad del agua – R. Guayuriba – Ni, Zn y Ba .....	150
Tabla 2-95	Calidad del agua – R. Guayuriba – Ar, Hg y Coliformes totales .....	151
Tabla 2-96	Valores de fenoles medidos en el río Guayuriba .....	153
Tabla 2-97	Calidad histórica del vertimiento .....	154
Tabla 2-98	Calidad de los metales pesados en el vertimiento.....	154
Tabla 2-99	Parámetros para la interpretación de la nubosidad OMM .....	155
Tabla 2-100	Valores medios mensuales de nubosidad en Octas.....	156
Tabla 2-101	Resultados hidráulica .....	157
Tabla 2-102	Resultados Temperatura.....	158
Tabla 2-103	Resultados Fisicoquímicos .....	159
Tabla 2-104	Resultados Hidráulica .....	170
Tabla 2-105	Resultados temperatura .....	171
Tabla 2-106	Resultados fisicoquímicos.....	172
Tabla 2-107	Dimensiones máximas del remolque para el transporte de tuberías.....	177
Tabla 2-108	Sitios para acopio de equipos y tubería .....	178
Tabla 2-109	Señalización vial a utilizar durante los trabajos de construcción de líneas de flujo ..	179
Tabla 2-110	Procedimiento para la realización de prueba hidrostática .....	183
Tabla 2-111	Volumen de agua requerida para prueba hidrostática .....	185
Tabla 2-112	Disposición de residuos sólidos durante la construcción de líneas de flujo .....	186
Tabla 2-113	Maquinaria y equipo por frente de obra en construcción de líneas de flujo .....	187
Tabla 2-114	Personal requerido por cada frente de obra en la construcción de líneas de flujo..	188
Tabla 2-115	Etapas y actividades para la construcción de la nueva línea de vertimiento.....	189
Tabla 2-116	Cronograma de ejecución estimado .....	189
Tabla 2-117	Zonas seleccionadas para ZODME's.....	191

Tabla 2-118	Relación de consistencia de los suelos cohesivos y resistencia a la compresión. .	193
Tabla 2-119	Volúmenes estimados de materiales inertes sobrantes .....	194
Tabla 2-120	Coordenadas del predio seleccionado.....	195
Tabla 2-121	Coordenadas del predio seleccionado.....	196
Tabla 2-122	Equipos a operar en el centro de acopio .....	198
Tabla 2-123	Dimensiones de piscinas .....	199
Tabla 2-124	Capacidad de almacenamiento sin remoción de cortes estabilizados .....	200
Tabla 2-125	Proceso constructivo del proyecto. ....	201
Tabla 2-126	Materiales a ser almacenados en la bodega de químicos .....	202
Tabla 2-127	Volúmenes estimados para la construcción y adecuación de un centro de acopio	204
Tabla 2-128	Fuentes y actividades generadoras de residuos en el proceso de obras civiles....	205
Tabla 2-129	Código de colores –clasificación de residuos .....	205
Tabla 2-130	Manejo, sistemas de tratamiento y disposición de residuos institucionales .....	206
Tabla 2-131	Estimativos de personal .....	207
Tabla 2-132	Estimativos de maquinaria y equipo para las obras civiles .....	207
Tabla 2-133	Etapas de ejecución del proyecto .....	207
Tabla 2-134	Cronograma estimado.....	208
Tabla 2-135	Costo estimado del proyecto.....	209
Tabla 2-136	Coordenadas estación Castilla 3 .....	209
Tabla 2-137	Coordenadas estación Castilla 2 .....	210
Tabla 2-138	Coordenadas estación Acacias.....	210
Tabla 2-139	Resultados preliminares prueba piloto tratamiento de lodos aceitosos en GEC3...	211
Tabla 2-140	Concentración de G&A y SST removidos en STAP de 30,000 BWPD en estación Castilla I.....	213
Tabla 2-141	Concentración G&A y SST removidos en STAP de 30,000 BWPD .....	214
Tabla 2-142	Distribución acumulada concentración de residuo aceitoso húmedo (80% agua) ..	215
Tabla 2-143	Proyección estimada tratamiento de agua en estaciones SCC.....	215
Tabla 2-144	Proyección estimada de lodos aceitosos en estaciones de la SCC .....	216
Tabla 2-145	Resumen de químicos a utilizar. ....	217

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1	Localización y áreas de influencia de los clúster 1,3 y 4 de los pozos de Reinyección. ....	2
Figura 2-2	Costado sur-oriental del clúster-1 Reinyección de Agua a ampliar, con predominio de cobertura de pastos.....	3
Figura 2-4	Clúster-3 proyectado en el costado norte de la vía de acceso al cultivo de palma de Hacienda La Campiña.....	3
Figura2-5	Clúster- 4 proyectado, ubicado en el costado occidental de la vía de acceso al predio finca La Morena.....	4
Figura 2-6	Ubicación puntos aguas subterráneas clúster No. 1 .....	5
Figura 2-7	Ubicación puntos aguas subterráneas clúster 3 .....	7
Figura 2-8	Ubicación puntos aguas subterráneas clúster 4 inyección de agua.....	8
Figura 2-9	Construcción de la grilla del modelo .....	12
Figura 2-10	Correlación de las unidades K1 y K2 dentro del área del campo Castilla .....	13
Figura 2-11	Capas del modelo numérico .....	15
Figura 2-12	Conductividad hidráulica del modelo .....	18
Figura 2-13	Localización falla geológica .....	19

Figura 2-14	Resultados de calibración estado estacionario.....	21
Figura 2-15	Vista en perfil comportamiento de presiones por clúster .....	23
Figura 2-16	Nivel piezométrico unidad K2. Sección transversal Row 38 Pozo inyector No. 1. Unidad de reinyección K2 .....	24
Figura 2-17	Resultado simulación periodo de 20 años por clúster .....	25
Figura 2-18	Columna estratigráfica Campo Castilla – Chichimene.....	26
Figura 2-19	Mapa estructural del tope de la Unidad K2 .....	32
Figura 2-20	Correlación pozos aledaños.....	33
Figura 2-21	Registro de presión durante la prueba de inyección.....	34
Figura 2-22	Estado mecánico y mecanismos de aislamiento del pozo de reinyección 1 .....	42
Figura 2-23	Sistema de inyección a pozo de inyección 1 , EC2 .....	43
Figura 2-24	Antecedentes del proyecto de Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA).....	50
Figura 2-25	Localización del proyecto .....	51
Figura 2-26	Ubicación de la línea de Vertimiento y el ASA.....	52
Figura 2-27	División del área del ASA.....	52
Figura 2-28	Balance hídrico climático .....	53
Figura 2-29	Inventario biológico del ecosistema terrestre al interior del ASA.....	54
Figura 2-30	Ubicación ASA .....	55
Figura 2-31	Líneas de flujo de la estación Acacias al ASA.....	58
Figura 2-32	Diagrama de funcionamiento del sistema de riego.....	61
Figura2-33	Plantación de Yopo. CPA, Corpoica .....	61
Figura2-34	Árbol de Melina .....	62
Figura2-35	Cultivo de Eucalipto. CPA, Corpoica.....	64
Figura2-36	Cultivo de Acacia. CPA, Corpoica.....	65
Figura2-37	Plantación de palma de aceite .....	66
Figura2-38	Pasturas. Humidícola .....	67
Figura 2-39	Distribución espacial de las especies .....	69
Figura 2-40	Vista esquemática de un piedemonte y la coalescencia de abanicos terraza.....	78
Figura2-41	Fotos panorámicas y morfología del suelo de la napa de desborde .....	80
Figura 2-42	Curvas de retención de humedad de la unidad Nab.....	81
Figura2-43	Panorámicas y morfología del suelo de la cubeta de desborde .....	82
Figura 2-44	Curvas de retención de humedad de la unidad Cab.....	83
Figura2-45	Panorámica y morfología del suelo de la cubeta de decantación .....	83
Figura 2-46	Curvas de retención de humedad de la unidad Da.....	84
Figura2-47	Panorámica vallecitos aluviales .....	85
Figura 2-48	Curvas de retención de humedad de la unidad Vb.....	86
Figura2-49	Método de riego por melgas rectangulares .....	97
Figura 2-50	Trazado de sectores de riego, canales principales de riego y ubicación de la infraestructura petrolera actual .....	99
Figura 2-51	Ficha de calculo (HC canales) .....	107
Figura 2-52	Ficha de calculo (HC Canales) .....	108
Figura 2-53	Sección de riego principal revestido .....	108
Figura 2-54	Estructura de captación .....	109
Figura 2-55	Partidores de caudal .....	109
Figura 2-56	Trinchos de riego.....	110
Figura 2-57	Canal de drenaje .....	110
Figura 2-58	Perfil canal de drenaje secundario.....	111
Figura 2-59	Canal de drenaje principal .....	111

Figura 2-60	Sección dique lagunas de regulación .....	111
Figura 2-61	Pronostico de producción de agua para el Campo Castilla .....	122
Figura 2-62	Localización de la línea de vertimiento actual y proyectada.....	123
Figura 2-63	Relaciones entre variables consideradas por el modelo QUAL2K .....	125
Figura 2-64	Balance de flujo en cada elemento .....	126
Figura 2-65	Canal Trapezoidal .....	126
Figura 2-66	Balance de calor en cada elemento.....	128
Figura 2-67	Balance de masa en cada elemento.....	130
Figura 2-68	Modelo Cinético de los determinantes de Qual2k .....	130
Figura2-69	Río Guayuriba – .....	133
Figura2-70	Río Guayuriba – .....	133
Figura 2-71	Histograma de la Precipitación Total Mensual – Estación Acacias .....	134
Figura 2-72	Caudales promedios históricos – Estación Carretera.....	135
Figura2-73	Estado del río Guayuriba en el brazo central – diciembre 10 de 2011 – frente al punto de Vertimiento .....	138
Figura2-74	Brazo Derecho del Vertimiento Seco - Río Guayuriba – Febrero 12 de 2012.....	141
Figura2-75	Localización de los aforos realizados sobre el Rio Guayuriba .....	142
Figura 2-76	Sección principal - Frente al Vertimiento – Río Guayuriba .....	142
Figura2-77	Río Guayuriba – Sección Principal - Vertimiento .....	142
Figura 2-78	Río Guayuriba – Sección Transversal Aguas Abajo.....	143
Figura 2-79	Curva típica de la sección – Velocidad Vs Caudal .....	144
Figura 2-80	Curva típica de la sección – Profundidad Vs Caudal.....	145
Figura 2-81	Curva típica de la sección – Ancho Vs Caudal .....	145
Figura 2-82	Comportamiento del vertimiento en la longitud de mezcla .....	146
Figura 2-83	Perfil longitudinal de un Cuerpo de Agua con Flujo Turbulento .....	147
Figura 2-84	Esquema en planta de un vertimiento lateral continuo .....	147
Figura 2-85	Relación entre conductividad aguas arriba y caudal promedio multianual – R. Guayuriba.....	152
Figura 2-86	Radiación solar en el área de estudio. Kw/m <sup>2</sup> -d .....	155
Figura 2-87	Caudal - R. Guayuriba.....	162
Figura 2-88	Temperatura – R. Guayuriba. ....	163
Figura 2-89	Oxígeno Disuelto – R. Guayuriba .....	163
Figura 2-90	DBOfast – R. Guayuriba .....	164
Figura 2-91	DQO Río Guayuriba .....	165
Figura 2-92	Fenoles – R. Guayuriba .....	165
Figura 2-93	G&A – R. Guayuriba.....	166
Figura 2-94	Conductividad – R. Guayuriba. ....	167
Figura 2-95	SST – R. Guayuriba .....	167
Figura 2-96	Bario-R. Guayuriba.....	168
Figura 2-97	Coliformes totales - R. Guayuriba .....	169
Figura 2-98	pH - R. Guayuriba .....	169
Figura 2-99	Esquema Cruce Subfluvial .....	182
Figura 2-100	Localización de Zodmes para el Campo Castilla.....	190
Figura 2-101	Localización de Zodmes para el Campo Chichimene.....	191
Figura 2-102	Sección típica para filtro en la base del ZODME .....	192
Figura 2-103	Diseño tipo paraconformación de un ZODMEen áreas con pendiente moderada..	193
Figura 2-104	Localización Centro de acopio de cortesdel Campo Castilla.....	196
Figura 2-105	Localización centro de acopio de cortesdel Campo Chichimene. ....	197

Figura 2-106 Distribución de equipos, tanques, piscinas y laboratorio .....	199
Figura2-107 Desarenador convencional en concreto. ....	202
Figura 2-108 Punto ecológico institucional.....	206
Figura 2-109 Punto ecológico industrial .....	206
Figura 2-110 Esquema de proceso recomendado para tratamiento de residuos aceitosos en el área de Castilla y Acacias. ....	211
Figura 2-111 Fases sólida y acuosa separadas como resultado de pruebas piloto en Estación Apiay. ....	212
Figura 2-112 Distribución de volumen de residuo aceitoso (80% humedad).....	215
Figura 2-113 Diagrama de proceso definido para planta de tratamiento de lodos en la SCC.....	218

## 2 INFRAESTRUCTURA PROYECTADA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS.

### 2.1 DISPOSICIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN –POZOS INYECTORES

Como alternativas para la disposición de los vertimientos de aguas industriales, Ecopetrol S.A. desde hace algunos años ha venido buscando estrategias que permitan un adecuado manejo de aguas tratadas de producción, con el fin de disminuir los vertimientos e impactos generados a aguas superficiales e incrementar los niveles de producción en el Campo Castilla. Por ello se ha propuesto como alternativa la reinyección de las aguas de producción previamente tratadas, a través de 15 pozos reinyectores en 3 áreas clúster (Clúster Pozos de Reinyección de agua 1, 3 y 4), con un caudal de 70 KBWPD para cada pozo, para un total de 1.050 KBWPD.

En la actualidad se inyecta aproximadamente --56 KBWPD en el Pozo de reinyección 1, el cual cuenta con el concepto de viabilidad del Ministerio de Minas y Energía, donde mediante radicado No. 2010056769 del 02 de noviembre de 2011 el Director de Hidrocarburos indica: “...esta Dirección no encuentra ningún inconveniente para que se proceda con el proyecto de reinyección en la formación K2 y que se tramite ante el Ministerio de Ambiente, Vivienda Desarrollo Territorial- MAVDT, los permisos o modificaciones correspondientes” (Ver **Anexo 2.11**). De igual manera mediante resolución 2346 de diciembre de 2010 la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena “CORMACARENA” acoge el concepto técnico PM-GA.3.44.010.2443 del 25 de Noviembre de 2010 y otorga permiso de vertimiento de Aguas Residuales Industriales al Sub-Suelo por reinyección al campo castilla II por medio del Pozo de reinyección 1 a la formación geológica K2, con un caudal de 80 KBWPD (Ver **Anexo 2.11**).

#### 2.1.1 Localización del proyecto y área de influencia

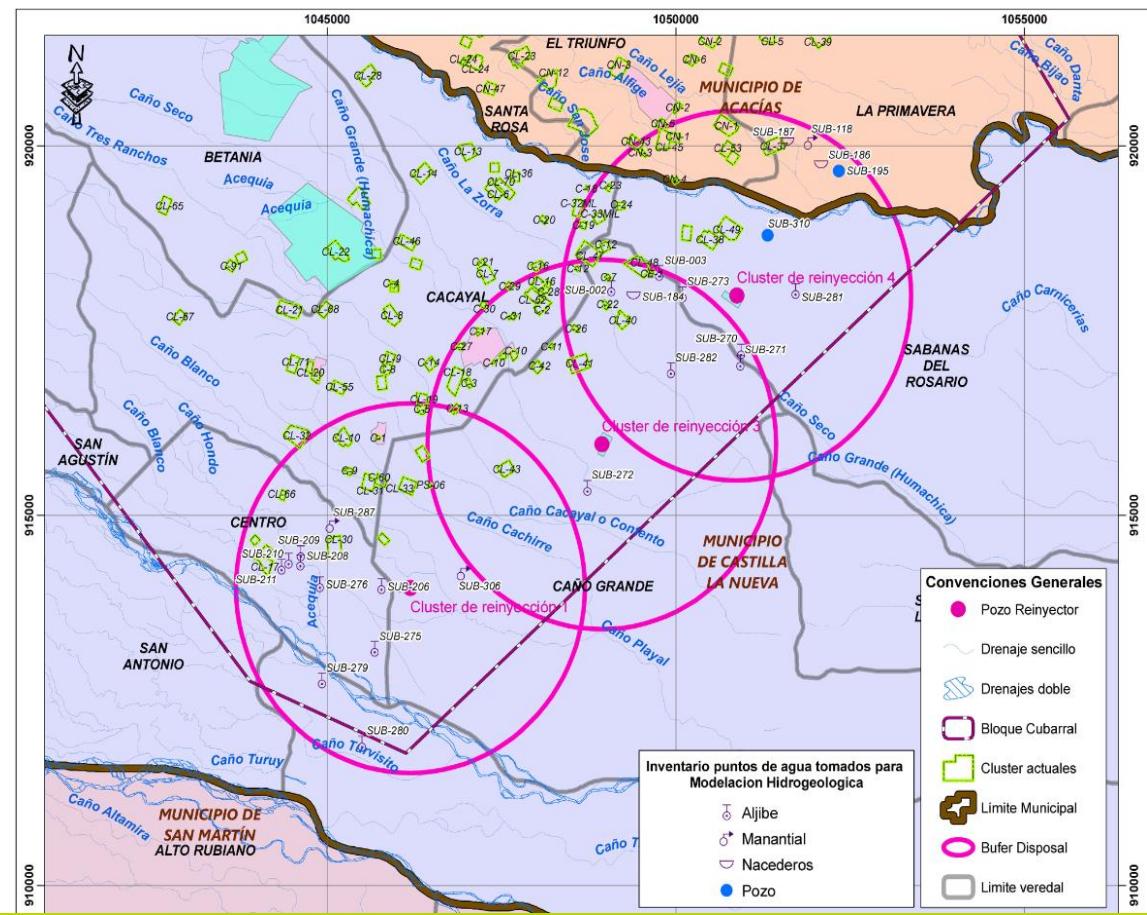
La estrategia de desarrollo Disposición de aguas de producción a través de reinyección de agua, se localiza en el costado sur-occidental del campo Castilla – Chichimene en las veredas Caño Grande (Clúster-1. Reinyección de agua) y Sabanas del Rosario (Clúster 3 Reinyección de Aguay Clúster 4 Reinyección de agua) del municipio de Castilla La Nueva.

Adicionalmente debido a la importancia del monitoreo y seguimiento a las actividades a realizarse en los tres clúster de Reinyección de agua, se han definido las siguientes áreas de influencia con base en el modelo hidrogeológico del campo y los requerimientos del HTER-1-03, Capítulo 4 Vertimientos (Ver **Figura 2-1**).

En la actualidad en el Clúster 1. Reinyección de agua, se ubica el pozo de Reinyección 1 y se proyecta la perforación de (3) tres pozos adicionales, así mismo, se perforarán seis (6) pozos de Reinyección, en el clúster 3 Reinyección de agua y cinco (5) pozos de reinyección para el clúster 4 Inyección de agua, para un total de catorce (14) pozos a perforar y un 1 pozo existente, donde se estima un vertimiento de 70 KBWPD, alcanzando así un total de 1.050 KBWPD por cada clúster.

A continuación se describe la ubicación y área de influencia de los clúster de los pozos de Reinyección:

Clúster 1 Reinyección de Agua. El clúster 1 Reinyección de Agua existente se ubica en las coordenadas 914.015,79 Norte y 1.046.190,28 Este (Vereda Caño Grande). El área de la plataforma abarca 2.62 ha y se proyecta ampliar a 4 ha, su área de influencia es de 19,63 Km<sup>2</sup> determinados a partir de un radio de 2.5 Km a la redonda. Su área de influencia corresponde a las veredas Caño Grande al oriente, Cacayal al norte, El Centro y San Antonio al occidente y El Turuy al sur (Ver **Figura 2-2** y **Figura 2-3**).



**Figura 2-1 Localización y áreas de influencia de los clúster 1,3 y 4 de los pozos de Reinyección.**



**Figura 2-2 Clúster-1 Reinyección de agua existente, donde se localiza el pozo de Reinyección-1**



**Figura 2-3 Costado sur-oriental del clúster-1 Reinyección de Agua a ampliar, con predominio de cobertura de pastos.**

- ✓ **Clúster 3 Reinyección de Agua.** El clúster 3 reinyección de Agua proyectado se ubica en las coordenadas 915.959 Norte y 1.048.935 Este (Vereda Caño Grande). El área de la plataforma comprende 4 ha, y su área de influencia es de 19,63 Km<sup>2</sup>, determinados a partir de un radio de 2,5 Km a la redonda. Su área de influencia corresponde a las veredas Caño Grande al sur, oriente y occidente, Cacayal al norte y Sabanas del Rosario al occidente (Ver **Figura 2-4**).



**Figura 2-4 Clúster-3 proyectado en el costado norte de la vía de acceso al cultivo de palma de Hacienda La Campiña**

- ✓ **Clúster 4 Reinyección de Agua** El clúster 4 Reinyección de agua, proyectado se ubica en las coordenadas 917.975 Norte y 1.050.870 Este (Vereda Sabanas del Rosario). El área de la plataforma abarca 4 ha, y su área de influencia es de 19,63 Km<sup>2</sup>, determinados a partir de un radio de 2.5 km a la redonda. Su área de influencia corresponde a las veredas Caño Grande al sur y occidente, Cacayal al occidente, La Primavera al norte y Sabanas del Rosario centro y oriente (Ver **Figura 2-5**).



**Figura 2-5 Clúster- 4 proyectado, ubicado en el costado occidental de la vía de acceso al predio finca La Morena**

#### 2.1.1.1 Identificación de fuentes hídricas

En la **Tabla 2-1** se presentan las fuentes hídricas más representativas del área de influencia de los clúster Pozos de reinyección (1, 3 y 4), los cuales se monitorearon y determinaron los parámetros fisicoquímicos, como se aprecia en el **Anexo 4.2.5. Calidad de Agua**.

**Tabla 2-1 Fuentes de agua superficial presentes en el AID de los clúster 1, 3 y 4**

CLÚSTER 1	CLÚSTER 3	CLUSTER 4
Caño Tres Ranchos Caño Cacayal Caño Chicare Caño Blanco	Caño Zorral Caño Grande Caño Cacayal Caño Chicare	Caño Zorral Caño Seco Caño Alfíge

Adicionalmente en cuanto al aprovechamiento de las aguas superficiales durante la perforación de los pozos de reinyección, básicamente es requerido en la etapa de construcción y la adecuación de las obras civiles y mecánicas de la locación y líneas de flujo de los pozos inyectores (Ver **Anexo 2.11 Prediseños Clúster y Líneas de flujo pozo de reinyección**). Como normalmente se desarrolla durante la perforación de los diferentes pozos del campo, se utilizaran los puntos autorizados para captación de agua.

#### 2.1.1.2 Inventario de fuentes de aguas subterráneas en el área de influencia de los pozos de reinyección.

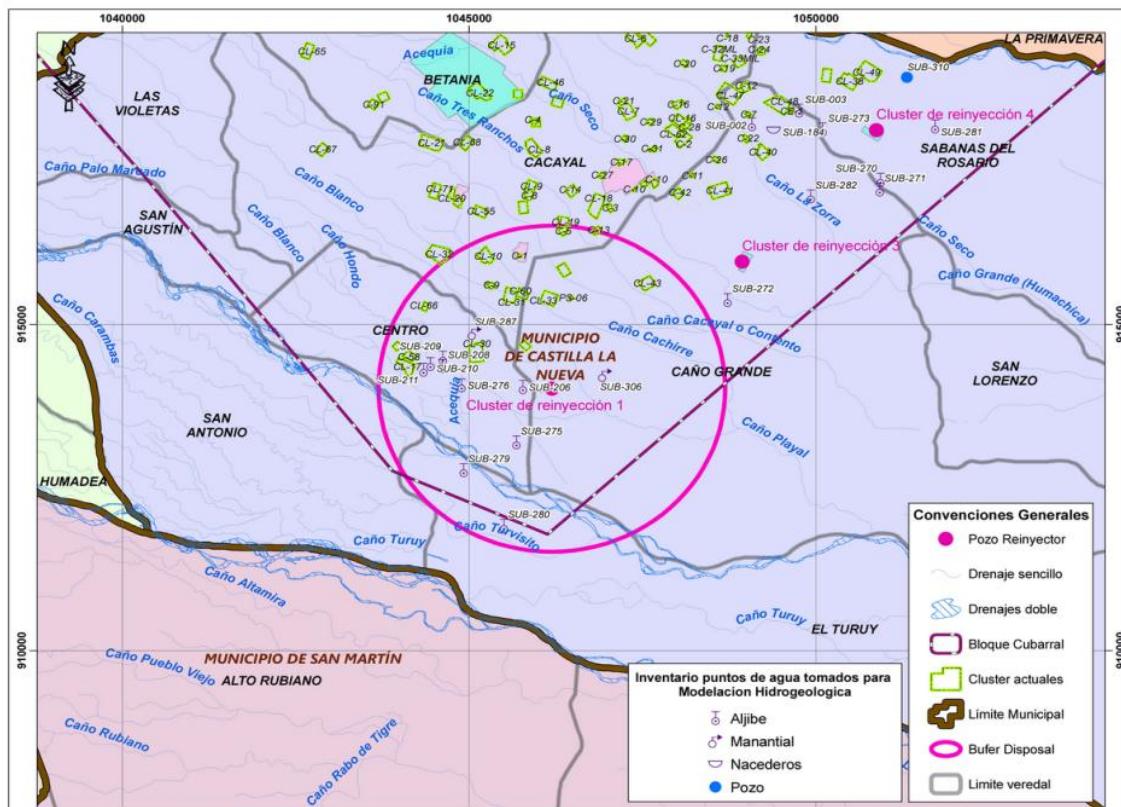
En el área de los clúster 1, 3 y 4 se realizó un inventario de todos los aljibes, pozos, manantiales y nacederos ubicados en un radio de 2.5 km a la redonda, tomado del inventario general del bloque Cubarral de 394 puntos de aguas subterráneas (Ver **Inventario Puntos de Agua subterránea – Cap. 3**), donde se realizaron monitoreos de calidad fisicoquímica de los puntos de agua subterráneos aledaños a cada uno de los clúster con pozos de reinyección, con un nivel de confianza del 95%.

Adicionalmente se desarrolla la modelación Hidrogeoquímica donde se utiliza el software Aquachem 4.0 con el cual se generan los diagramas Piper para identificar las características del agua e identificar los iones tanto mayores como menores reportados para cada una de las muestras seleccionadas (Ver **Anexo 3.1 Hidrogeología**).

A continuación se describen los puntos de agua subterránea identificados en el área de influencia del proyecto en los tres clúster así:

## ➤ Clúster 1 Reinyección de agua

En el área de influencia del Clúster 1 Reinyección de Agua se identificaron un total de once (11) puntos de aguas subterráneas, donde el 81.81% (9 puntos) corresponde a aljibes y el 18.18% (2 puntos) corresponde a manantiales, así mismo la mayor concentración de puntos se encuentra en la vereda El Centro donde se encuentra el 72.72% correspondiente a ocho (8)puntos, seguido en la vereda Turuy con dos(2) puntos que representan el 18.18% y finalmente en la vereda Caño Grande donde existe un (1) punto y que corresponde al 9.09%. (Ver **Figura 2-6** y **Tabla 2-2**).



**Figura 2-6 Ubicación puntos aguas subterráneas clúster No. 1**

**Tabla 2-2** Inventario puntos de agua subterránea en el área de influencia del Clúster 1

CÓDIGO	UBICACIÓN				TIPO	USOS
	VEREDA	PREDIO	NORTE	ESTE		
SUB-306	Caño Grande	El Clarín	914.223	1.046.955	Manantial	Ninguno
SUB-208	El Centro	El Rincón	914.361	1.044.612	Aljibe	Doméstico
SUB-275	El Centro	La Esperanza	913.190	1.045.682	Aljibe	
SUB-287	El Centro	Las Delicias	914.868	1.045.077	Manantial	Ninguno
SUB-209	El Centro	Lote No. 3	914.488	1.044.618	Aljibe	Doméstico
SUB-211	El Centro	NN	914.305	1.044.342	Aljibe	
SUB-276	El Centro	Pinares	914.067	1.044.892	Aljibe	

CÓDIGO	UBICACIÓN				TIPO	USOS
	VEREDA	PREDIO	NORTE	ESTE		
SUB-210	El Centro	San José	914.388	1.044.445	Aljibe	
SUB-280	El Turuy	San Rafael	911.913	1.045.497	Aljibe	
SUB-206	El Centro	Santa Helena	914.039	1.045.776	Aljibe	
SUB-279	El Turuy	Villa Tatiana	912.764	1.044.921	Aljibe	

A partir de la identificación de los puntos ubicados en un radio de 2,5 km a la redonda se realiza la selección de puntos a monitorear, ubicados en el área de influencia del clúster 1 Reinyección de Agua, según se muestra en la **Tabla 2-3**, con un nivel de confianza del 95% y un error estándar del 10% se obtiene que la muestra será de 10 pozos a monitorear en el área de influencia del clúster 1.

**Tabla 2-3 Determinación muestra de pozos a monitorear clúster 1**

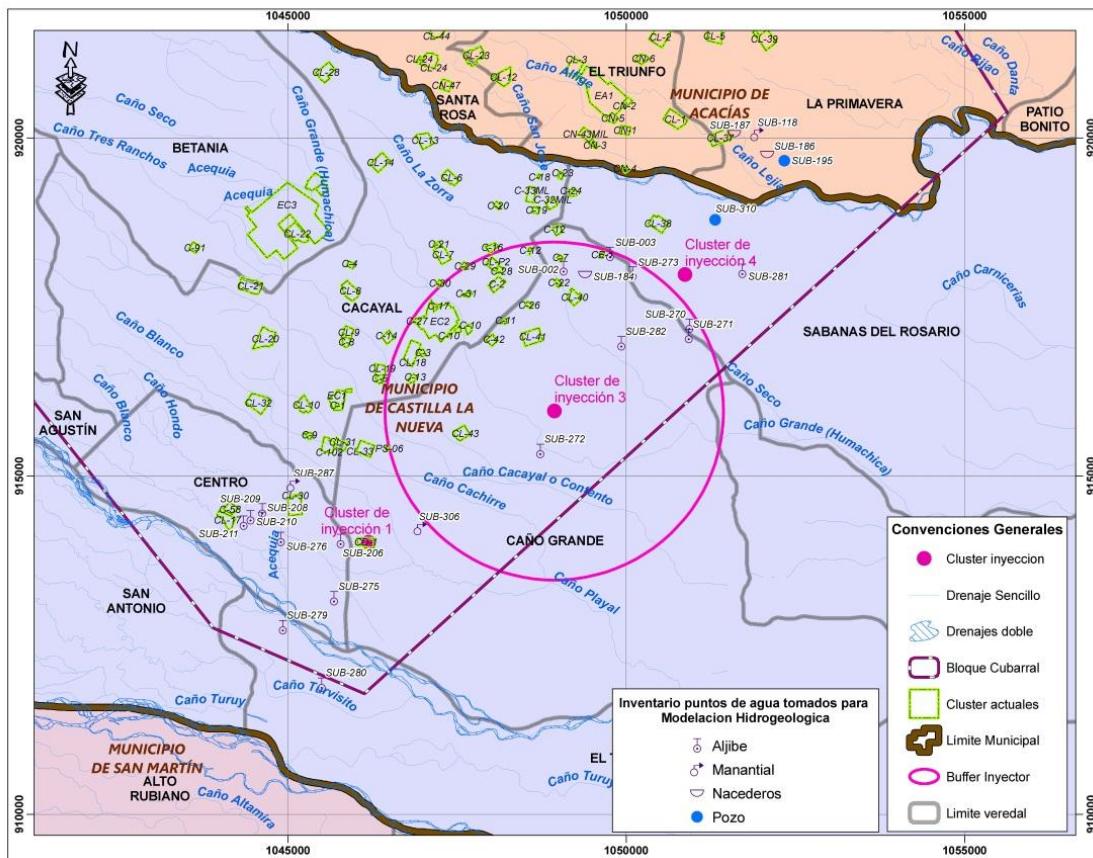
TOTAL POZOS (N)	NIVEL DE CONFIANZA	Z	ERROR ESTÁNDAR	E	MUESTRA (n)
11	95%	1,96	10%	0,10	9,8

#### ➤ Clúster 3. Reinyección de agua

En el área de influencia del clúster 3 Reinyección de Agua, se identificaron un total de siete (7) puntos de aguas subterráneas, que se resumen en la **Tabla 2-4**, donde el 86% (6 puntos) corresponde a aljibes y el 14% (1 punto) corresponde a nacederos, así mismo la mayor concentración de puntos se encuentra en la vereda Sabanas del Rosario donde se encuentra el 57% correspondiente a cuatro(4)puntos, seguido en la vereda Caño Grande con tres (3) puntos que representa el 43%. (Ver **Tabla 2-4** y **Figura 2-7**).

**Tabla 2-4 Inventario puntos de agua subterránea en el área de influencia del Clúster 3**

CÓDIGO	UBICACIÓN				TIPO	USOS
	VEREDA	PREDIO	NORTE	ESTE		
SUB-002	Caño Grande	El Encanto	918.069	1.049.075	Aljibe	Doméstico
SUB-184	Sabanas del Rosario	El Encanto	917.980	1.049.388	Nacederos	Ninguno
SUB-271	Sabanas del Rosario	El Reposo	917.066	1.050.923	Aljibe	Doméstico
SUB-270	Sabanas del Rosario	Escuela	917.217	1.050.933	Aljibe	
SUB-282	Caño Grande	La Bendición	916.960	1.049.927	Aljibe	
SUB-273	Sabanas del Rosario	La Morena	917.988	1.050.096	Aljibe	
SUB-272	Caño Grande	La Palmita	915.371	1.048.728	Aljibe	



**Figura 2-7 Ubicación puntos aguas subterráneas clúster 3**

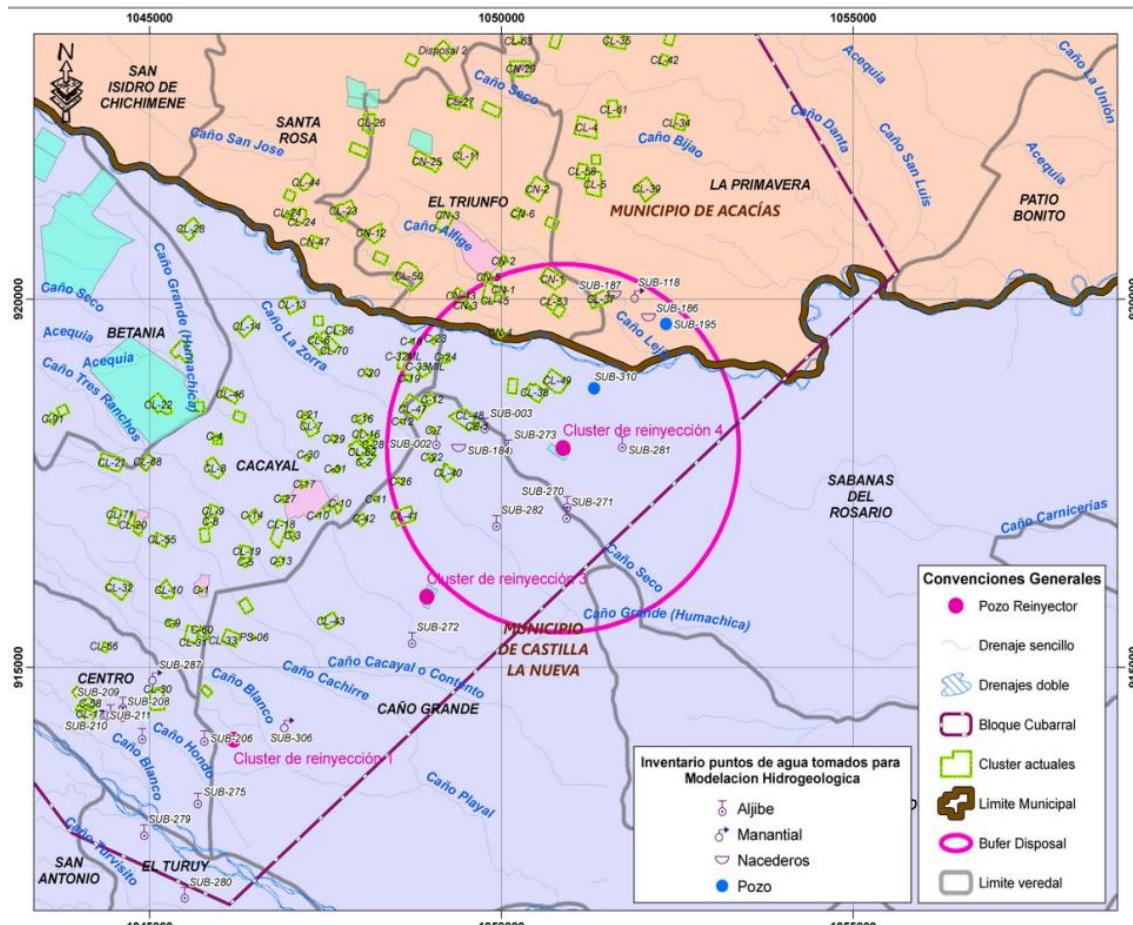
A partir de la identificación de los puntos ubicados en un radio de 2,5 km a la redonda se realiza la selección de puntos a monitorear, ubicados en el área de influencia del clúster 3 Reinyección de Agua, según se muestra en la **Tabla 2-5**, con un nivel de confianza del 95% y un error estándar del 10% se obtiene que la muestra será de 6 pozos a monitorear en el área de influencia del clúster-3.

**Tabla 2-5 Determinación muestra de pozos a monitorear en el clúster 3**

TOTAL POZOS (N)	NIVEL DE CONFIANZA	Z	ERROR ESTÁNDAR	E	MUESTRA (N)
7	95%	1,96	10%	0,1	6

#### ➤ Clúster 4. Reinyección de agua

En el área de influencia del Clúster 4 Reinyección de Agua, se identificaron un total de trece (13) puntos de aguas subterráneas, los cuales se muestran en la **Tabla 2-6**, donde el 53,84%(7 puntos) corresponde a aljibes, el 23.07% a Nacederos (3 puntos), el 15.38% a pozos (2 puntos) y el 7.69% a manantiales (1 punto), así mismo la mayor concentración de puntos se encuentra en la vereda Sabanas del Rosario con un total de siete (7) puntos que representa el 53.85%, seguido por la vereda Primavera con 4 puntos que representa el 30% y con presencia de dos(2) puntos en la Vereda Caño Grande siendo esta porción el 15.38% (Ver **Figura 2-8** y **Tabla 2-6**).


**Figura 2-8 Ubicación puntos aguas subterráneas clúster 4 inyección de agua.**
**Tabla 2-6 Identificación de pozos de agua subterránea en el área de influencia del clúster 4 Reinyección de agua 4**

CÓDIGO	UBICACIÓN					USOS
	VEREDA	PREDIO	NORTE	ESTE	TIPO	
SUB-118	La Primavera	Buenos Aires	920.053	1.051.933	Manantial	
SUB-186	La Primavera	Buenos Aires	919.752	1.052.084	Nacederos	Ninguno
SUB-187	La Primavera	Buenos Aires	920.062	1.051.596	Nacederos	
SUB-002	Caño Grande	El Encanto	918.069	1.049.075	Aljibe	
SUB-184	Sabanas del Rosario	El Encanto	917.980	1.049.388	Nacederos	
SUB-271	Sabanas del Rosario	El Reposo	917.066	1.050.923	Aljibe	
SUB-270	Sabanas del Rosario	Escuela	917.217	1.050.933	Aljibe	
SUB-282	Caño Grande	La Bendición	916.960	1.049.927	Aljibe	
SUB-310	Sabanas del Rosario	La Corraleja	918.790	1.051.314	Pozo	
SUB-273	Sabanas del Rosario	La Morena	917.988	1.050.096	Aljibe	
SUB-195	La Primavera	NN	919.662	1.052.335	Pozo	
SUB-281	Sabanas del Rosario	Piñalito	918.033	1.051.717	Aljibe	
SUB-003	Sabana del Rosal	Santa Inés	918.279	1.049.758	Aljibe	

A partir de la identificación de los puntos ubicados en un radio de 2,5 km a la redonda se realiza la selección de puntos a monitorear, ubicados en el área de influencia del clúster 4 Reinyección de Agua, según se muestra en la **Tabla 2-7**, con un nivel de confianza del 95% y un error estándar del 10%. Se obtiene que la muestra sea de 11 pozos a monitorear en el área de influencia del clúster-4.

**Tabla 2-7 Determinación muestra de pozos a monitorear en el clúster 4 Reinyección de agua**

TOTAL POZOS (N)	NIVEL DE CONFIANZA	Z	ERROR ESTÁNDAR	E	MUESTRA (N)
13	95%	1,96	10%	0,10	11

➤ **Consolidado puntos monitoreados**

De los puntos mencionados anteriormente, se puede hacer un análisis resumido del tipo y cantidad correspondientes, lo cual se muestra en la siguiente tabla (Ver **Tabla 2-8**).

**Tabla 2-8 Puntos de agua identificados en la zona de influencia de los pozos de Reinyección.**

TIPO	CANTIDAD	PORCENTAJE (%)
Aljibe	17	68
Manantial	3	12
Nacedero	3	12
Pozo	2	8
<b>TOTAL</b>	<b>25</b>	<b>100</b>

## 2.1.2 Modelo hidrogeológico conceptual para los pozos de Reinyección unidad K1 y K2, areniscas de la formación Guadalupe.

### 2.1.2.1 Modelo matemático

Para la elaboración del modelo hidrogeológico matemático, se empleó el programa comercial Visual Modflow Pro Versión 4.0, el cual utiliza la herramienta de cálculo Modflow 2000, desarrollada por el Servicio Geológico Americano (USGS). El modelo generado es de catorce (14) capas, al cual se le incorporó los cuerpos de agua principales de la zona (Río Orotay y Río Guamal), parámetros hidráulicos, otras condiciones de frontera y datos de calibración.

El modelo matemático fue elaborado con el fin de evaluar el potencial de Reinyección de la unidad K2, la cual se encuentra a una profundidad promedio de a 2100 a 2200 m subyaciendo a unidades eminentemente arcillosas como lo son: Lutitas E3 y E4 de la parte inferior de la secuencia de la formación Carbonera y la parte superior de la secuencia arcillosa de la Formación Carbonera, como lo es la Lutita E2.

Teniendo en cuenta las necesidades de Ecopetrol S.A. y las proyecciones de generación de agua asociada al Bloque Cubarral Campos Castilla y Chichimene se realizaron simulaciones en estado estacionario y transitorio.

El modelo matemático fue elaborado a partir del modelo hidrogeológico conceptual definido con base en la interpretación de las variables más relevantes como: topografía, hidrología, geología, hidrogeología y características hidráulicas de la unidad receptora.

#### 2.1.2.1.1 Modelación en estado estacionario

Las condiciones naturales de flujo del agua subterránea en el área de estudio (estado estacionario) corresponden a las características naturales de presión de la unidad objeto de Reinyección en el campo Castilla antes de iniciarse la Reinyección. Para conseguir recrear las condiciones naturales de la unidad de recibo antes iniciar proceso de Reinyección, se construyó geométricamente las unidades geológicas principalmente reconocidas por Ecopetrol S.A., en la perforación de los pozos: CA-47, CN-67, CN-58, CA-123, CA-83, CN-61, pozo de Reinyección 1 y CA-101 perforados en el campo Castilla.

- ✓ Para determinar la superficie del terreno se empleó un modelo digital de elevación para generar curvas de nivel cada 10 m. La topografía del terreno muestra una pendiente del terreno que va desde los 430 m al oeste hasta los 340 m al este.
- ✓ Se revisó la geología del área de estudio a nivel local, es decir desde el piedemonte de la cordillera oriental hasta la zona plana en donde se ubica el Clúster de Reinyección, para entender la forma y distribución de las capas que suprayacen y subyacen la unidad de propuesta de reinyección K2. Es importante resaltar que para la unidad K1 y K2 se encuentra empuje de acuífero activo que mantiene las presiones de formación a pesar de la explotación.
- ✓ Se evaluaron las características hidrogeológicas de las unidades acuíferas de interés en superficie que capta la comunidad. Así mismo en profundidad se determinaron las características de cada una de las unidades que se encuentran en profundidad dentro del área del modelo hasta el basamento, compuesta principalmente por meta sedimentos arcillosos de color gris actuando como capa sello del modelo. Para las capas de característica arcillosa del modelo a profundidad se trabajó con conductividades hidráulicas muy bajas menores  $1 \times 10^{-6}$  m/día, porosidad efectivas bajas menores a 4%, características de capas arcillosas como lo describen los registros gráficos compuestos de los pozos analizados.
- ✓ Dentro del modelo de reinyección se trabajó como límite de presión de reinyección para no llegar al gradiente de fractura de la roca una gradiente de 0.6 psi/pie.
- ✓ Dentro de los pozos inyector 1 e inyector 2 del campo Castilla se encontró una presión estática de formación 2600 psi a 7528' que es la presión de columna de agua utilizada para definir las condiciones de cabeza constante el borde occidental del área modelada.

#### 2.1.2.1.2 Modelación en estado transitorio

Teniendo como condición inicial de presión y flujo en la unidad definida como objeto de reinyección, se evaluó el nivel piezo métrico de dicha unidad a partir de la presión definida para las condiciones estacionarias que ha estimado Ecopetrol S.A. mediante las pruebas de inyectividad realizadas en los pozos de prueba. Posteriormente se adicionaron los pozos de reinyección que simularán un escenario transitorio a 600.000, 900.000 y 1.200.000 BAPD, distribuido en quince (15) pozos como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2-9 Distribución pozos de reinyección**

CLUSTER	No. POZO
1	4
3	6
4	5

Estas simulaciones sirven para evaluar las presiones que se presentarán en la unidad de K2 a través del tiempo por el flujo que será inyectado con una tasa de 40.000 a 80.000 BAPD/Pozo.

Así mismo se evaluarán los efectos que se puedan presentar en los primeros horizontes que son delos que captá la comunidad

#### 2.1.2.1.3 Parámetros del modelo

Las características del modelo se representaron a través de un modelo hidrogeológico numérico tridimensional, el cual considera el modelo hidrogeológico conceptual. A continuación se realiza una descripción de las principales características del modelo matemático:

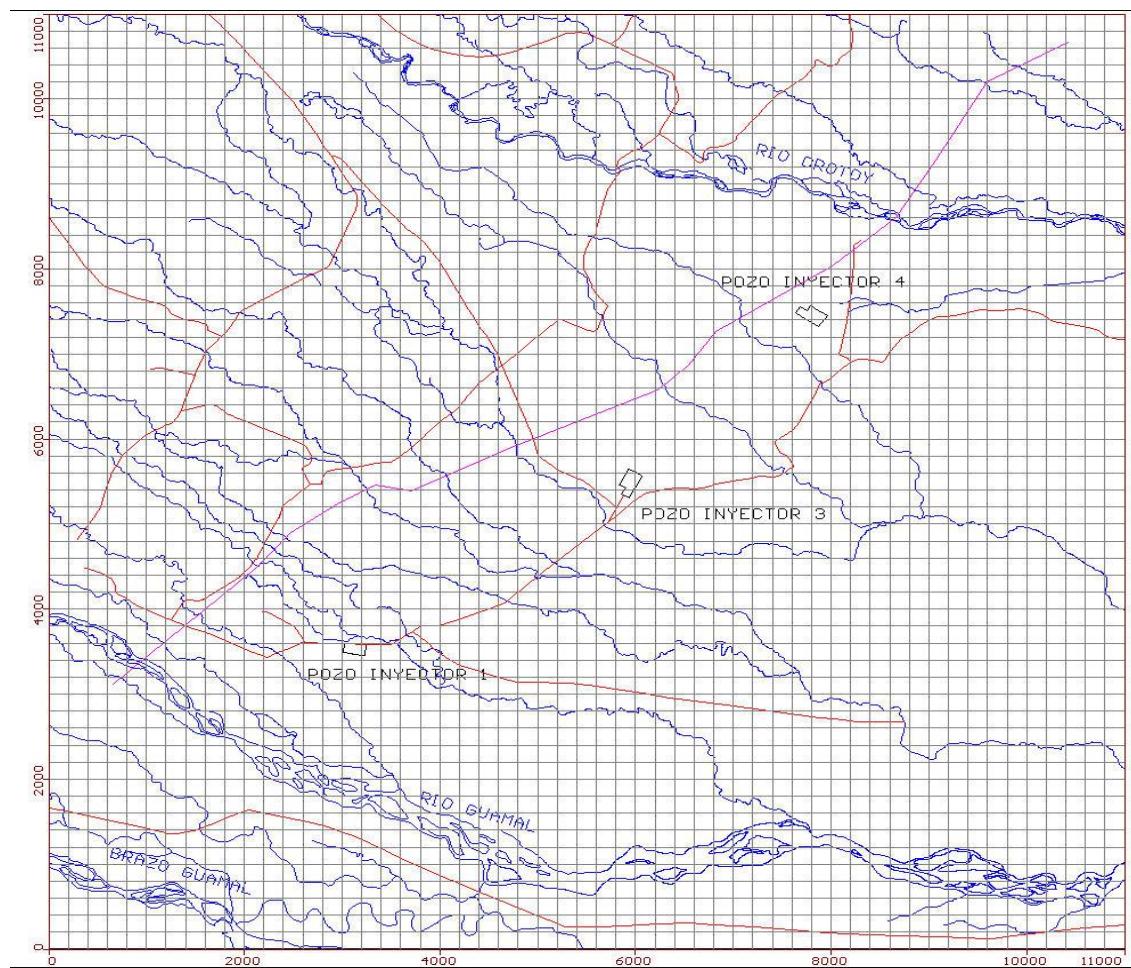
##### ➤ Extensión del modelo

El área definida dentro del modelo para evaluar la reinyección de los pozos inyectores en el campo Castilla comprende una extensión de 11 km x 11 km. La extensión del modelo se define mediante las coordenadas presentadas en la **Tabla 2-10**, dichas coordenadas corresponden a los límites de la simulación cuya extensión es de 49 Km<sup>2</sup>. Las coordenadas se presentan en el sistema de referencia nacional Magna sirgas con origen Bogotá.

**Tabla 2-10 Coordenadas área del modelo**

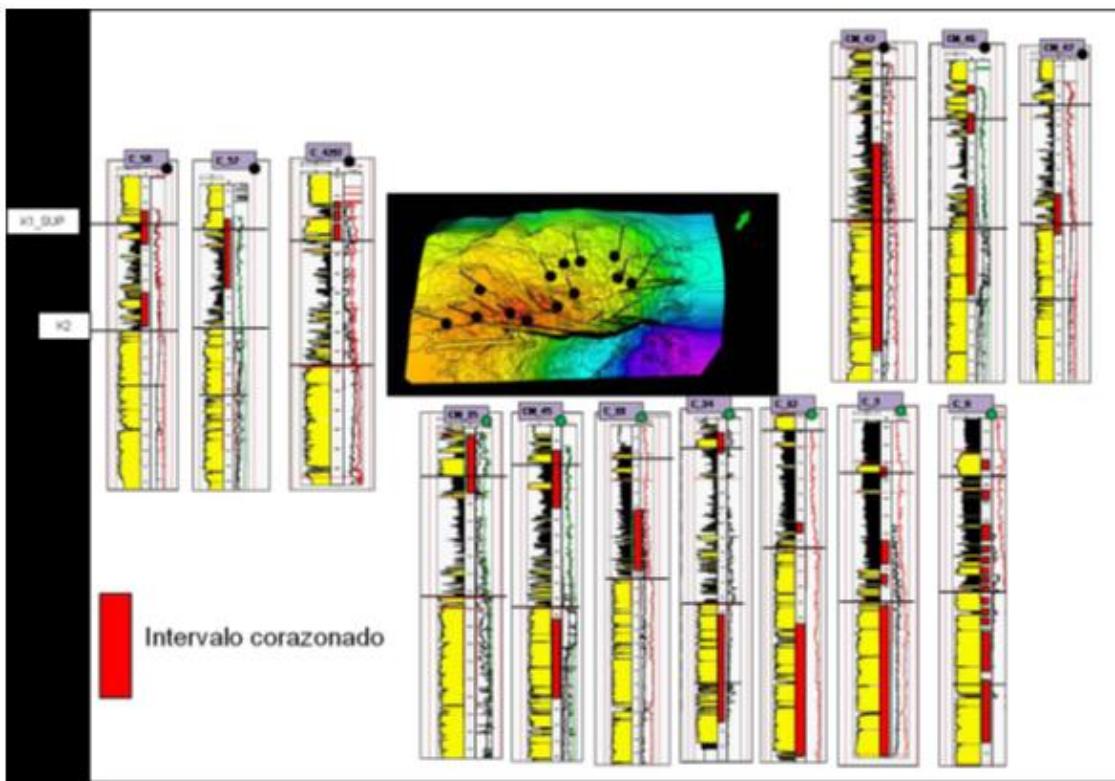
VÉRTICE	ESTE	NORTE
A	1.043.016,5	921.485
B	1.054.016,5	921.485
C	1.054.016,5	910.485
D	1.043.016,5	910.485

La grilla del modelo se encuentra distribuida en 55 filas x 55 columnas con celdas de 200 m x 200 m, con lo cual se puede apreciar puntual y localmente los efectos generados por la reinyección de los pozos reinyección en el Campo Castilla (Ver **Figura 2-9**).


**Figura 2-9      Construcción de la grilla del modelo**

El proyecto de reinyección está referido a la reinyección en los niveles más permeables de la formación Guadalupe en su miembro inferior K2, aunque las permeabilidades de la unidad K1 permitirían la reinyección dentro de toda la unidad acuífera por presentar permeabilidades tan altas como la unidad K2. Los paquetes acuíferos que forman también el reservorio de petróleo pueden ser utilizados para la disposición del agua por su granulometría más gruesa y donde se encuentran las mejores permeabilidades de las formaciones T Cretácicas, los niveles arenosos presentan permeabilidades que van de los 2 a 12 Darcy que representan conductividades Hidráulicas que van desde los 1.5 a 10 m/día y porosidades entre 18 a 23%, presentándose mejores permeabilidades en las arenas de menor porosidad por la presencia de tamaños de grano más gruesos con mejores gargantas para el paso de fluidos que permiten mejores respuestas a la reinyección. La **Figura 2-10** permite observar lo continuo de los paquetes arenosos en el área del campo y de allí que cualquiera de los paquetes K1 o K2, pueda ser utilizado para la reinyección dentro del mismo, la correlación permite observar la continuidad y lo constante del paquete.

Los pozos inyectores de los tres (3) clúster se encuentran ubicados en el sector occidental del campo al oeste de la falla de cierre del campo y permiten realizar la reinyección de hasta 1.200.000 BPD, su posición estructural en la parte más baja de la unidad permite realizar la reinyección sin interferir con los pozos productores de esta misma unidad en el campo. Los pozos pueden ser distribuidos radialmente sobre cada clúster y ubicados con distancia mínima del centro clúster 300 metros.



**Figura 2-10 Correlación de las unidades K1 y K2 dentro del área del campo Castilla.**  
**Fuente:** Evaluación Petrofísica del campo Castilla Ecopetrol, Geo. Norman Yepes,  
 31/08/2011

#### ➤ Capas modeladas

Las capas incorporadas al modelo se generaron a partir de los espesores reportados en los registros compuestos de los pozos CA-47, CN-67, CN-58, CA-123, CA-83, CN-61, de reinyección 1 y CA-101 perforados en el campo Castilla. Como se explicó anteriormente la superficie del terreno se diseñó a partir de los valores de elevación obtenidos del modelo de elevación del terreno para la zona y el tope de unidad K2 y K1 fue suministrado por Ecopetrol S.A. del modelo de yacimiento del campo.

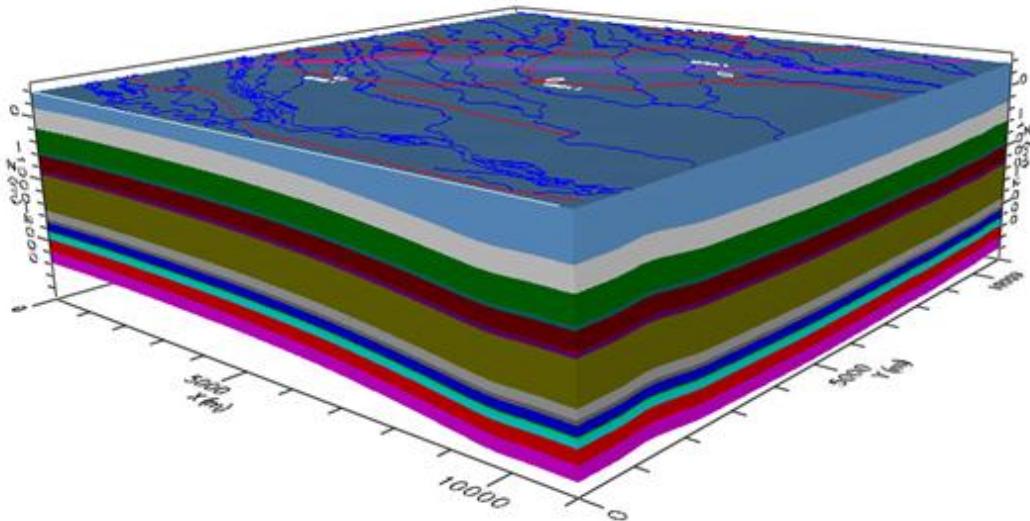
En profundidad se consideraron catorce (14) capas para ser incluidas en el modelo matemático correspondientes a las principales unidades que conforman los estratos que suprayacen y subyacen a la unidad K2. La descripción de las principales unidades geológicas e hidrogeológicas y su espesor promedio se presentan de manera detallada en la **Tabla 2-11**. En la **Figura 2-11** se presenta una imagen en 3D del modelo de capas diseñado para el estudio.

**Tabla 2-11 Capas definidas para el modelo de pozos de reinyección formación K1 y K2**

CAPA	TIPO DE ACUÍFERO	UNIDAD	NOMBRE	ESPESOR MEDIO (M)	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA
1	Libre a Semi confinado.	Qal	Depósitos Aluviales Recientes	50	Son depósitos que presentan porosidad primaria y buenas posibilidades como acuíferos; sin embargo los acuíferos son de extensión local, carácter discontinuo, de productividad moderada a baja, conformados por sedimentos Cuaternarios inconsolidados y
		Qt	Depósitos de Terrazas		

CAPA	TIPO DE ACUÍFERO	UNIDAD	NOMBRE	ESPESOR MEDIO (M)	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA
					corresponde a los acuíferos captados por la comunidad.
2	Semiconfinado a Confinado	Tgm	Fm. Guayabo	322	Representa las unidades con mayor potencial acuífero que se encuentran del área corresponde a intercalaciones de arenas y gravas con potencial acuífero confinadas por los niveles de arcillolitas del mismo paquete. En la parte superior se presenta los niveles con predominio arenoso en donde se encuentran la mayoría de pozos sobre esta unidad de explotación limitada por la facilidad de captación de los primeros horizontes.
3	Confinado/ acuífero	Arenisca Superior	Fm. Carbonera	364	Areniscas conglomeráticas superiores de la Fm. Carbonera. Se encuentra suprayaciendo la unidad Lutitas E, con un predominio de arenas grano fino y arcillolitas de moderadas propiedades hidráulicas por la presencia de los niveles arcillosos.
4	Capa Sello / Confinante	Lutitas E	Fm. Carbonera	54	Capa sello o Acuícerre con predominio de arcillas de muy baja permeabilidad que aísla las unidades subyacentes de la unidad Lutitas E con la superficie
5	Confinado	Unidad C1	Fm. Carbonera	244	Miembro de la Formación Carbonera superior con predominio arenas de grano fino con predominio arcilloso.
6	Confinado /acuífero	Areniscas Carbonera	Fm. carbonera	74	Esta unidad está constituida por arenas poco cementadas aislada de los acuíferos someros y representa una unidad con potencial acuífero.
7	Capa Sello /Confinante	Unidad C2	Fm. Carbonera	582	Capa de intercalaciones de limolitas, Areniscas y arcillas con el predominio de niveles arcillosos de la formación Carbonera
8	Acuícerre/ Capa Sello	Lutitas E3	Fm. Carbonera	142	Unidad constituida por lutitas con esporádicas intercalaciones de limolita y arcillolita.
9	Confinado	T1	Fm. Carbonera	60	Unidad principalmente compuesta por arenas y limolitas intercaladas con delgadas capas de lutitas y arcillolitas y esporádicas trazas de pirita y carbón.
10	Acuícerre /Capa sello	Lutitas E4	Fm. Carbonera	140	Unidad compuesta por grandes paquetes de lutitas intercaladas con delgados niveles de arcillolitas, que actúan como acuícerre de la acumulación petrolífera y sello principal de proyecto de reinyección de aguas de formación.
11	Confinado/ Acuífero	T2	Fm. Carbonera	30	Secuencia masiva de arenas cuarzosas de grano fino a medio grueso, moderadamente seleccionadas, localmente conglomerática a la base de

CAPA	TIPO DE ACUÍFERO	UNIDAD	NOMBRE	ESPESOR MEDIO (M)	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA
					secuencias grano decrecientes e intercaladas con delgadas capas de shales.
12	Confinado/ acuífero	K1	Fm. Guadalupe Superior	106	Esta unidad está compuesta por paquetes de arena fina a media con intercalados con niveles de limolitas y trazas de piritas.
13	Confinado/acuífero	K2	Fm. Guadalupe Masivo	200	Se compone de arena de grano grueso a muy grueso y angular con algunas intercalaciones de limolita. Se encuentra aislada de los acuíferos someros, por cuanto es favorable realizar la disposición de aguas de producción.
14	Sello de modelo en su base	Pz	Basamento/ Cir	200	Capa compuesta principalmente por metasedimentos de color gris claro, blanco verdoso, menor verde pálido con textura gnésica subyaciendo la unidad propuesta para reinyección y actúan como acuicierre del modelo



**Figura 2-11 Capas del modelo numérico**

➤ **Límites**

El límite superior del modelo corresponde a la topografía de la zona, determinada con base en el modelo digital de elevación del terreno de la zona para generar curvas de nivel cada 10 metros y corresponde a la superficie actual del campo en su sector sur occidental.

Por su parte la base del modelo corresponde, al basamento cristalino en donde se depositaron los sedimentos Cretácicos y Terciarios que forman las capas con potencial acuífero que presenta el modelo. La unidad sello del basamento cristalino está compuesta principalmente por metasedimentos macizos de limolitas y arcillolitas de muy baja permeabilidad de color gris cuyo espesor asignado al modelo corresponde a 200 metros.

➤ **Cuerpos de agua superficial**

Desde el punto de vista hidrogeológico se incluyeron en la modelación como cuerpos de agua superficial los ríos Orotay y Guamal, debido a que se encuentran en el área de influencia determinada en el modelo conceptual y por ser fuentes hídricas permanentes a lo largo del año con flujo base que permite el intercambio entre el acuífero y los lechos del río.

El Río Orotay discurre en sentido NW-SE, sin embargo en el modelo se simuló únicamente a la parte baja de cuenca, la cual pasa al norte de los clúster de reinyección. El Río Orotay es de tipo permanente y por consiguiente mantiene un equilibrio estrecho con el primer nivel acuífero aportando flujo base en el periodo seco hacia el acuífero y recibiendo los excesos de recarga de las terrazas en el periodo de lluvias. El Río Guamal por su parte se encuentra ubicado al sur oeste del área del modelo, es considerado una de las principales fuentes hídricas del departamento del Meta, el cual se une con el Río Humadea y el Río Camoa para formar el Río Metica. Su nacimiento se ubica en la zona del piedemonte donde se encuentra el núcleo pluviométrico más elevado de toda la cordillera oriental con 6.500 mm de promedio multianual y recorre 112km entre zona cordillerana y sabana.

El lecho del Río Guamal y Humadea corresponde a un patrón de drenaje de tipo trenzado con formación de varios brazuelos e islotes, producto de la cantidad excesiva de material de arrastre proveniente de la zona cordillerana.

Con base en estas características los ríos se simularon bajo la condiciones de frontera RIVER, teniendo en cuenta el ancho medio, el espesor del lecho del río y las cotas de la lámina de agua. Para asignar la conductividad de los cuerpos de agua se asumió una zona homogénea por la naturaleza de su depósito, para calcular la conductividad hidráulica del material del lecho se utilizaron los datos de una prueba de bombeo realizadas en aljibes sobre las terrazas aluviales en el inventario de puntos de agua. En la prueba de bombeo se pudo determinar que el lecho del río tiene una Transmisividad de 7.00 m<sup>2</sup>/d, la cual corresponde a una conductividad hidráulica horizontal (K<sub>xy</sub>) de 2 m/d y conductividad hidráulica vertical (K<sub>z</sub>) de 0.18 m/d.

**Tabla 2-12 Conductancia del lecho del río**

NOMBRE	KZ (M/D)	ANCHO L (M)	ESPESOR B (M)	ALTURA LAMINA DE AGUA W (M)	CONDUCTANCIA (M <sup>2</sup> /D)
Orotay	0.18	15	4	1.5	0.9
Guamal	0.18	20	4	1.5	0.9

➤ **Parámetros hidráulicos**

Los parámetros hidráulicos se asignaron de acuerdo con las pruebas de bombeo, información secundaria de propiedades hidráulicas determinadas en pruebas cerca al área de estudio y las características propias de la litología que compone cada una de las capas (Walton, 1970 referenciado en Driscoll, 1986), así como variaciones propias que se llevaron a cabo durante el proceso de calibración del modelo en estado estacionario. Los parámetros presentados (**Tabla 2-13**) son parámetros equivalentes para todo el espesor de la capa, asignados de forma homogénea.

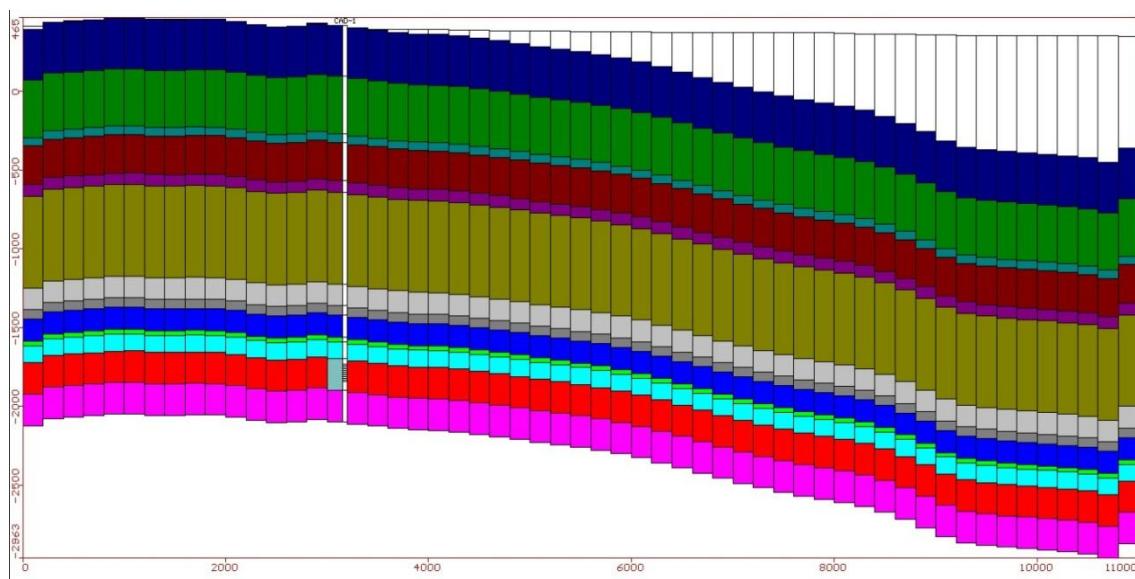
**Tabla 2-13 Parámetros hidráulicos empleados en el modelo**

CAPA	TIPO DE ACUÍFERO	SÍMBOLO	ESPESOR MEDIO (M)	KX-KY (M/D)	KZ (M/D)	SS (1/M)	SY (-)	POROSIDAD EFECTIVA	POROSIDAD TOTAL
1	Libre a Semiconfinado	Qal, Qt	50	5	0.5	0.01	0.15	0.22	0.35
2	Semiconfinado a Confinado	Tgm	322	10	1	0.01	0.18	0.2	0.3
3	Confinado	Arenisca Superior	364	0.1	0.01	1.0E-04	2.00E-01	0.2	0.3
4	Acuícierge	Lutita E	54	1.0E-06	1E-7	1.0E-06	8.00E-02	0.1	0.15
5	Acuícierge	Unidad C1	244	1.0E-05	1E-6	1.0E-05	8.00E-02	0.1	0.15
6	Confinado	Areniscas Carbonera	74	0.6	0.062	1.0E-05	0.1	0.15	0.2
7	Acuícierge	Unidad C2	582	1.0E-05	1E-6	1.0E-06	8.00E-02	0.1	0.15
8	Acuícierge	Lutitas E3	142	1.0E-06	1E-7	1.0E-06	8.00E-02	0.1	0.15
9	Confinado	T1	60	1	0.1	1.0E-06	8.00E-02	0.13	0.15
10	Acuícierge	Lutitas E4	140	1.0E-06	1E-7	1.0E-06	8.00E-02	0.1	0.15
11	Confinado	T2	30	5	3	1.0E-06	8.00E-02	0.1	0.18
12	Confinado	K1	106	10	6	1.0E-06	0.1	0.15	0.2
13	Confinado	K2	200	10	6	1.0E-06	0.1	0.12	0.2
14	Sello del modelo	Basamento	200	1E-06	1E-7	1.0E-07	0.05	0.05	0.18
15	Barrera de no flujo	Falla	1.0E-05	1.E-06					

K: Conductividad hidráulica equivalente; Ss: Coeficiente de almacenamiento; Sy: Producción Específica.

Los valores de Kx, Ky y Kz fueron determinados para a partir de los resultados de las pruebas de bombeo en acuíferos principalmente de los depósitos Cuaternario y la Fm. Guayabo. Para las unidades inferiores se realizó la conversión de la permeabilidad en Darcy suministrada por Ecopetrol S.A., a unidades m/d utilizadas dentro del modelo.

En la **Figura 2-12** se muestra una vista perfil del modelo donde se representa mediante colores la conductividad de cada capa del modelo de acuerdo con la secuencia de parámetros hidráulicos definidos en la **Tabla 2-13**. Vale la pena destacar la similitud que esta imagen tiene con los afloramientos de las unidades geológicas presentes en el área las cuales se encuentran en el Mapa Geológico del área de estudio.



**Figura 2-12 Conductividad hidráulica del modelo**  
**Fuente: Sección Transversal Row 39.**

#### ➤ Condiciones de frontera

Para la modelación se determinaron una serie de condiciones de frontera o relaciones entre el modelo con el área externa fundamentales no solo en la calibración del modelo numérico, sino en la representación de las condiciones de flujo del agua subterránea de acuerdo con el comportamiento en la vida real.

- ✓ Ríos

Las corrientes definidas en el modelo hidrogeológico conceptual se asignaron al modelo como condición de frontera en las celdas que corresponden a los ríos según la cartografía temática.

- ✓ Anisotropía

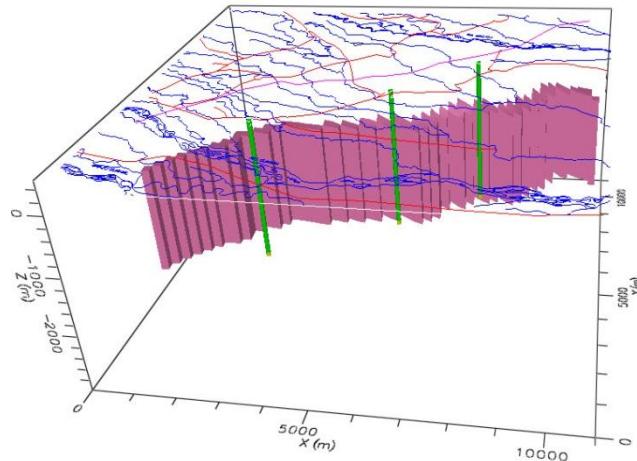
Dado las características geológicas del área de estudio, podrán esperarse características de flujo en condiciones anisotrópicas, siendo mayor la conductividad hidráulica en sentido horizontal que en sentido vertical. Se consideró por experiencia en condiciones de rocas sedimentarias una anisotropía representada como  $K_{vertical} = 0.10 K_{horizontal}$  en todas las capas del modelo con excepción de la unidad K1 y K2 que presentan datos de núcleo en los cuales en base datos de laboratorio se cargaron los datos de conductividad vertical.

Este comportamiento tiene una mayor representación en unidades como las areniscas del K1 y K2 sujeta a reinyección, donde el flujo de agua sigue el buzamiento de las capas, el cual para el área del modelo tiene un comportamiento predominantemente horizontal.

- ✓ Pared

De acuerdo a las características geológicas del área de estudio se evidencia una discontinuidad en las capas en sentido noroeste debido a la presencia de una falla geológica por encima de la clúster de reinyección, en la parte central del área modelada. Esta situación se incluyó como una condición de frontera WALL, esta condición permite simular una pared vertical con espesor de 12 m y con una permeabilidad muy baja, impidiendo el flujo horizontal hacia el oriente en la zona donde se ubican los clúster pozos inyectores y corresponde a la falla que realiza el cierre del

campo Castilla al Oeste del campo y actual como limitante del flujo hacia el este del campo. Esta condición limita el flujo del agua de inyección a los pozos y garantiza el aislamiento de la reinyección con los pozos productores de crudo.



**Figura 2-13 Localización falla geológica**

Como se observa en la **Figura 2-13** la pared permite el flujo hacia el oriente en los puntos más extremos del modelo y permite separar el sector productivo del campo de petróleo y los pozos a ser utilizados para devolver el agua a sus unidades origen.

✓ Cabeza constante

Este valor de cabeza se asigna a los límites del modelo en el sector occidental y representa una aportación infinita de agua a la unidad de interés por el efecto de la recarga del acuífero profundo de la unidad K1 y K2 que genera que el agua de formación presente características de aguas dulces. Con el fin de simular las condiciones de nivel constante se asigna un valor en condiciones estacionarias de -91.84 m, este valor en columna de agua es similar a los 2600 psi medidos con presión estática de los pozos de inyección 1 y 2. El borde de cabeza constante para el modelo fue establecido en el margen occidental del área a modelar y por debajo de la falla que limita el campo en las unidades K1 y K2.

✓ Recarga

La zona se caracteriza por tener una precipitación media de aproximadamente 4358.7 mm/año que se presenta mediante una distribución estacional monomodal. Por otro lado una temperatura promedio de 30 °C y viento casi constante, generan en la zona tasas de evapotranspiración potencial, cuyo valor puede ser superior al valor estimado. En consecuencia el agua que no se pierde por evapotranspiración es transportada por escorrentía superficial y la recarga potencial del acuífero es de aproximadamente 2500 mm/año. Sin embargo es evidente que la recarga real es sustancialmente inferior. Normalmente la recarga real corresponde a una fracción de la recarga potencial que se puede estimar de manera aproximada. Por tanto, tomando factor del 10%, la recarga real podría llegar a ser de 250 mm/año en condiciones normales.

En la calibración del modelo teniendo en cuenta que la reinyección se realiza a profundidades mayores 2.200 metros, este valor representó condiciones sobreestimadas para el balance de agua, por tanto, se redujo sustancialmente hasta obtener un valor que satisfaga las condiciones de cabeza inicial y poder tener una solución matemática al modelo del área con los datos existentes.

El valor de recarga que mejor se ajustó en la modelación fue de 15 mm/año y fue este el valor utilizado para las corridas del modelo en los escenarios simulados.

➤ **Método de solución Waterloo Hydrogeologic Solver (WHS)**

Este solucionador aproxima de una manera rápida y estable, en comparación con otros métodos, la solución aproximada de una serie de ecuaciones diferenciales parciales que representan el flujo de agua subterránea en cada una de las celdas del modelo. Este proceso iterativo se lleva a cabo mediante la definición de siete parámetros: El máximo número de iteraciones internas y externas proveen un límite superior con respecto al número máximo de iteraciones de cada tipo, estos valores solo se alcanzan cuando la convergencia no se ha dado de antemano, en dichos casos se debe aumentar el máximo número de iteraciones.

De acuerdo con esto fue necesario ajustar los valores de máximo número de iteraciones internas y externas para la simulación en estado transitorio. El criterio de cambio máximo de cabeza para la convergencia es de 0.01 mm, es decir, el modelo no converge hasta el momento en que el cambio de cabeza en cada una de las celdas es inferior al valor de tolerancia establecido.

El criterio residual para la convergencia se usa para juzgar la convergencia de las iteraciones internas del solucionador, cuando el cambio de cabeza entre iteraciones sucesivas es inferior al valor de tolerancia, el solucionador continua a la siguiente iteración externa. El factor de reducción permite al usuario disminuir el cambio de cabeza calculado durante iteraciones sucesivas externas para permitir que una solución inestable o no convergente alcance una solución.

El criterio residual relativo provee otro método para verificar la convergencia de las iteraciones internas mediante la comparación del residual de la iteración interna más reciente con el residual de la iteración interna inicial, en este caso se usa un valor de 0 para desactivar este otro método.

Se utilizó el nivel de factorización 1 debido a que requiere un menor número de iteraciones a pesar de que consume más memoria del computador en el proceso de solución.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la corrida del modelo en estado estacionario y transitorio con el solucionador WHS, se presentan en la **Tabla 2-14**.

**Tabla 2-14 Parámetros del solucionador WHS**

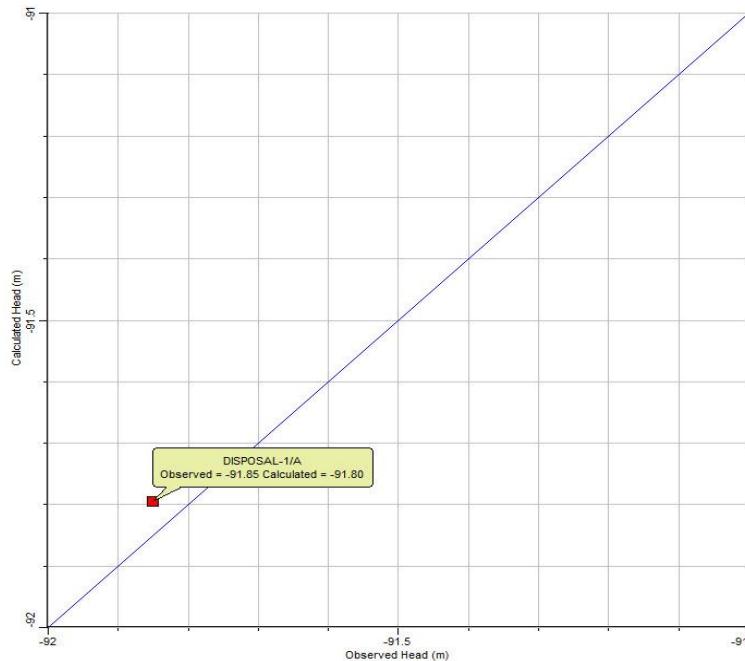
PARÁMETRO	VALOR
Máximo número de iteraciones externas	1000
Máximo número de iteraciones internas	20
Criterio de cambio de cabeza para convergencia (m)	0.01
Criterio residual para la convergencia	0.01
Factor de reducción	1
Criterio residual relativo	0
Nivel de factorización	1

➤ **Calibración del modelo matemático**

Como se mencionó anteriormente la calibración del modelo matemático se realizó de manera iterativa empleando los valores medidos de presión durante las pruebas de inyectividad realizadas en el pozo de reinyección 1. Para lograr la calibración del modelo se incorporó dicho pozo con los respectivos niveles de zona cañoneada y se asignó como pozo observador. Para el modelo en estado transitorio el pozo se convierte en inyector y observador.

✓ Calibración en estado estacionario

A continuación en la **Figura 2-14** se presenta la diferencia entre los niveles observados y calculados para el pozo de reinyección 1, la calibración del modelo tiene un error medio cuadrático entre la cabeza de presión calculada y la cabeza de presión observada de 0.05 m y un error estándar de -1 m. El modelo se itera hasta hallar el valor más cercano de cabeza de presión inicial en el pozo de reinyección -1, sin embargo pese a la ausencia de datos que permitan hacer un mejor ajuste en la solución del modelo, no se logra que el error residual se aproxime a un único valor, pero si a unos valores muy pequeños de convergencia.



**Figura 2-14 Resultados de calibración estado estacionario**

✓ Balances de agua

En forma complementaria también es importante el ajuste de la calibración del modelo teniendo como base el error en el balance de agua, que para el modelo es igual a 0%.

El total de entradas al sistema es de  $3.759E9$  ( $m^3/d$ ) dadas por la recarga y el intercambio con cuerpos de agua, y las salidas son de  $3.7559E9$  ( $m^3/d$ ) por aportes de flujo a cuerpos de agua superficial.

➤ **Simulaciones para evaluar la reinyección en el tiempo**

La simulación para evaluar los efectos por el proceso de reinyección en el tiempo hace referencia al estado transitorio partiendo de las condiciones iniciales o estacionarias. De ésta manera se realizaron las diferentes simulaciones de tipo predictivo para evaluar posibles efectos teniendo en cuenta diferentes escenarios propuestos en el clúster de reinyección, de esta manera se podrá evaluar las posibles efectos que tendría la reinyección de los pozos en la unidad K2.

El caudal de reinyección empleado para evaluar la reinyección en la unidad K2, se determinó con base en las necesidades de Ecopetrol para disponer las aguas de producción, teniendo en cuenta que se requiere como mínimo comenzar con los 600.000 BAPD, a una tasa de 40.000 BAPD ( $6.400 m^3/día$ ) en cada pozo inyector e ir incrementando hasta obtener una tasa de reinyección

máxima de 80.000 BAPD (12800 m<sup>3</sup>/día) o el volumen que sea autorizado por la autoridad ambiental.

Así mismo se evaluó la posibilidad de reinyección a una mayor tasa por pozo, evaluando la capacidad máxima por pozo incrementando el caudal de reinyección a 900.000 BAPD y 1.200.000 BAPD. No obstante este valor es predictivo y sólo se puede confirmar con datos reales obtenidos a partir de pozos inyectores perforados y probados a las condiciones simuladas, teniendo en cuenta que las propiedades hidráulicas simuladas fueron consideradas como un acuífero homogéneo algo que no sucede en la realidad. Una vez se tenga desarrollado el proyecto de reinyección se recomienda calibrar el modelo con los datos obtenidos de los tres primeros años de reinyección y verificar el comportamiento con el tiempo en los diferentes sectores del yacimiento.

✓ Condiciones de frontera

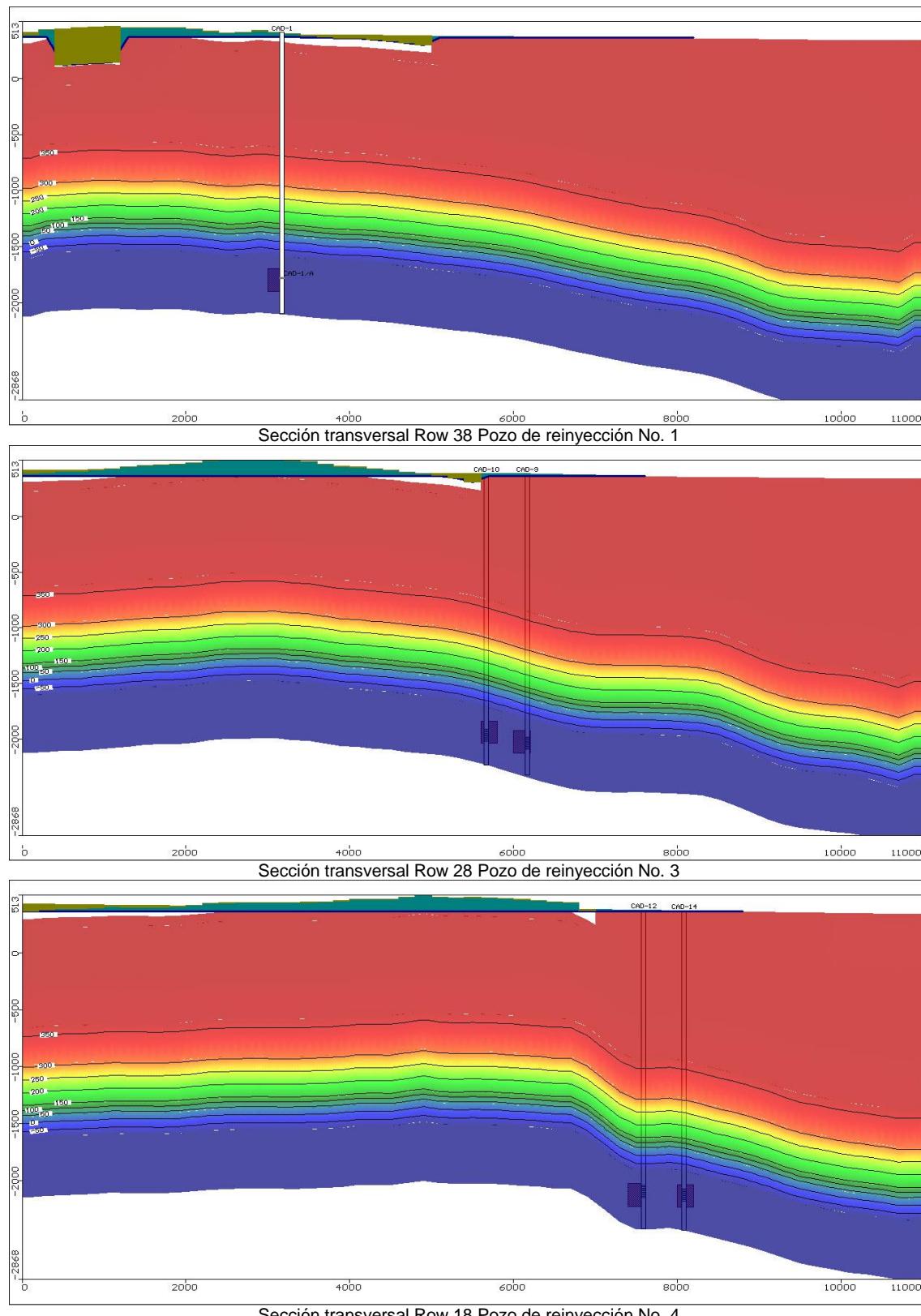
Como condiciones de frontera se tuvieron en cuenta los criterios de la simulación en estado estacionario, pero evaluadas en un periodo de veinte (20) años. A continuación se presentan los valores definidos para cada una de las condiciones de frontera:

- Cabeza constante: se utilizó el valor de presión de 2600 PSI o -91.84 m.s.n.m para el tiempo cero (0) y posteriormente se fue incrementando de acuerdo al caudal inyectado en la unidad K2.
- Recarga: No vario en el tiempo evaluado durante las simulaciones en estado transitorio.
- Río: Los valores de conductancia para los ríos Orotoy y Guamal no presentaron cambios durante los veinte años (20) evaluados confirmando el aislamiento de las capas profundas sometidas a la reinyección y los acuíferos someros regulados por régimen de lluvias de la zona
- Wall: Esta condición se mantuvo con los valores contantes incorporados en la simulación realizada en estado estacionario y corresponde a las condiciones estimadas para la zona de falla que separa el campo y el sector de reinyección de los pozos.

✓ Influjos hacia el primer nivel acuífero

Las simulaciones en estado transitorio comprendieron igualmente la evaluación de posibles efectos de influjo hacia el primer nivel acuífero frente a la reinyección en el Campo Castilla.

Dado que el primer nivel del acuífero es libre, se encuentra a presión atmosférica; la forma de evaluar el impacto por el influjo es a través de las isolíneas de cabeza piezométrica. Como se puede observar en la **Figura 2-15** el confinamiento de las capas intermedias entre la unidad de reinyección y los acuíferos someros no permiten el influjo hacia los niveles acuíferos someros. Básicamente el acuífero libre se encuentra aislado de los acuíferos de la unidad K1 y K2, por los intervalos de capas arcillosas que confinan los niveles que se encuentran suprayacentes. Los niveles arcillosos de las lutitas E3, E4 y los niveles de predominio arcilloso del miembro C2 de la formación Carbonera actúan como capas sellado que confinan la reinyección como casi un solo paquete a los paquetes arenosos del K1 y K2 que constituyen los niveles con potencial acuífero de las unidades con potencial acuífero modeladas.



**Figura 2-15 Vista en perfil comportamiento de presiones por clúster**

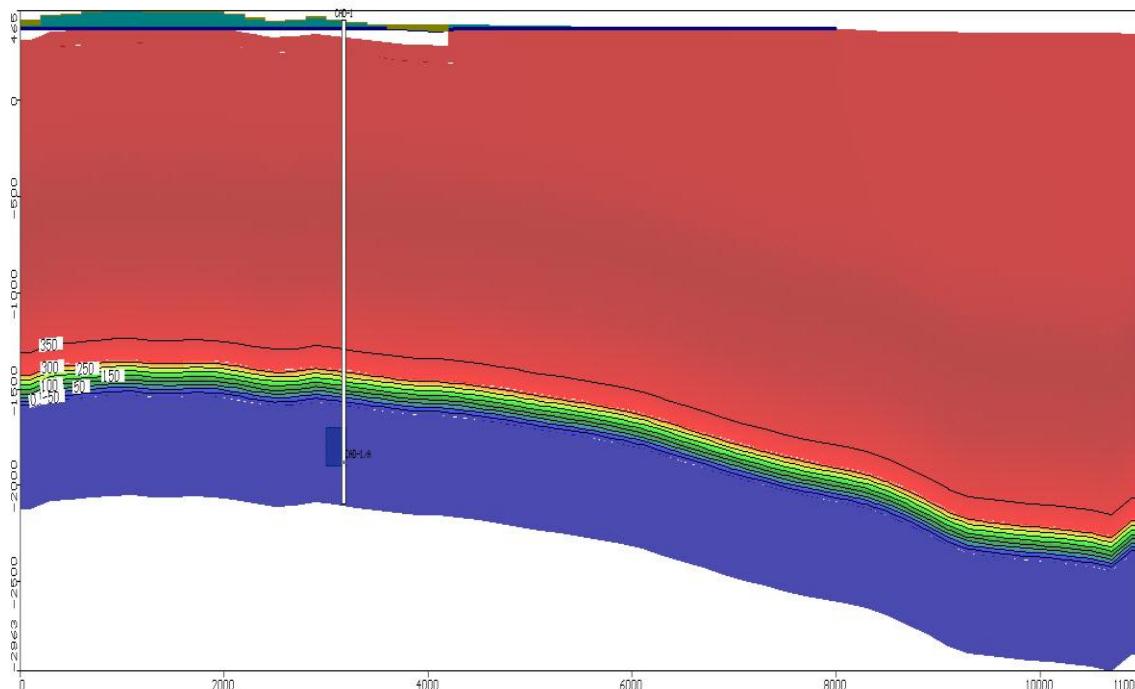
Los perfiles presentados en la capa sujeta a reinyección tienen un sentido W-E sobre los algunos de los pozos de reinyección de cada uno de los tres clúster; permite observar que las presiones en el primer nivel acuífero se mantiene constantes y reguladas por el flujo base del Río Orotay y Guamal.

- ✓ Comportamiento de la unidad sujeta a reinyección

Luego de iniciado el proceso de reinyección cada uno de los clúster de reinyección en el campo castilla se evidencia una presurización de las capas desde la capa sello correspondiente a la unidad lutitas E3 y E4 hasta la capa de reinyección K1 y K2. El periodo evaluado durante la simulación se realizó hasta los veinte (20) años de reinyección con una tasa de inicial de 6400 m<sup>3</sup>/d y aumentándola hasta ese mismo periodo a 12.800 m<sup>3</sup>/d.

Con este caudal se puede observar en el escenario más crítico que es a los 20 años donde los niveles de presión aumentarán aproximadamente en 2.7 PSI, con respecto a las condiciones iniciales de la simulación (Ver **Figura 2-16**). Los incrementos de presión no son significativos por los espesores de las unidades que alcanzan los 300 metros de espesor de arenas con potencial de recibir agua con permeabilidades altas que permiten que el agua fluya dentro de la unidad acuífera sin limitaciones.

Las presiones de reinyección a la tasa de más alta de reinyección de 80.000 BPD, no requieren si no de 300 psi de presión adicional en cabeza para alcanzar los volúmenes requeridos, la presión de reinyección en fondo requerida es de 3591 psi y la presión de la columna de agua sobre el punto reinyección es 3277 psi. Los incrementos de presión por reinyección en la formación no son significativos pues para los 20 años con las tasas más altas de reinyección no alcanzan más de 1.8 metros de incrementos de columna de agua.



**Figura 2-16 Nivel piezométrico unidad K2. Sección transversal Row 38 Pozo inyector No. 1. Unidad de reinyección K2**

➤ **Resultados de la simulación**

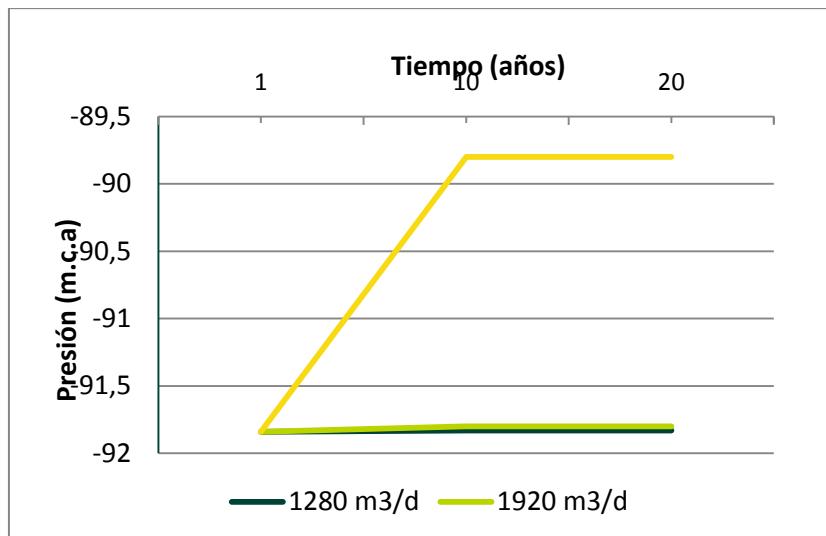
Considerando que se simularon varios escenarios, no se observan incrementos de presión significativos que generan influjos hacia los acuíferos superficiales que capta la comunidad.

En la **Tabla 2-15** se presentan los datos de los escenarios de simulación tenidos en cuenta para evaluar la reinyección de aguas de producción asociadas al Bloque Cubarral campos castilla y Chichimene. Los caudales de reinyección para los quince (15) pozos de los tres (3) clúster tenidos en cuenta para las simulaciones realizadas fueron: 6.400, 9.600 y 12.800 m<sup>3</sup>/d de forma constante en un periodo de 20 años, conservando las mismas propiedades hidráulicas desde la simulación en estado estacionario.

**Tabla 2-15 Resultados de los escenarios de simulación**

TIEMPO (AÑOS)	PERMEABILIDAD (M/D)	Q INY (M3/D)	QINY (BAPD)	PMAX (MCA)	PRESIÓN MÁXIMA AL TOPE DE LA UNIDAD (PSI)	PRESIÓN NATURAL DE FORMACIÓN (PSI)	INCREMENTO (PSI)
20	10	6.400	40.000	-91.83	2600.2	2600	0.02
20	10	9.600	60.000	-91.8	2601.3	2600	1.3
20	10	12.800	80.000	-89.8	2602.7	2600	2.7

Con base en la información presentada anteriormente se puede evidenciar que los incrementos de presión son irrelevantes, teniendo en cuenta los caudales estimados de reinyección 6.400, 9.600 y 12.800 m<sup>3</sup>/d (50.000, 100.000 y 200.000 BAPD), la presión se incrementa levemente en la unidad K2, pero esta nunca excede 2.7 PSI que significan menos 2 metros de incremento de presión en el reservorio.



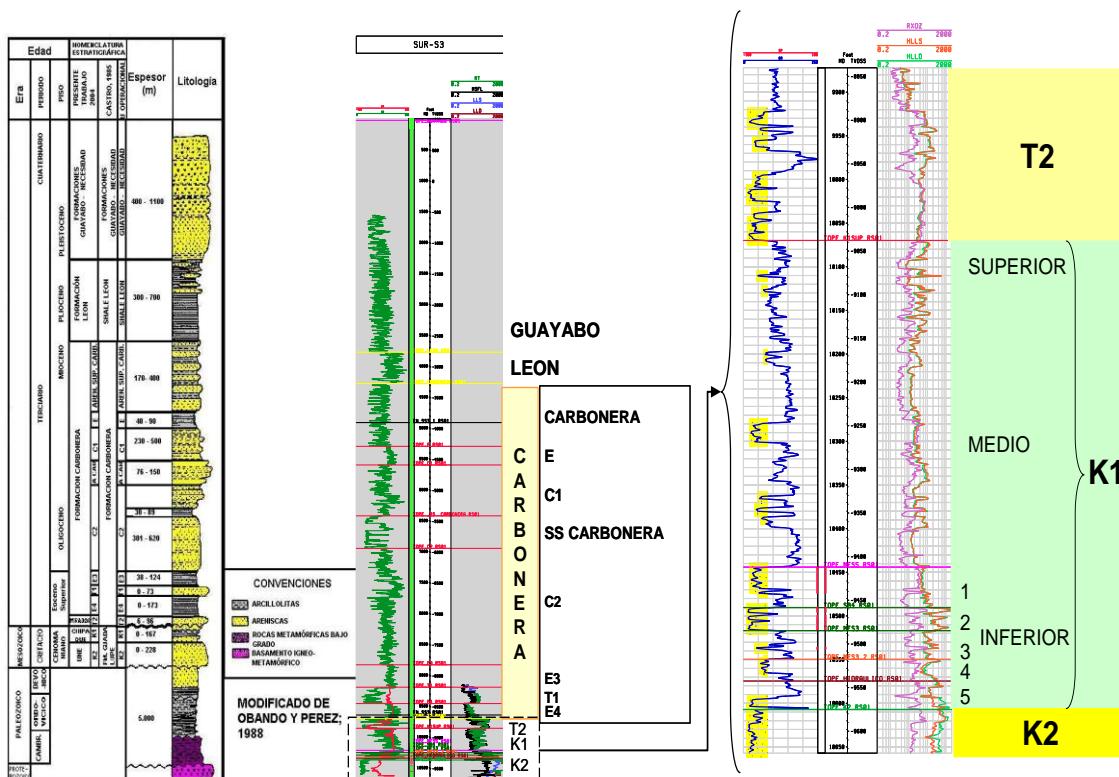
**Figura 2-17 Resultado simulación periodo de 20 años por clúster**

Es importante resaltar que el incremento de la presión es gradual en el tiempo hasta alcanzar la presión máxima, la presión reportada por el modelo corresponde a las condiciones estacionarias por encima de la presión que se incrementa en el primer intervalo de tiempo después de iniciada la reinyección.

### 2.1.2.2 Unidades estratigráficas

En el Campo Castilla - Chichimene se encuentran rocas con edades que van desde el Precretáceo hasta el Reciente. Las rocas almacenadoras de hidrocarburos corresponden a las Unidades Guadalupe Masivo, Guadalupe Superior y San Fernando. Las unidades Guadalupe Masivo y Guadalupe Superior son unidades operacionales denominadas así por Chevron y se correlacionan respectivamente con las unidades operacionales K2 y K1 de los campos de Apiay y Suria.

Regionalmente éstas unidades representan una secuencia depositacional de larga duración en el Cretáceo Superior, separada por inconformidades a la base y al tope, con numerosas secuencias de menor orden dentro de esta (Ver **Figura 2-18**).



parda media a parda clara, gris oscuro, predomina grano grueso a muy grueso, menor medio a fino, ocasional conglomerática, subangular, subredondeado, subelongado, subesférico, regular a mala selección. Fragmentos de chert amarillo ocre, rosado, pardo rojizo, gris claro a gris oscuro, fragmentos de cuarzo (90%) y líticos oscuros (10%). El conglomerado es polimictico, predomina pardo amarillento oscuro menor amarillo claro, verde medio, blanco lechoso, pardo oscuro, ocasionalmente negro, clastos angulares. Fragmentos de cuarzo, blanco, blanco lechoso, amarillo subtranslúcido, parda rojiza local oxidada, chert amarillo ocre, gris claro a gris oscuro, granos muy gruesos a gránulos

➤ **Formación Carbonera**

- ✓ Unidad areniscas superiores

Desde 1535 hasta 2345 pies PM (1535 hasta 2345 pies PV)

Espesor aparente: 810 pies.

La unidad Areniscas Superiores está compuesta por niveles de arenas en la parte superior y media, hacia la base es más arcillosa. La arena es cuarzosa, hialina, translúcida, local amarilla translúcida, ocasional blanca lechosa, grano muy fino a fino, local medio, ocasional grueso, subredondeado, subesférico, subangular, buena selección. La arcillolita es gris clara, gris verdosa, gris media, parda rojiza, parda amarillenta, gris oscura, blanca crema, crema moteada de pardo rojizo, púrpura clara, moderadamente firme, blanda, predomina amorfa, menor sublaminar, subblocosa, plástica, soluble, pegajosa, no calcárea. La limolita es gris verdosa clara, menor blanca con inclusiones carbonosas, local parda clara, moderadamente firme, local blanda, subblocosa, no calcárea. Además se presentan trazas de arenisca, pirita, carbón, lutita, Chert.

- ✓ Unidad lutita E

Desde 2345 hasta 2688 pies PM (2345 hasta 2688 pies PV)

Espesor aparente: 343 pies.

Esta unidad se conforma principalmente por intercalaciones de niveles delgados de Lutitas, limolitas y arenas intercalados con niveles de mayor espesor de arcillolitas. El nivel de lutita se encuentra ubicado continuamente desde el tope de esta unidad hasta los 2400 pies. Se evidencian esporádicas trazas de Pirita, Carbón y areniscas. La arcillolita es gris crema, gris media, gris clara moteada con roja moderada, menor roja moderada, menor amarilla moderada, blanca grisácea, blanca, gris clara, plástica, pegajosa, blocosa, homogénea, soluble, no calcárea. La Lutita es gris verdosa, menor gris oliva muy claro, quebradiza, menor moderadamente consolidada, sublaminar, homogénea, local ligeramente limosa, ocasional con laminaciones carbonosas, no calcárea. La arena es cuarzosa, translucido, amarillo subtranslucido, hialino, blanco lechoso, menor amarillo hialino, blanco subtranslúcido, grano medio, menor grueso, local fino a muy fino, esporádico muy grueso, subredondeado a subangular, subesférico, regular a buena selección, La Limolita es gris clara, crema, gris parda, café clara, amarilla moderada, ocasional parda rojiza, moderadamente consolidada, moderadamente firme, subblocosa, homogénea, no calcárea. Local grada a arenisca de grano fino.

## ✓ Unidad C1

Desde 2688 hasta 3417 pies PM (2688 hasta 3417 pies PV)

Espesor aparente: 729 pies.

El tope de la Unidad C1 fue definido por la aparición de lutitas carbonosas de color pardo oliva, el comportamiento en la ROP, además de la correlación con los pozos Castilla 55 y 58 Y la prognosis. La Unidad está constituida principalmente por arcillolitas que varían su coloración, intercaladas con niveles de arena. Aparecen esporádicos niveles muy delgados de limolita, trazas de lutita, trazas de carbón y trazas de arenisca. La arcillolita predomina gris clara, gris medio, gris verdosa, rojo moderado, gris clara moteada con roja moderada, menor amarilla moderada, firme, subblocosa, homogénea, plástica, pegajosa, no calcárea. La arena es cuarzo, translúcido, amarillo subtranslúcido, hialino, blanco lechoso, blanco subtranslúcido, grano medio a grueso, menor grueso, muy fino, subredondeado a subangular, subesférico, regular a buena selección. La limolita predomina gris pardo, gris verdosa, gris blanca, crema, gris media, parda clara, menor parda amarillenta, moderadamente consolidada, moderadamente firme, subblocosa, homogénea, Local grada a arenisca de grano fino. Ocasional con inclusiones de materia orgánica, no calcárea

## ✓ Unidad areniscas carbonera

Desde 3417 hasta 3649 pies PM (3417 hasta 3649 pies PV)

Espesor aparente: 232 pies.

El tope de esta Unidad se determinó por el cambio litológico, incremento en la arena, incremento en la ROP y correlación con pozos Castilla 55 y 58 y prognosis. La unidad está compuesta por capas de arenas con pequeñas intercalaciones de arcillolita y limolita con trazas de carbón, nódulos de siderita, lutita, arenisca y trazas de pirita. La arena es de cuarzosa, hialina, translúcida a subtranslúcida, menor amarilla subtranslúcida, ocasional blanca subtranslúcida, grano medio, menor fino a muy fino, ocasional grueso a muy grueso, subredondeado, menor subangular, subesférico, regular a mala selección. La arcillolita es en general Predomina gris verdosa clara, menor blanca crema, parda rojiza, púrpura claro, parda amarillenta, local, púrpura, blanda, menor moderadamente consolidada, subblocosa, local amorfa, soluble, no calcárea. La limolita predomina gris media, parda grisácea, menor gris verdosa clara, ocasional parda amarillenta clara, blanda, menor moderadamente consolidada, subblocosa, menor sublaminar, homogénea, con inclusiones microcarbonosas, ocasional micropirítica, no calcárea.

## ✓ Unidad C2

Desde 3649 pies hasta 5455 pies PM (3649 pies hasta 5442 pies PV)

Espesor aparente: 1793 pies.

El tope de esta unidad fue determinado por cambio litológico con incremento de limolita, cambio en la ROP. Correlación con pozos Castilla 55 y 58 En la parte superior desde los 3650 pies hasta los 4100 pies aproximadamente, se presentan potentes bancos de arcillolita los cuales se encuentran intercalados con delgados niveles de arena y limolita, también a través de este intervalo se observa la presencia de trazas de nódulos de siderita y pirita; desde 4100 pies hasta 4600 pies los bancos de arcillolita se encuentran intercalados con delgadas capas de lutita de aproxima de 5 pies de espesor, y esporádicas intercalaciones de limolita y arena; desde los 4600 pies hasta 5455 pies la unidad se hace más limosa se presentan delgados niveles de carbón trazas de pirita intercalados con lutitas y areniscas. La limolita presenta las siguientes características: predomina gris verdosa clara, parda clara, parda grisácea, menor parda amarillenta, parda rojiza ocasional gris clara, moderadamente consolidada, menor friable, blocosa a subblocosa, homogénea, grada a arenisca

de grano muy fino, no calcárea. La arcillolita es predominantemente gris verdosa clara, parda rojiza, menor, parda amarillenta, ocasional púrpura clara, gris moteada con pardo rojizo, blanda, moderadamente consolidada, amorfia, ocasional plástica, subblocosa, soluble, no calcárea. La arena es Cuarzosa, hialina, translúcida a subtranslúcida, menor amarilla subtranslúcida, ocasional blanca subtranslúcida, grano medio menor grueso, ocasional muy grueso, angular a subangular, subesférico, regular selección. La lutita que predomina es gris clara, gris verdosa clara, menor parda media, verde oliva, moderadamente firme a firme, sublaminar, subastillosa, no calcárea.

➤ **Trazas de Pirit**

- ✓ Lutita E3

Desde 5455 pies hasta 5901 pies PM (5442 pies hasta 5859 pies PV)

Espesor aparente: 417 pies.

El tope de esta unidad está definido por la aparición de lutitas marrón oscuro la cual se incrementó hasta 100% de lutita de color verde grisáceo; esta unidad es un potente banco de lutita con esporádicas intercalaciones de limolita y arcillolita con la presencia de trazas de carbón en la parte superior de la unidad. La lutita que predomina a través de toda la unidad es de color verde grisáceo, ocasional gris claro; moderadamente firme; astillosa, sublaminar a laminar, muy fisil; no calcárea; ocasional con inclusiones de pirita; ocasional con inclusiones de glauconita. Las intercalaciones de arcillolita se caracterizan por ser de color gris claro; predomina blanda, local moderadamente firme; amorfia, ocasional blocosa; plástica; pegajosa; no calcárea, Solubilidad 26 - 32%. Los niveles delgados de limolita son predominantemente de color gris claro a blanco; moderadamente consolidada, ocasional consolidada; blocosa; gradando a arenisca de grano muy fino; ocasional calcárea

- ✓ Unidad T1

Desde 5901 pies hasta 6076 pies PM (5859 pies hasta 6017 pies PV)

Espesor aparente: 158 pies.

El tope de esta unidad fue definido por cambio litológico, aparición de limolitas color marrón claro microcarbonosas, aparición de trazas de carbón y aumento en el porcentaje de arcillolita gris medio. Esta unidad esta principalmente compuesta por limolitas intercaladas con delgadas capas de lutita y arcillolitas y esporádicas trazas de pirita y carbón. La limolita que predomina a través de la unidad es de color marrón claro, local marrón oscuro, gris claro; moderadamente consolidada; blocosa; con delgadas intercalaciones carbonosas; ocasional gradando a arenisca de grano muy fino; ocasional calcárea. Las capas de lutita son predominantemente de color verde grisáceo, local marrón oscuro, ocasional gris claro; moderadamente firme; astillosa, sublaminar a laminar, muy fisil; no calcárea. La arcillolita se caracteriza por gris claro; predomina blanda, local moderadamente firme; amorfia, ocasional blocosa; plástica; pegajosa; microcarbonosa; no calcárea, Solubilidad 28%.

- ✓ Lutita E4

Desde 6076 pies hasta 6674 pies PM (6017 pies hasta 6514 pies PV)

Espesor aparente: 497 pies.

El tope de esta unidad fue definido por la disminución de limolita, aparición de lutitas color marrón oscuro y arcillolitas verde grisáceo, de base a techo la unidad se encuentra compuesta por grandes paquetes de lutitas intercaladas con delgados niveles de arcillolita; y hacia la base delgadas capas

de limolita y aparición de lutitas con inclusiones de glauconita y arenisca, en el intervalo comprendido 6550 pies y 6674 pies se incrementan los niveles de limolita color marrón oscuro capas hasta de 10 pies de espesor intercaladas con delgadas capas de lutita. La lutita que predomina presenta las siguientes características: color verde grisáceo, gris medio, local gris claro, menor marrón oscuro; moderadamente firme; subastillosa a astillosa, laminar; local físil; local con inclusiones de glauconita; no calcárea La arcillolita es de color gris medio, ocasional marrón oscuro, verde grisáceo; predomina blanda, local moderadamente firme; predomina amorfa, ocasional blocosa; plástica; pegajosa; ocasional con inclusiones de Glauconita; no calcárea. La limolita que se presenta hacia la base de la unidad es predominantemente de color marrón oscuro, menor gris verdoso; moderadamente consolidada; blocosa; con inclusiones carbonosas y de Glauconita; no calcárea.

✓ Unidad T2 - Formación San Fernando

Desde 6674 pies hasta 6778 pies PM (6514 pies hasta 6601 pies PV)

Espesor aparente: 87 pies.

El tope de la Unidad T2 se determinó por la aparición de trazas arenisca parda con muy pobre manifestación de aceite, incremento de los gases de la cromatografía y correlación con pozos.

Castilla 55 y 58. Esta unidad está compuesta principalmente de arena en algunos niveles la arena es conglomerática, y aproximadamente desde 6760' se encuentran delgados niveles de lutita intercalados con niveles de arena. La arena es Cuarzosa, hialina, translúcida, subtranslúcida, grano conglomerático a muy grueso; angular, menor subangular, subesférico, local subelongado; regular a buena selección. Trazas a 60% de manchamiento de aceite, marrón oscuro; en parches; Fluorescencia natural: Trazas a 70%, amarillo opaco; Fluorescencia al corte: muy lento; débil; blanco lechoso; en corrientes; Fluorescencia residual: blanco lechoso muy pálido; Anillo residual: no visible. Manifestación de aceite pobre y alguna regular. La arenisca presenta las siguientes características: Cuarzosa, pardo oscura; grano soportada; blocosa; cemento silíceo; cuarzo, hialino, grano medio a grueso, local muy grueso; subangular, menor subredondeado, subesférico; regular a buena selección; 60% de manchamiento de aceite, marrón oscuro; en parches; Fluorescencia natural: 70% amarillo opaco; Fluorescencia al corte: muy lento; débil; blanco lechoso; en corrientes; Fluorescencia residual: blanco lechoso pálido; Anillo residual: no visible. Manifestación de aceite regular. La arcillolita que Predomina es color gris medio, local blanco; predomina blanda, local moderadamente firme; predomina amorfa, local blocosa; plástica; ocasional con inclusiones de cuarzo; con aspecto caolinitico; no calcárea. La lutita Predomina gris medio; moderadamente firme; subastillosa, laminar; local físil; local no calcárea.

✓ Unidad K1 - Guadalupe Superior

Desde 6778 pies hasta 7094 pies PM (6601 pies hasta 6862 pies PV).

Espesor aparente: 261 pies.

Tope de la formación Guadalupe superior K1 fue definido por la disminución en la cromatografía de gases, cambio litológico de areniscas con mancha miento a lutitas color marrón oscuro a negro y por correlación con el pozo Castilla 58, desde los 6778 pies hasta los 6920 pies aproximadamente, la unidad presenta niveles de lutita intercalados con capas de limolitas. A partir de 6920 pies la unidad se hace más arenosa tienden a desaparecer los niveles de lutitas, se presentan paquetes de arena intercalados con niveles de limolita y trazas de pirita. La lutita es predominantemente marrón oscuro a negro, menor gris medio; firme, local moderadamente firme; local subastillosa, local laminar; local físil; no calcárea. Las limolitas son de color marrón claro, menor gris medio, local gris claro a blanco; consolidada; blocosa; local gradando a arenisca de grano muy fino; no calcárea. Trazas de manchamiento marrón claro; 60% Fluorescencia natural: amarillo dorado,

fuerte; Fluorescencia al corte: muy lento, débil, en corrientes, blanco lechoso; Fluorescencia residual: blanco lechoso; Anillo residual: no visible. Manifestación de aceite muy pobre. La arenisca presenta las siguientes características: Cuarzosa, marrón claro debido al manchamiento de aceite, gris claro; grano soportada; blocosa; cemento silíceo; cuarzo, hialino, grano muy fino a fino; subredondeado, subesférico; regular a buena selección; 50% manchamiento de aceite, marrón oscuro; en parches; Fluorescencia natural: 60%, amarillo pálido; Fluorescencia al corte: rápido; blanco lechoso; en corrientes; Fluorescencia residual: blanco lechoso pálido; Anillo residual: no visible. Manifestación de aceite regular, alguna pobre. La arcillolita es de color gris medio, menor gris claro al blanco; predomina blanda, local moderadamente firme; predomina amorfa, local blocosa; plástica; pegajosa ocasional con inclusiones de cuarzo; no calcárea. Aparición de trazas de pirita

✓ Unidad K2 - Guadalupe Masivo

Desde 7094 hasta 8250 pies PM (6862 pies hasta 7758 pies PV)

Espesor aparente: 896 pies.

El tope de la Formación Guadalupe Masivo K2 se definió por la aparición de arena de grano grueso a muy grueso y angular, y por correlación con el pozo Castilla 58. Esta unidad en el techo presentó un nivel de arena con regular a buena manifestación de aceite, luego se encuentra un nivel de limolita de aproximadamente 30 pies de espesor; ya partir de 7150 pies la unidad se hace netamente arenosa hasta los 7410 pies donde aparece un nivel de arcillolitas marrones de aproximadamente 40 pies de espesor; desde 7460 pies y hasta 7900 pies se presenta un paquete de arena con esporádicas intercalaciones de arcillolita color blanco con aspecto caolinítico, la cual va incrementando hacia la base, y a partir de los 7900 pies aparece un 100% de arcillolita caolinítica masiva hasta 8060 pies, donde aparecen delgados niveles de metasedimentos debido a la transición de rocas sedimentarias a rocas metamórficas, los cuales se van incrementando hasta un 100%, a 8063 pies predominan meta sedimentos color rosado pálido, a 8150 pies predominan meta sedimentos color verde claro. La arenas del tope es cuarzosa, translúcida, hialina, ocasional blanca subtranslúcida; grano grueso a muy grueso, menor medio, ocasional fino; subredondeado, subesférico; regular a mala selección; con trazas de manchamiento de aceite pardo oscuro; Fluorescencia natural: amarillo pálido, tenue; Fluorescencia al corte: muy lento, débil, en corrientes, blanco lechoso; Fluorescencia residual: blanco lechoso; Anillo residual: no visible. Manifestación de aceite regular. La arena de la parte media y basal presenta las siguientes características: cuarzo, subtranslúcido, menor hialino, grano grueso a muy grueso, local medio; subredondeado, menor subangular; subesférico; regular a buena selección. Sin manifestación de aceite. Los metasedimentos son de color rosado pálido, menor blanco a gris claro; verde claro (clorita); blanda; blocosa; aspecto lustre micáceo (biotítica); local ligeramente con exfoliación. Raras trazas de cuarcita, gneis, esquistos

➤ **Basamento**

Desde 8250 pies hasta 8550 pies PM (7758 pies hasta 7964 pies PV)

Espesor Aparente: 206 pies.

Tope del Basamento se definió por la aparición de meta sedimentitas de color gris claro, blanco verdoso, menor verde pálido, con textura gneisica, alguna esquistosa y por correlación con el pozo Castilla 45.

El basamento está compuesto principalmente por metasedimentos; a 8480 pies aparecen filitas y abundante clorita; a 8500 pies aparecen cuarcitas. Los metasedimentos predominantemente son de color gris medio, gris claro, local púrpura claro, menor verde pálido; blando a moderadamente

firme; laminar, alguno blocoso; lustre micáceo (biotítica); alguno esquistoso, alguna con buena exfoliación; local con cristales minerales verdes (posiblemente clorita), ocasional calcárea.

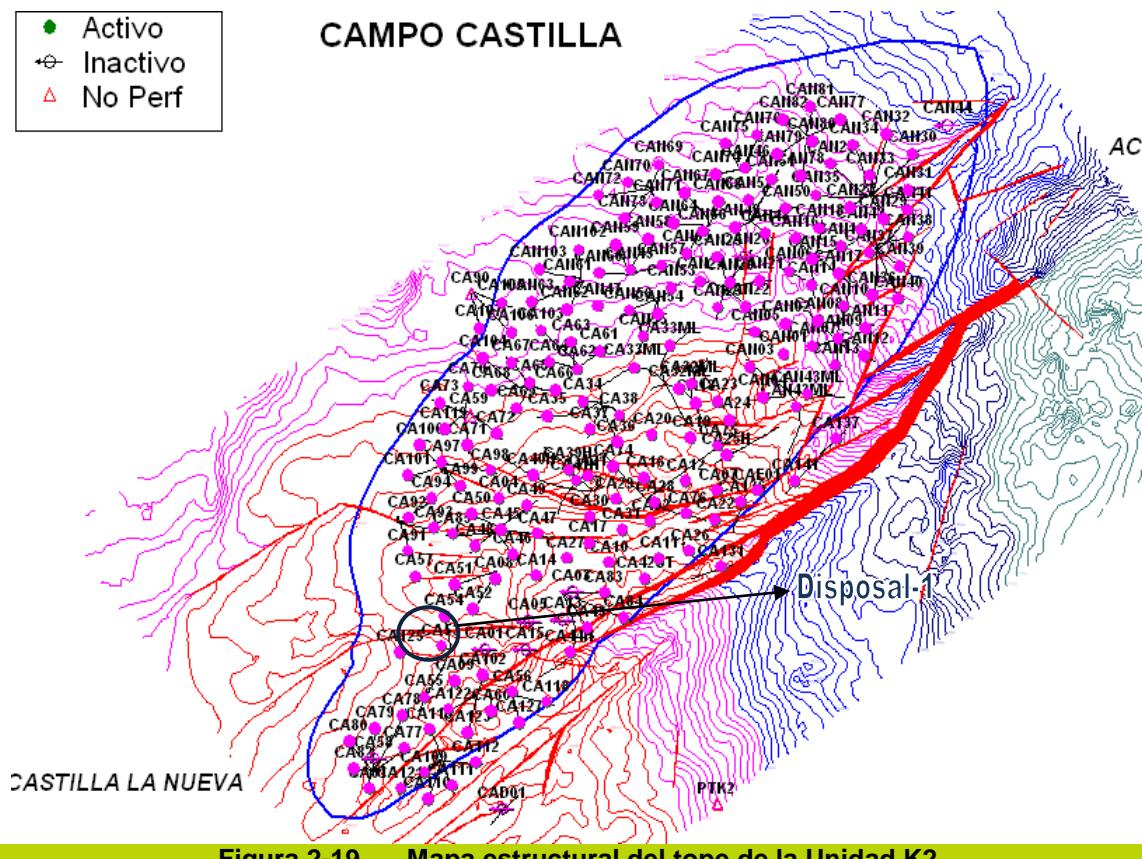
La cuarcita predomina subtranslúcida, translúcida, local amarillo subtranslucido, compuesta por granos de cuarzos entrecruzados, brillo vítreo, textura granoblástica, angulosa, se parte en fragmentos angulosos. Trazas de filitas de color gris oscuro a medio, de textura pizarrosa con superficie de foliación, presentan un lustre grafitoso, alguna con brillo sedoso.

### 2.1.3 Análisis calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas aledañas a pozos Inyectores

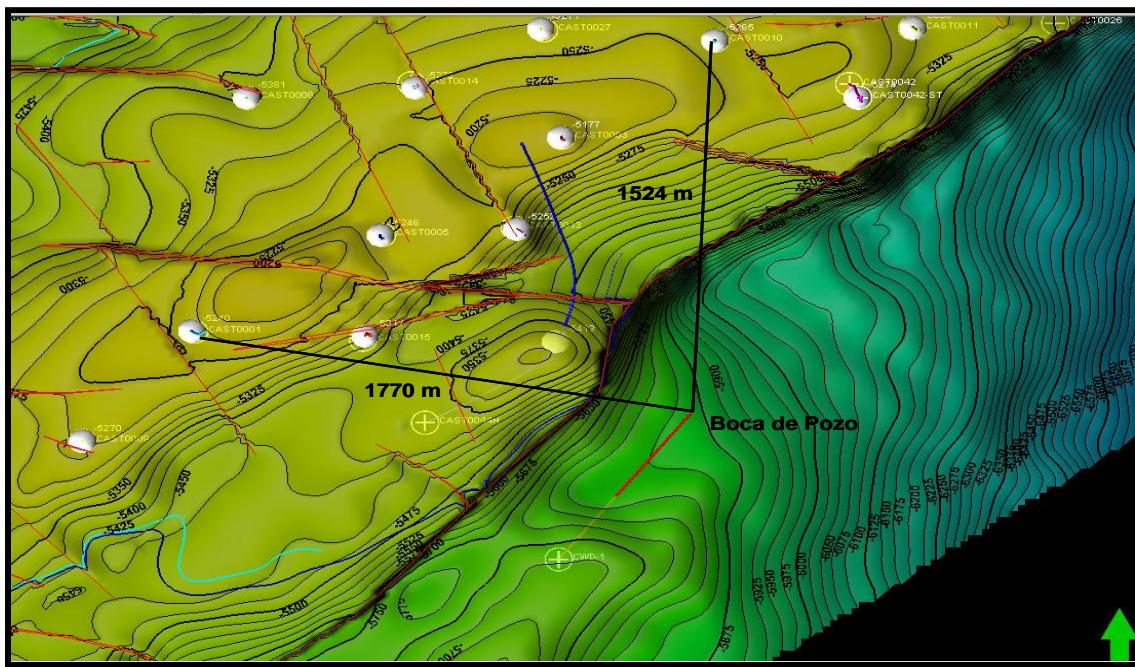
#### 2.1.3.1 Consideraciones técnicas a nivel estructural de la reinyección

##### 2.1.3.1.1 Correlación de la formación receptora con pozos aledaños

Los pozos Castilla 1, Castilla 15, Castilla 44H, Castilla 9 y Castilla 13 fueron correlacionados para confirmar la continuidad de las arenas de la unidad K2 y el probable contacto agua aceite, mostrando después de la falla. La correlación muestra buena continuidad de esta unidad hacia este sector. Su prognosis fue la de tener un espesor promedio de 300 pies, con alta incertidumbre debido a que no se tenía certeza que realmente exista al Este de la falla. En la **Figura 2-19** se presenta el mapa estructural al tope de la unidad K2, con la localización del pozo de reinyección 1 y los pozos aledaños (Ver **Figura 2-19** y **Figura 2-20**).



**Figura 2-19 Mapa estructural del tope de la Unidad K2**



**Figura 2-20 Correlación pozos aledaños**

#### 2.1.4 Características petrofísicas de las unidades geológicas

##### 2.1.4.1 Afectación de la formación receptora por el proceso de reinyección

###### 2.1.4.1.1 Pruebas de inyectividad

Ecopetrol el 09 de Octubre de 2011, realizo la prueba de inyectividad y el monitoreo en la Formación Guadalupe Masivo (K2), en el pozo de reinyección-1 disponiendo 80 KBPD (80.000 Barriles por día), con el objetivo de evaluar mediante el pozo de reinyección piloto la viabilidad de disponer 80 KBPD y optimizar la operación del campo. El **Anexo 2.11** se encuentra la Prueba de Inyectividad y monitoreo para el pozo de reinyección 1 Campo Castilla, correspondiente al informe técnico de reinyección, se da respuesta a los requerimientos del Ministerio del Auto 2315 de Julio de 2011, en cuanto a la comparación de la presión estimada de reinyección, arrojadas por las pruebas de inyectividad, con las características de la formación receptora y la justificación de la no afectación por la presión de reinyección.

###### 2.1.4.1.2 Historia pozo de Reinyección-1

El pozo de reinyección Castilla 1 fue perforado del 23 de diciembre de 2008 al 18 de enero de 2009 y fue completado del 19 de enero de 2009 al 28 de enero de 2009. Inicialmente fueron cañoneadas las arenas de la unidad K2 comprendidas entre 7.528 y 7.895 pies a las cuales se les realizó una prueba de inyectividad en la que se logró inyectar 24.000 BAPD a una presión en cabeza de pozo de 2.600 Psig. Los resultados de los registros de presión durante la prueba de inyectividad se muestran en la siguiente figura (Ver **Figura 2-21**).



**Figura 2-21 Registro de presión durante la prueba de inyección**  
 Fuente: Ecopetrol S.A., 2011

Luego se aisló la formación K2 con retenedor de cemento @ 7152 pies y se cañonearon las arenas de K1 a la cual se les realizaron pruebas de producción, dando como resultado 833BFPD con 96.88% BSW (Marzo 18 de 2009). En abril 15 de 2009 se aisló la formación K1 con retenedor de cemento @ 6740 pies y se cañoneó la formación T2, dando como resultado una producción de 773 BFPD con 94.53% BWS (Junio 18 de 2009). En noviembre 5 de 2010 se molieron los retenedores @ 7152 y 6740 pies, se cementaron las formaciones K1 y T2, se realizó cañoneo adicional y recañoneo la formación K2, un total de 556 pies con TCP STIMGUN. El pozo de reinyección 1 cuenta con los permisos del Ministerio de Minas y Energía (Radicado 2010056769 del 02 de Noviembre de 2010) y CORMACARENA (Resolución 2346 de 21 de Diciembre de 2010), que se presentan en el **Anexo 2.11**.

#### 2.1.4.1.3 Diseño de la prueba de inyectividad pozo de reinyección-1 - Octubre 09/2011:

La realización de la prueba de inyectabilidad se realizó teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- ✓ Ubicar en la localización el equipo de toma de registros.
- ✓ Revisar los equipos y el estado de las herramientas a utilizar durante la operación.
- ✓ Instalar las BOP y el lubricador en cabeza.
- ✓ Armar la sarta para correr las "DummyRun" hasta encontrar fondo.
- ✓ Armar la sarta de registro y bajar la sarta hasta 7.548' PMP a 100 ft/min de velocidad máxima, calibrar la herramienta para la toma de los datos de presión y temperatura a un dato por segundo durante toda la prueba. Realizar la prueba a una tasa de reinyección constante de 1,0 BPM, registrar presión y temperatura por 15 minutos de presión constante.
- ✓ Realizar el mismo procedimiento para tasas de reinyección de 1, 2, 5, 10, 20, 40 y 60 BPM durante 15 minutos de presión constante.
- ✓ Tomar registro de reinyección ILT a la profundidad establecida, a velocidades de 30, 60, 90 y 120 pies por minuto, subiendo y bajando a tasa de reinyección constante de 40 o 60 BPM.
- ✓ Ubicar la sarta de registro a la profundidad determinada para realizar el "Fall of Test", iniciando con una tasa de reinyección constante de 60 BPM, tomar los datos de presión y temperatura a un dato por segundo, registrar la PWF por 4 horas (o condición estable), luego parar la reinyección y cerrar la válvula, registrar la presión y temperatura hasta alcanzar una presión estática con una diferencia menor de 0,5 Psia.
- ✓ Sacar la sarta de registro y dejar el pozo en condiciones originales, realizar el desmontaje de la unidad de toma de registros.

El programa detallado de actividades realizadas durante las pruebas de reinyección, con los respectivos tiempos de duración de cada una, se resumen en la **Tabla 2-16**.

**Tabla 2-16 Registro de presión durante la prueba de reinyección**

OBJETIVO DEL TRABAJO:		REGISTRO ILT	
ACTIVIDAD 24 HORAS			
Hora inicio	Hora finalización	Duración	Descripción
06:00	06:00	00:00	Llegada del personal al pozo
06:00	07:30	01:30	Charla preoperacional PETROTIGER- WEATHERFORD
07:30	07:45	00:15	Retirando rejas pozo
07:45	08:30	00:45	Rig up equipo de presion
08:30	09:30	01:00	Arma sarta dummy
09:30	10:00	00:30	Prepara inyector de grasa de equipo de presion
10:00	10:30	00:30	Probando equipo de presion a 2400 psi
10:30	11:00	00:30	RIH Dummy @ 8200'
11:00	12:00	01:00	Dummy en superficie
12:00	13:00	01:00	Desarma dummy y arma sarta ILT
13:00	14:00	01:00	Baja ILT con 2 bar weight, XTU, CCL, PGR, PKJ, PRC, QPS, PRT, PRC, ILS Y CFJ, Nivel de fluido @ 1000'
14:00	15:00	01:00	Realizando estaciones 7548' pozo estatico e inyectando según programa WTF 1, 2, 10, 20, 40, 59 bls/min.
15:00	15:30	00:30	Realizando pasadas 30ftm subiendo desde 8020' a 7190, y 30ftm bajando desde 7550' a 8020, 60ftm, 90ftm y 120' subiendo y bajando desde 7900' a 7190.
15:30	16:30	01:00	Termina pasadas e inicia Fall of Test @ 7670'
16:30	17:00	00:30	Weatherford apaga bombas, registrando presion estatica con diferencia menor de 0.5 psi por minuto
17:00	18:30	01:30	Se considera presion estatica con diferencia menor de 0.5 psi por minuto
18:30	18:45	00:15	POOH herramienta ILT
18:45	20:30	01:45	Herramienta en superficie
20:30	21:00	00:30	Desarma herramienta y rig down
21:00	21:30	00:30	se deja pozo asegurado, personal saliendo de la locacion

Fuente: Ecopetrol S.A., 2011

#### 2.1.4.1.4 Conclusiones y recomendaciones prueba de reinyección - Octubre 09/2011.

En superficie fueron reinyectados 89.000 BWPD los cuales fueron tomados totalmente por el pozo de reinyección-1, según la interpretación del registro ILT de Octubre de 2011. Al @ 7548' antes de iniciar las pasadas del ILT se observa la estabilidad del pozo, parámetro principal para dar inicio al registro lo cual se ve reflejado en la calidad de la data.

El perfil general se realizó inicialmente subiendo a 30 ft/min frente a todos los intervalos cañoneados en la zona K2, pero debido a la capacidad de agua en superficie, se decidió realizar el resto de las pasadas frente a la zona de interés donde se observa el intervalo que toma la totalidad del agua inyectada en superficie. Adicionalmente en cuanto a los demás intervalos no se observan movimientos o cambios importantes en la pendiente de las señales de los caudalímetros o temperatura, al observar registro de rayos gamma no presentan indicios o taponamiento por finos.

La prueba de fall of test realizada después de las pasada confirma la estabilidad del pozo, puesto que la presión se mantuvo constante en 3580 Psi por lo que se decide apagar el pozo y esperar estabilización de nuevo para dar inicio a la prueba, donde se observó entre las 1.422 Hr y 2.265 Hr una estabilidad en la presión en 2697.83 Psi.

Se estableció un perfil de comparación entre los ILT's realizados al pozo, donde se enfrentan los resultados del ILT realizado el pasado Abril de 2011 con el último (actual) realizado en octubre de 2011, es este perfil se observa que el intervalo que toma la totalidad del agua inyectada en superficie es el mismo (7673' - 7726') sin importar la cantidad de Agua que se inyecte, en el ILT anterior se inyectaron 20600 BWPD y en el ILT actual se inyectaron 88000 BWPD los cuales en los dos casos fueron tomados en su totalidad por el mismo intervalo.

## 2.1.5 Caracterización de fluidos

La caracterización de los fluidos de producción de los Campos Castilla y Chichimene se incluyó dentro del programa de monitoreo realizado a los Campos de la Superintendencia de Operaciones Castilla – Chichimene y a los Campos de la Superintendencia de Operaciones Apiay, llevado a cabo entre el 25 de febrero y el 17 de octubre de 2011, con el objetivo de realizar la caracterización fisicoquímica del agua de formación y el análisis del crudo.

Se tomaron muestras de 17 pozos de los campos Castilla y Chichimene, repartidas en cuatro monitoreos realizados en Febrero, Marzo, Mayo y Agosto; se realizaron 14 análisis fisicoquímicos de aguas y 10 análisis de crudos. La **Tabla 2-17** resume los puntos muestreados y las muestras realizadas en cada uno de los puntos del Bloque.

**Tabla 2-17 Inventario de muestras**

FECHA DE MUESTREO	PUNTO DE MUESTREO	ANÁLISIS REALIZADO	
		AFQ Aguas	AFQ Crudos
01/03/2011	CN-13	X	
28/02/2011	CN-17	X	X
01/03/2011	CN-43	X	X
01/03/2011	CN-50	X	
19/03/2011	C-03	X	X
19/03/2011	C-08	X	X
19/03/2011	C-55	X	X
18/03/2011	C-57	X	X
19/03/2011	CH-01	X	X
20/03/2011	CH-02		X
20/03/2011	CH-03		X
19/03/2011	CH-14		X
20/08/2011	CH-47	X	
31/08/2011	CH-73	X	
21/08/2011	CH-113	X	
25/08/2011	CH-114	X	
20/08/2011	CH-135	X	

### 2.1.5.1 Caracterización de los fluidos de producción

Los resultados de salinidad, obtenidos, revelan que en general todas las muestras son aguas dulces o salobres, con valores equivalentes a NaCl entre 49 mg/L y 10580 mg/L. Las salinidades bajas, están asociadas a pozos cuya producción proviene de las arenas de K1 y K2, mientras que los valores más altos están relacionados con las aguas producidas de arenas de T2. Los resultados de índice de estabilidad muestran que las aguas analizadas de Castilla y Chichimene varían en su naturaleza respecto al carácter incrustante. La muestra de Chichimene-47 es la de mayor carácter corrosivo (-2.39) y la de Chichimene 73 (representativa de T2) es la más incrustante (+2.27).

La destilación simulada de los crudos de los Campos Castilla y Chichimene evidencia que las fracciones mayoritarias corresponden a destilados pesados y medios. La mayoría de las muestras de crudo contienen altos niveles de aromáticos y resinas. De igual manera se evidenció que los

crudos, según su gravedad API, se encuentran entre medianos, pesados y extra-pesados. Los crudos de Castilla son en general crudos pesados. La única muestra que corresponde a crudo mediano es la de Castilla-57. Los crudos de Chichimene son extra-pesados y únicamente el Chichimene-1 es pesado.

Las pruebas fueron realizadas por el Instituto Colombiano del Petróleo ICP-Ecopetrol S.A., el cual se encuentra certificado por el ICONTEC conforme a la norma NTC-ISO 9001:2000 mediante Certificado SC 5410-1 del 10 de Junio de 2008 y norma GP1000 con certificado GP-044-1, aplicada entre otras, a las actividades desarrolladas en los laboratorios de ensayo. El laboratorio de química de producción está acreditado por ONAC con acreditación código 09-052-003 del 16 de Febrero de 2010.

#### 2.1.5.2 Agua de formación

La caracterización fisicoquímica de los fluidos de formación de un campo es necesaria, entre otros, para establecer la línea base de salinidad de las formaciones y para el diagnóstico confiable de potenciales daños en los pozos y en las facilidades por formación de escamas o por acción corrosiva. Un buen diagnóstico es clave para diseñar estrategias de mejoramiento en la producción y/o en el tratamiento de fluidos en superficie.

A partir de la caracterización fisicoquímica a condiciones de pH y temperatura promedio del pozo, se evaluó el índice de estabilidad.

El índice de saturación (índice de estabilidad calculado mediante el método Langelier) predice, de manera general, el carácter incrustante o corrosivo del agua basado en su tendencia a formar carbonato de calcio. Si este valor es negativo, el agua tiende a ser corrosiva y si es positivo a ser incrustante, es decir, a formar incrustaciones de carbonato.

El escenario más favorable para la formación de escamas de tipo carbonato en los pozos productores se da cuando la presión se reduce, fenómeno que ocurre desde el fondo de pozo hasta superficie y en los puntos en los que adicional a la caída de presión, se conserva una temperatura alta. La precipitación de escamas de tipo carbonato como la calcita, se favorece por los incrementos de temperatura, el aumento del pH y por las caídas de presión que permiten la liberación de CO<sub>2</sub> disuelto que produce el desplazamiento del equilibrio químico de las especies en solución hacia la precipitación de carbonato.

Dentro de los análisis realizados *In situ*, se incluye la medición de pH, conductividad, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, Fe<sup>++</sup>, alcalinidad y se preservaron muestras para el análisis en laboratorio de los cationes de Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ba<sup>++</sup>, Sr<sup>++</sup>, Si<sup>+4</sup> y los aniones sulfatos y cloruros.

Los metales disueltos se analizaron por espectrometría de masas con plasma inducido (ICP-Masas). Para cuantificar Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>=</sup> se utilizó cromatografía iónica. En la determinación de gases disueltos se emplearon métodos colorimétricos. La alcalinidad se determinó por titulación potenciométrica. Otros equipos utilizados para el análisis fueron: pH-metros y conductivímetros. Se realizó también la caracterización fisicoquímica del crudo, la cual comprendió ensayos de destilación simulada, análisis SARA, API, viscosidad, contenido de agua, punto de nube y punto de fluidez.

El documento completo del Análisis Fisicoquímico de Aguas del STAP, puede encontrarse en el **Capítulo 2 Parte II**.

De la **Tabla 2-18** a la **Tabla 2-23** se resumen los resultados de los análisis fisicoquímicos de las aguas de formación de los pozos productores de campos Castilla - Chichimene.

**Tabla 2-18 Análisis fisicoquímico agua de formación pozos productores (1) – Feb/Mar 2011**

#	Fecha Muestreo	Punto	Form.	Na+ mg/L	K+ mg/L	Ca++ mg/L	Mg++ mg/L	Ba++ mg/L	Sr++ mg/L	Fe++ mg/L
1	28/02/2011	CN-17		76,0	13,7	14,5	1,6	0,5	0,5	0,3
2	01/03/2011	CN-50	K2	14,0	8,8	8,1	1,0	0,7	0,1	0,2
3	01/03/2011	CN-13		61,3	26,6	11,0	1,8	0,6	0,2	0,8
4	01/03/2011	CN-43	K2	282,8	24,4	31,5	4,8	1,5	1,6	0,4
5	18/03/2011	C-57	K1 Inf, K2	133,6	12,0	30,2	3,4	1,0	1,1	3,0
6	19/03/2011	C-08	K1 Inf, K2	184,5	16,6	38,5	4,8	0,8	1,3	7,0
7	19/03/2011	C-03	K1	689,7	44,3	135,5	13,9	1,4	6,5	6,0
8	19/03/2011	C-55	K1 Inf, K2	120,9	14,2	39,5	3,4	1,8	2,1	1,0
9	19/03/2011	CH-01	T2, K1	8,0	5,1	7,3	1,3	0,9	0,2	2,0

*Fuente: Ecopetrol S.A., 2011*
**Tabla 2-19 Análisis fisicoquímico agua de formación pozos productores (2) – Feb/Mar 2011**

#	Punto Muestreo	STD mg/L	L.S. @80°C	SiO2 mg/L	H2S mg/L	CO2 mg/L	HCO3- mg/L	CO3= mg/L	SO4= mg/L	Cl- mg/L
1	CN-17	379	0,27	61,8	ND	10	145	0,0	14,4	51
2	CN-50	162	-0,45	65,3	ND	< 10	53	0,0	1,0	9
3	CN-13	271	0,26	56,0	ND	40	23	7,5	10,6	72
4	CN-43	831	0,36	57,2	0,20	< 10	92	0,0	29,4	306
5	C-57	528	-0,46	56,9	ND	10	53	0,0	1,0	232
6	C-08	831	0,27	57,7	ND	11	183	0,0	15,8	321
7	C-03	2629	0,86	58,9	0,10	30	183	0,0	22,3	1468
8	C-55	539	0,07	57,4	ND	< 10	61	0,0	1,0	237
9	CH-01	135	-0,98	68,5	0,10	10	31	0,0	1,0	9

STD = Sólidos Totales Disueltos ND = No Detectado

*Fuente: Ecopetrol S.A., 2011*
**Tabla 2-20 Análisis fisicoquímico agua de formación pozos productores (3) – Feb/Mar 2011**

#	Punto Muestreo	pH/°C	O2 Dis. Ppb	Bact– BSR ufc/ml	Salinidad mg/L NaCl	Resist. Ωm@ 25°C	Conduc. mS/cm@25°C
1	CN-17	7,42 / 50,0	NR	NR	233	20,28	0,49
2	CN-50	7,39 / 32,8	NR	NR	64	53,19	0,19
3	CN-13	8,33 / 31,8	NR	NR	202	42,02	0,24
4	CN-43	7,24 / 39,2	NR	NR	720	7,23	1,38
5	C-57	6,81 / 18,3	NR	NR	447	12,05	0,83
6	C-08	6,90 / 19,3	NR	NR	663	8,58	1,17
7	C-03	6,94 / 20,5	NR	NR	2485	2,71	3,69
8	C-55	7,16 / 18,2	NR	NR	455	11,89	0,84
9	CH-01	7,14 / 18,7	NR	NR	49	86,21	0,12

NR = No Realizado

*Fuente: Ecopetrol S.A., 2011*

**Tabla 2-21 Análisis fisicoquímico agua de formación T2 pozos productores (1) – Ago. 2011**

#	Fecha Muestreo	Punto	Na+ mg/L	K+ mg/L	Ca++ mg/L	Mg++ mg/L	Ba++ mg/L	Sr++ mg/L	Fe++ mg/L	STD mg/L	SiO2 mg/L
1	20/08/2011	CH-47	49,0	14,2	12,7	2,6	1,5	0,3	8,3	279	64,0
2	20/08/2011	CH-135	1045,0	52,1	41,4	7,9	0,4	0,9	1,6	3935	58,0
3	21/08/2011	CH-113	430,0	35,5	24,6	3,9	0,3	0,5	40,6	1468	62,4
4	25/08/2011	CH-114	1049,0	79,6	48,5	10,6	0,3	0,9	1,9	3481	73,7
5	31/08/2011	CH-73	3358,0	201,9	353,1	100,0	1,9	8,9	0,8	10580	61,7

STD = Sólidos Totales Disueltos

Fuente: Ecopetrol S.A., 2011

**Tabla 2-22 Análisis fisicoquímico agua de formación T2 pozos productores (2) – Ago. 2011**

#	Punto	H2S mg/L	O2 Dis. Ppb	CO2 mg/L	HCO3- mg/L	CO3= mg/L	SO4= mg/L	Cl- mg/L	pH	T °C
1	CH-47	ND	NR	42	51	0,0	4,0	72	5,52	22,3
2	CH-135	ND	NR	70	2074	0,0	76,0	578	7,53	25
3	CH-113	ND	NR	350	480	0,0	78,0	312	6,52	23,5
4	CH-114	ND	NR	NR	1153	18,0	106,0	940	8,31	22
5	CH-73	ND	NR	NR	550	0,0	140,0	5803	7,88	22,6

NR = No Realizado

Fuente: Ecopetrol S.A., 2011

**Tabla 2-23 Análisis fisicoquímicos agua de formación T2 pozos productores (3) – Ago. 2011**

#	Punto	Formiato mg/L	Turbidez NTU	Salinidad mg/L NaCl	Resist. Ωm@ 25°C	Conduc. mS/cm@25°C	L.S. @60°C
1	CH-47	NA	NA	187	17,30	0,58	-2,39
2	CH-135	NA	NA	2384	2,48	4,03	1,74
3	CH-113	NA	NA	1061	3,97	2,52	-0,13
4	CH-114	NA	NA	2595	2,20	4,55	2,34
5	CH-73	NA	NA	10230	0,56	18,00	2,27

NA = No Aplica

Fuente: Ecopetrol S.A., 2011

Los resultados de salinidad muestran que en general todas las muestras son aguas dulces o salobres, con valores equivalentes a NaCl entre 49 mg/L y 10580 mg/L y corresponden a los pozos Chichimene-01 y Chichimene-73, respectivamente. Las salinidades bajas, están asociadas a pozos cuya producción proviene de las arenas de K1 y K2, mientras que los valores más altos están relacionados con las aguas producidas de arenas de T2.

Los resultados de índice de estabilidad muestran que las aguas analizadas de Castilla y Chichimene varían en su naturaleza respecto al carácter incrustante. La muestra de Chichimene-47 es la de mayor carácter corrosivo (-2.39) y la de Chichimene 73 (T2) es la más incrustante (+2.27).

De la **Tabla 2-24** a la **Tabla 2-26** se resumen los resultados de los análisis de caracterización aplicados a las muestras de crudo tomadas de los pozos productores del Campo Castilla - Chichimene.

**Tabla 2-24 Caracterización del crudo Campos Castilla y Castilla Norte 2011**

Parámetro	Unid.	Punto	CN-17	C-57	CN-43	C-3	C-8	C-55
		Muestreo	16/05/2011	16/05/2011	22/06/2011	22/06/2011	22/06/2011	16/05/2011
		Análisis	28/02/2011	28/02/2011	28/02/2011	19/03/2011	19/03/2011	19/03/2011
Densidad @ 15°C	g/mL	0,9953	0,8888	0,9899	0,9709	0,9822	0,9848	
Gravedad API	°API	10,6	27,6	11,3	14,1	12,5	12,1	
Peso Molecular Prom.	g/mol	631	Pendiente	526	537	538	576	
Viscosidad T=40°C@100s-1	cP	6559	10,5	5363	820	2322	2308	
Viscosidad T=60°C@100s-1	cP	1175	6,19	973	227	491	554	
Viscosidad T=80°C@100s-1	cP	365	4,17	270	86	147	188	
<b>Análisis SARA</b>								
Saturados	% Peso	17,04	24,98	12,97	17,51	18,24	21,05	
Aromáticos	% Peso	30,34	38,93	28,03	26,26	23,04	35,08	
Resinas	% Peso	36,57	32,18	42,67	41,82	43,45	32,07	
Asfaltenos	% Peso	16,05	3,91	16,34	14,42	15,27	11,81	
EIC	NA	0,49	0,041	0,41	0,47	0,50	0,49	

*Fuente: Ecopetrol S.A., 2011*

La destilación simulada de los crudos de Castilla y Chichimene evidencia que las fracciones mayoritarias corresponden a destilados pesados y medios, mientras que el análisis de crudo arrojó que la mayoría de las muestras contienen altos niveles de aromáticos y resinas. De igual manera se evidenció que se encuentran crudos medianos, crudos pesados y crudos extra-pesados. Los crudos del Campo Castilla son en general crudos pesados. La única muestra que corresponde a crudo mediano es la de Castilla-57. Los crudos del Campo Chichimene corresponden a crudos extra-pesados y el Chichimene-1 es pesado.

**Tabla 2-25 Caracterización de crudo de Chichimene y Chichimene SW en 2011**

Parámetro	Unid.	Punto	CH-1	CH-14	CH-2	CH-3
		F. Muestreo	16/05/2011	16/05/2011	22/06/2011	22/06/2011
		F. Análisis	19/03/2011	19/03/2011	20/03/2011	20/03/2011
Densidad @ 15°C	g/mL	0,9555	Pendiente	1,02	1,0188	
Gravedad API	°API	16,5	Pendiente	7,6	7,3	
Peso Molecular Prom.	g/mol	520	654	594	606	
Viscosidad T=40°C @100s-1	cP	210	60600	91692	104093	
Viscosidad T=60°C @100s-1	cP	71	7439	9990	11201	
Viscosidad T=80°C @100s-1	cP	32	1303	2078	2221	
<b>Análisis SARA</b>						
Saturados	% Peso	12,32	18,44	13,35	13,40	
Aromáticos	% Peso	24,29	31,80	27,10	27,99	
Resinas	% Peso	48,21	35,03	42,07	42,58	
Asfaltenos	% Peso	15,18	14,73	17,48	16,03	
EIC	NA	0,38	0,50	0,45	0,42	

*Fuente: Ecopetrol S.A., 2011*

**Tabla 2-26 Cortes de destilación simulada de crudos Campos Castilla y Chichimene 2011**

Rango / Corte	% Volumen									
	CN-17	C-57	CN-43	C-3	C-8	CH-1	C-55	CH-14	CH-2	CH-3
Fecha Muestreo	28/02/11	28/02/11	28/02/11	18/03/11	19/03/11	19/03/11	19/03/11	19/03/11	20/03/11	20/03/11
IBP-60°C Nafta 1	0	1,3	0	0,4	0,2	0	0	0	0	0
60-107°C Nafta 2	1,1	4,2	1,2	2,1	1,5	1,2	1,3	0,4	0,4	0,3
107-152°C Nafta 3	1,4	6,1	1,8	2,4	1,9	2,3	1,9	0,6	0,6	0,5
152-199°C Nafta 4	1,8	7	2	2,8	2,3	3,3	2,3	0,7	0,7	0,7
199-249°C Kero	3,2	7,9	3,5	4,2	3,8	5,6	3,8	2	2	2
249-315°C ACPM Liviano	7,6	12,9	8,1	9,5	8,7	12,2	8,6	5,8	5,7	5,8
315-371°C ACPM Pesado	8,4	10,7	8,5	9,4	9,1	11,5	9	7,6	7,3	7,4
371-427°C Dest. Liviano	9,2	10,3	9,2	9,9	9,9	11,2	9,8	9	8,6	8,8
427-482°C Dest. Medio	9,5	9,9	9,3	9,9	10,1	10,5	10	9,6	9,2	9,4
482-565°C Dest. Pesado	12,5	12,5	11,3	12,4	13,1	11,9	12	13,1	12,3	12,8
565°C-FBP Fondo Vacío	44,6	16,5	44,6	36,3	38,8	29,7	40,6	50,6	52,6	51,6
% Recuperado	55,4	83,5	55,4	63,7	61,2	70,3	59,4	49,4	47,4	48,4

*Fuente: Ecopetrol S.A., 2011*

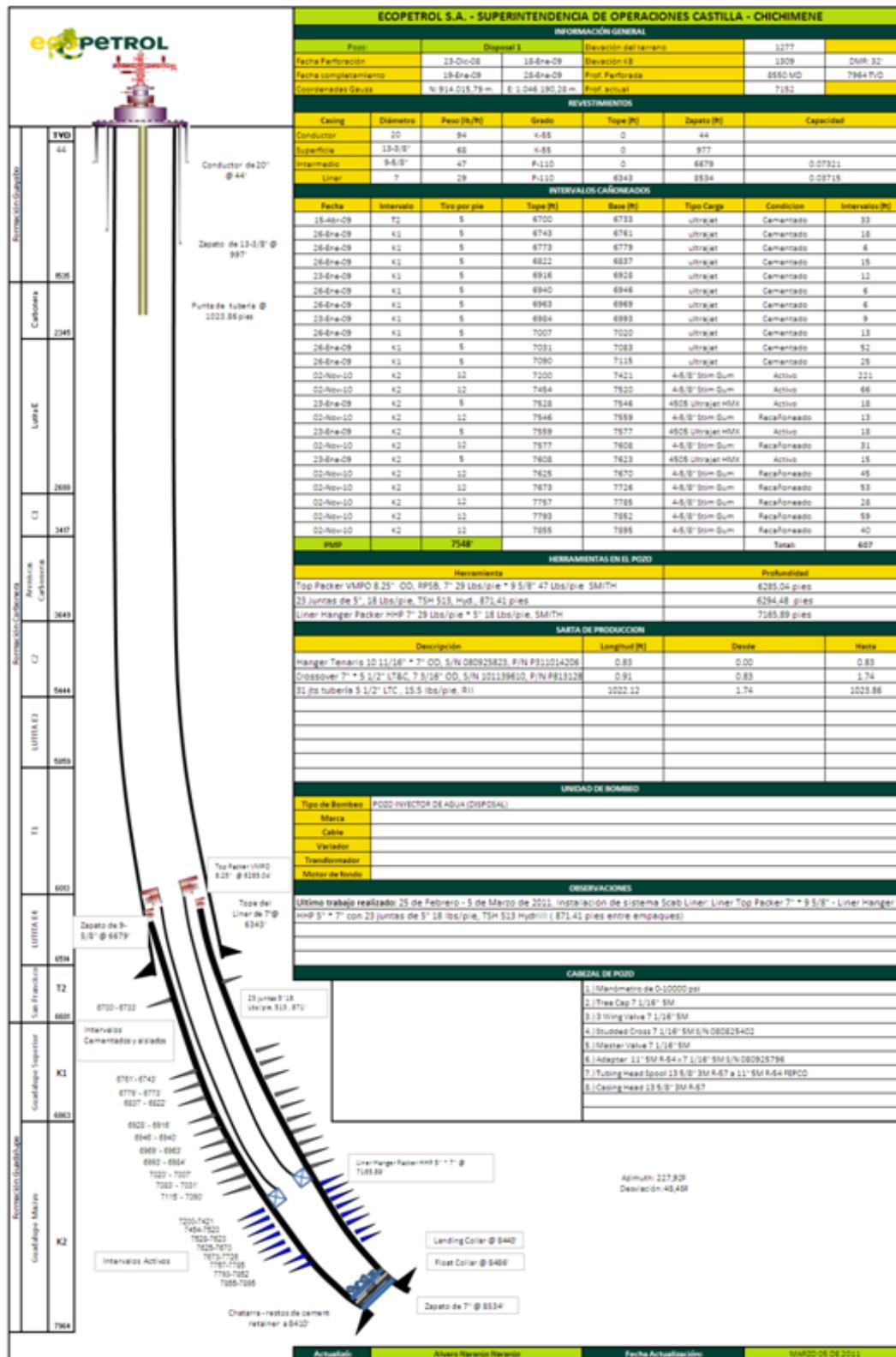
### 2.1.6 Sistema tratamiento previo al vertimiento

A continuación se presenta una breve descripción del proceso previo al vertimiento de agua al pozo de reinyección. Este procedimiento corresponde al tratamiento del agua al interior de las Estaciones y se presenta con mayor detalle en el **Estación Castilla 2 – STAP – Estación Castilla 2** de la Parte II del Capítulo 2.

La Estación Castilla 2 cuenta con tres sistemas de tratamiento de agua de producción (STAP) de las cuales dos son estáticos y un portátil. A este punto llegan los afluentes de los tanques de surgencia y lavado, instalados al interior de la misma Estación. Estas unidades cuentan con celdas de placas corrugadas (CPI) en las cuales se lleva a cabo la separación de agua, crudo y sólidos, posteriormente se inyecta floculante y coagulante y se lleva el fluido a las celdas de flotación, donde mediante procesos mecánicos de aireación se realiza la separación de lodos y agua. Una parte del agua resultante de este proceso se dispondrá en el pozo de reinyección 1. Luego que el agua sale de las celdas de flotación, pasa por filtros de cascara de nuez con el fin de remover los sólidos aún presentes en la corriente, dejándola en condiciones de reinyección.

### 2.1.7 Estado mecánico de los pozos inyectores

En la **Figura 2-22** se presenta el estado mecánico y los mecanismos de aislamiento del pozo de reinyección-1, que será tomado como diseño tipo para los demás pozos inyectores a perforar en el Campo Castilla – Chichimene (Ver **Anexo 2.11**).



**Figura 2-22 Estado mecánico y mecanismos de aislamiento del pozo de reinyección 1**

Fuente: Ecopetrol S.A., 2011

## 2.1.8 Sistema de inyección

De acuerdo a las necesidades de reinyección previstas, se implementará un sistema de reinyección de agua para realizar el vertimiento de aguas formacionales por este medio, En el **Estación Castilla 2 – STAP – Estación Castilla 2** de la Parte II del Capítulo 2, se muestra el esquema de infraestructura actualmente instalada en la Estación Castilla-2, donde se integra la Estación de Trasferencia y el módulo de Tratamiento y Bombeo.

El agua producto de la filtración se toma de los cabezales de 30" que transportan el agua desde los filtros a las torres de enfriamiento y se envía por una tubería de 16" hasta el pozo de reinyección ubicado en las coordenadas E: 1046188 N: 914015, con la ayuda de las bombas booster AP 7241A/B, actualmente se están inyectando aproximadamente 54.000 BWPD

Para que el sistema opere correctamente es necesario que trabajen mínimo tres filtros con una presión promedio entre ellos de 15 psi, de lo contrario el sistema no funciona adecuadamente y la bomba Booster se apagara por baja presión de succión. Previo al envío del fluido hasta pozo de reinyección se debe hacer una adición de los siguientes químicos:

- ✓ Inhibidor de incrustaciones
- ✓ Biocida
- ✓ Secuestrante de oxígeno
- ✓ Inhibidor de corrosión<sup>1</sup>



**Figura 2-23 Sistema de inyección a pozo de inyección 1 , EC2**

### ➤ Filtros de cáscara de nuez

Son unidades de adsorción. La cáscara de nuez tiene la capacidad de adsorber aceites, reteniendo de esta forma parte de las sustancias que no fueron retiradas en las operaciones anteriores. Este sistema cuenta con una unidad de retrolavado para mantener los niveles de eficiencia. El agua residual ya tratada es conducida de este equipo a un tanque de almacenamiento, para ser posteriormente bombeada hasta el pozo inyector.

#### 2.1.8.1 Clúster y línea de reinyección

Las líneas de reinyección tendrán un cabezal común y luego serán enviados a los pozos de inyección ubicados en los Clúster de Reinyección 1, 3 y 4 del Campo Castilla. Se planea construir 3 líneas de 24" de aprox. 5.6 km al clúster 2.9 km al clúster 3 y 5.4 km al clúster 4. En cuanto a la presión de reinyección de 1700 psig en cabeza de pozo. Esta línea deberá construirse preferiblemente conservando los derechos de vía existente como es el caso del clúster-1 de

<sup>1</sup> Procedimiento arranque sistema Castilla Disposal. Abril de 2011

Inyección y sujetos a la zonificación de manejo del campo. En el Anexo 2.11, se presentan los prediseños de la ampliación de éste clúster y la construcción de los clúster de reinyección 3 y 4. Adicionalmente se presenta el prediseño del trazado tentativo de las líneas de flujo que alimentaran a los pozos de reinyección.

## 2.1.9 Programa de pruebas de integridad del sistema de reinyección

### 2.1.9.1 Criterios para las pruebas de integridad

Desde el punto de vista de diseño; todos los elementos que constituyen el sistema de reinyección de agua son especificados, seleccionados y diseñados para que operen de manera segura y sin fallas durante la etapa del proyecto o hasta un escenario de 15 años aproximadamente.

A continuación se dan las principales características de diseño de los diferentes componentes del sistema para cumplir con tal fin.

- ✓ Los equipos de bombeo diseñados; son apropiados para un manejo seguro confiable y económicamente idóneos; teniendo como principales variables de operación, la presión, temperatura y caudal del fluido a inyectar.
- ✓ Los sistemas de tubería y soportes de los mismos, se diseñan bajo Normas y códigos que implícitamente contienen los parámetros de materiales de construcción, tipos de juntas, análisis de esfuerzos, sistemas de recubrimientos, pruebas y tipos de soportes, que garantizan la segura operación de los mismos.
- ✓ De igual forma los diseños de obras civiles (estructuras de cimentación para equipos y tuberías) se basan en las normas de diseño y construcción sismo resistentes definidas para el país.
- ✓ Dentro del sistema de supervisión y control para los equipos de reinyección se contemplan la supervisión y control, (parámetros , presión, temperatura y flujo) tanto para operación normal; como en un evento de falla o rotura del sistema; en tal evento genera que todo el sistema deje de operar evitando así posibles derrames de agua.
- ✓ El sistema de reinyección lleva en su diseño un monitoreo con señal a la consola del operador del flujo manejado, para deducir si hay variaciones bruscas que puedan significar una rotura en la tubería.
- ✓ Igualmente debe haber un monitoreo de la presión del sistema, tanto en la descarga de las bombas principales como en cabeza de los pozos inyectores, con el fin de detectar a tiempo problemas de cierre erróneo de válvulas, taponamiento de los pozos inyectores y rotura de los tubos.
- ✓ Existirán alarmas por baja y alta presión en los puntos clave del sistema
- ✓ Existirán interlocks para activar cortes ó Shutdown del sistema de bombeo si llega a valores de muy alta o muy baja presión o flujo. Esto con el fin de evitar o prevenir vertimientos de agua y también para proteger los equipos de bombeo.

### 2.1.9.2 Pruebas de integridad mecánica y periódica

El programa propuesto para la supervisión de las operaciones de reinyección en este sitio se centra en los pozos de reinyección. Ningún programa de monitoreo garantiza centrarse específicamente en la investigación del contenido a inyectar a través de pozos de monitoreo, según las condiciones específicas del sitio, ni es una propuesta. Una variedad de datos serán colectados para monitorear las operaciones de pozos de reinyección. Este seguimiento se llevará a cabo a través de la utilización de ambas técnicas: periódicas y continuas.

El control periódico se va a realizar para cumplir los requisitos de integridad mecánica. La prueba anual, que incluye monitoreo de reservorio y pruebas de presión del anillo, se llevará a cabo una vez cada año calendario,

➤ **Reunión de seguridad del sitio de pozo**

Antes del comienzo de las actividades de campo, se realizarán reuniones de seguridad con los contratistas y personal involucrados con los servicios de campo y pruebas. Se debe asegurar que todos los procedimientos de seguridad se entienden y revisar los días de trabajo en las actividades.

➤ **Efectuar prueba de presión de reservorio (Fall-Off o estática)**

- ✓ Las pruebas de presión Fall-Off, corresponden al registro de datos referentes a las pruebas de reinyección de pozo, en condiciones típicas de operación (velocidad constante). La Velocidad, la temperatura y la consistencia del fluido se registrarán durante el período de reinyección. El volumen inyectado acumulado también debe registrarse. Se continúa la reinyección por un mínimo de aproximadamente 2 a 6 horas. Se debe tener en cuenta que la variación significativa en la velocidad puede producir información de pobre calidad o requerir técnicas de análisis más complicadas.
- ✓ Medida y corrida de la presión Rig-Up en el pozo, a una profundidad aprobada por la autoridad ambiental, coherente con las mediciones históricas.
- ✓ Para la presión transitoria Fall-Off, se obtiene la presión final de reinyección estabilizada, por un mínimo de 1 hora. Asegurarse de que las lecturas de las medidas de temperatura se hayan estabilizado.
- ✓ Despues de que las mediciones de los registros estén estables, parar la reinyección y el monitoreo de presión Fall-Off. Continuar con el monitoreo de presión para un mínimo de 6 horas hasta que una observación válida de la curva Fall-Off sea observada. Para el estudio estático el pozo deberá estar Shut-in por un mínimo de 24 horas antes de la prueba. Los datos estáticos se recogerán mediante el uso de medidor es de fondo de pozo, a una profundidad aprobada de conformidad con las medidas anteriores aprobadas por la autoridad ambiental.
- ✓ Parar la adquisición de datos de la prueba, rig-downy liberar el equipo.

➤ **Prueba de presión de anillo**

- ✓ Estabilizar la presión y la temperatura de pozo.
- ✓ En la práctica, se harán arreglos para que un representante de la autoridad ambiental pueda presenciar esta prueba.
- ✓ Presurizar el anillo con un mínimo de 100 psi con líquido y cierre de la válvula. Instalar el medidor certificado en la válvula tipo "purga". El anillo puede necesitar ser presurizado y descargar varias veces para asegurar la ausencia de aire. Supervisar y registrar la presión durante una hora. La presión no puede fluctuar más de un 10 por ciento durante la prueba de una hora. Al término de la prueba, bajar la presión del anillo a la presión normal de funcionamiento.
- ✓ Para la demostración de la integridad mecánica cada 5 años se llevará a cabo a través de uno o varios métodos de prueba aprobados, tales como registro de temperatura, o registro de ruido, o registro de activación de oxígeno. La compañía operadora dará aviso a la autoridad ambiental a cerca de la prueba, para que dicho organismo pueda ser testigo de las actividades de recolección de información. Aunque la operadora puede utilizar cualquier método aceptable para la autoridad ambiental, a través de procedimiento de homologación, en este momento se propone que la temperatura de registro se utilice para futuras pruebas de integridad mecánica. El registro de la temperatura diferencial se llevará a cabo de la siguiente manera:
  - Ejecución del registro de temperatura diferencial.

- o Shut-in del pozo para estabilización (mínimo de 24 horas), antes de ejecutar el registro base de temperatura.
- o Registrar temperatura Rig-up y correr el registro base de aproximadamente 500 pies, por encima de la zona de reinyección, hasta la profundidad total.
- o Halarla herramienta a la superficie y cerrar la válvula principal.
- o Bajar el equipo de perforación y regresar el pozo a las operaciones normales.

#### 2.1.9.3 Aislamiento de los horizontes de reinyección

La integridad del pozo (sub-surface) y el aislamiento de los horizontes se logra con:

- ✓ La selección del revestimiento apropiado para las condiciones de presión y temperatura
- ✓ Cementación desde fondo hasta superficie, aislando cualquier fuente de agua fresca y contemplando condiciones de temperatura.
- ✓ Cañoneo de la zona de reinyección (manteniendo cementado y aislado las zonas de aguas frescas y zonas de no interés para la reinyección).

#### 2.1.9.4 Medidas de contingencia en caso de falla del sistema de reinyección

Las medidas de contingencias para la actividad de reinyección, se contempla en el capítulo 9. Plan de contingencias – PDC del presente estudio.

### 2.1.10 Abandono de los pozos de reinyección

Cuando los pozos deban abandonarse en forma definitiva, ya sea por finalización del contrato o por haber alcanzado el límite de tiempo de reinyección, será necesario abandonar adecuadamente los pozos, siguiendo los lineamientos formulados en la reglamentación nacional vigente y cumpliendo con los estándares nacionales usados en la industria del petróleo y gas.

En primer lugar, para la colocación de los tapones de cemento en los pozos, deberá ser necesario que se traslade a la locación el equipo necesario para proceder a la operación, debiéndose aislar las zonas perforadas en el pozo con la colocación de tapones mecánicos y posteriormente con tapones de cemento.

Generalmente se requieren tres (3) tapones de cemento para sellar el pozo, uno encima del último intervalo abierto, un segundo al medio y un tercero en superficie.

Las tuberías de revestimiento existentes en el pozo que fueron cementadas hasta superficie, pueden dejarse en su lugar retirándose toda instalación de superficie y dejando solamente una marca para identificar la posición del pozo.

En segundo lugar, se desmontará toda instalación de reinyección en superficie y retirará todo material ajeno al lugar por sobre el nivel de la locación. Esta deberá rehabilitarse tan cerca como sea razonablemente posible a su estado original. Para este propósito se realizará la revegetalización y reforestación del área a abandonar, utilizando especies forestales propias de la zona. Esto permitirá la estabilización de las medidas estructurales de control de erosión conformando un sistema estable, de acuerdo a indicadores físicos y biológicos.

➤ **Conclusiones**

- ✓ A pesar de la limitada información con la que se contó para la elaboración de los modelos matemáticos por la falta de un número mayor de pozos para la calibración, se puede evidenciar con los resultados que arrojan la simulación que estos se ajustan razonablemente a las condiciones reales del sistema.
- ✓ Para el caso de la disposición en la formación K2 y K1, se tuvo en cuenta tres (3) clúster de reinyección con quince (15) pozos inyectores en total y con estas condiciones se puede realizar una reinyección de hasta 1.200.000 BAPD con 15 pozos reinyectores con una taza de reinyección (12.800 m<sup>3</sup>/día) por pozo.
- ✓ Teniendo en cuenta los escenarios modelados no se encuentran efectos de la reinyección en los acuíferos profundos, sobre los acuíferos someros y las unidades sello Lutitas E4, E3 y niveles arcillosos del C2 de la formación Carbonera actúan como sello hidráulico confinan la reinyección en los niveles K1, K2.
- ✓ Es importante resaltar que nunca se alcanza la presión de fractura calculada a partir del peso del lodo en la columna de los pozos perforados en el campo Castilla y Chichimene. La presión de fractura que se determinó fue del orden de 4.500 psi tomando como gradiente de fractura 0.6 psi/pie. La presión máxima en las simulaciones no se elevó por encima de los 2603 psi valores muy debajo del gradiente de fractura y de la presión de reinyección de 3590 psi medida en las pruebas de inyectividad de la formación K2 a la tasa máxima de reinyección de 80.000 BPD.
- ✓ Para un mejor ajuste de los modelos se recomienda realizar una calibración después de dos años de reinyección, para observar el ajuste de los datos de predicción con los medidos en el proyecto de reinyección
- ✓ De acuerdo con los resultados obtenidos en los modelos la única posibilidad de migración de las aguas reinyección a los acuíferos superficiales se puede presentar por una falla de la cementación del revestimiento de los pozos utilizados para la reinyección, para asegurarse que esto no ocurra se debe asegurar la integridad de la cementación mediante un registro CBL y en caso que se presenten fallas de la cementación, se debe realizar un cementación correctiva con el fin de garantizar el aislamiento y con esto corregir la única posibilidad de migración de las aguas reinyección por los anulares del pozo.
- ✓ Se recomienda realizar pruebas de sello de los empaques de aislamiento que se utilicen para aislar las unidades sometidas a reinyección con el fin de garantizar que no presenten fugas que permitan la reinyección a los intervalos superiores.
- ✓ Se recomienda cañonear los intervalos de la unidad que sean utilizados para la reinyección con el fin de disminuir las presiones de reinyección generadas por el daño de formación producido con la invasión del lodo durante la perforación de los pozos.
- ✓ Por presentar efectos de la reinyección, solo sobre las unidades profundas, no se hace necesario el monitoreo de los acuíferos superiores. En caso que se presente fallas del revestimiento o de la cementación se recomienda realizar el monitoreo de las puntos de agua subterránea en 1 km alrededor del pozo inyector y comparar los resultados obtenidos con los obtenidos del monitoreo de línea base del área de influencia. En caso detectar anomalías se debe suspender la reinyección en el pozo hasta lograr reparar el posible a aislar en punto en donde se presenta la fuga de las aguas de reinyección.
- ✓ En el caso que se requiera tener un pozo de monitoreo sobre las aguas subterráneas someras, se recomienda ubicar este sobre el clúster de reinyección en la dirección de flujo del agua subterránea, el piezómetro puede ser perforado hasta los 8 metros con lo que se asegurar captar el primer horizonte saturado en cualquier época del año, como se explicó anteriormente la única posibilidad remota de afectación del primer horizonte está dada por daño en la cementación que permita migración del agua de reinyección por el anular del pozo y la cementación del revestimiento en mal estado.
- ✓ Toda la información para alimentar el modelo se obtuvo de datos y cálculos realizados a partir de información primaria de las pruebas de inyectividad de la formación y los datos petrofísica de las unidades las profundas del modelo. Para los primeros horizontes los datos de

propiedades hidráulicas fueron tomados de pruebas de bombeo realizadas sobre estos horizontes.

- ✓ La información de la unidades en profundidad es limitada razón, por la cual se recomiendan que cuando se perforen nuevos pozos la información de estos se utilizada para mejorar el modelo y se puede complementar y mejorar su ajuste con los nuevos datos reales medidos.
- ✓ Los datos de la simulación evaluaron los diferentes escenarios de simulación entre los cuales se evaluó para la formación K1 y K2 un caudal de reinyección requerido por Ecopetrol S.A., inicial 40.000 BAPD (6.400 m<sup>3</sup>/d) por pozo para un total de 600.000 BAPD, después de observar buenos resultados se evaluaron tasas de reinyección de 60.000 BAPD (9.600 m<sup>3</sup>/día) y 80.000 BAPD (12.800 m<sup>3</sup>/día) por pozo, alcanzando una tasa máxima de reinyección de 1.200.000 BAPD en los tres (3) de clúster de reinyección con los 15 pozos. Los datos de incremento de la presión a los 20 años no muestran incrementos superiores a los 1.8 metros o 2.7 psi en las arenas sometidas a la reinyección.
- ✓ Los resultados de la simulación para unidad K2 a 80.000 BAPD/Pozo evidencian un incremento de la presión de 2.7 PSI después de alcanzar condiciones estacionarias. El incremento de presión es homogéneo para los 15 pozos propuestos los cuales se encuentran ubicados a una distancia de 250 metros entre sí y 60 grados, formando un rombo alrededor del Clúster. Las condiciones de presión para los escenarios de 40.000 BAPD/pozo y 60.000 BAPD/pozo generan incrementos de presión bajos marcando la misma tendencia que el último escenario.
- ✓ Para el caso de los pozos de reinyección se evaluó un escenario final en donde se consideraron tres Clúster de reinyección ubicados al Este de la falla de cierre del campo castilla ubicados un (1) kilómetro de distancia de cada clúster propuesto por Ecopetrol S.A., esto con el fin de evaluar un posible incremento en la reinyección, teniendo en cuenta la posibilidad de inyectar un caudal mayor al estimado para el primer clúster propuesto. El incremento de reinyección se presenta de forma localizada como un espejo a las condiciones iniciales evaluadas en el primer clúster de reinyección y mostrando condiciones muy similares a las observadas en el primer clúster.
- ✓ Se recomienda que una vez se perfore el siguiente pozo inyector y se realicen las respectivas pruebas de inyectividad, además de la determinación de las características de permeabilidad y porosidad del sector sobre la unidad areniscas K2 y T2, con estos datos se debe ajustar los datos de entrada de los modelos, los cuales fueron determinados a partir de información obtenida únicamente con los datos de los pozos inyectores 1, 2 y Chichimene 5, que deben ser verificados con datos adicionales de las unidades que reciben la reinyección.
- ✓ Para las próximas pruebas de inyectividad se recomienda realizar al menos una hasta alcanzar el cambio de pendiente en la curva presión vs caudal, para poder alcanzar el punto de inflexión de donde se puede obtener la presión de fractura real de la formación K2. Ya que este valor se calculó de forma indirecta lo que puede inferir en una presión de fractura sobre estimada con la real y para un mejor aseguramiento se recomienda calcular el valor real y tener este valor como máximo para la presión de reinyección de la formación durante el proyecto y evitar con esto generar fracturas que puedan canalizar fluidos inyectados a las unidades superiores.
- ✓ Teniendo en cuenta la caracterización Geoquímica de las aguas de formación K1 y K2 y que estas son compatibles se recomienda mantener así el carácter de aguas de baja salinidad de las aguas de la formación K1 y K2 que son dulces y pueden ser vertidas con las aguas superficiales por su más bajo contenido de los iones Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>. Las aguas de la formación K1 y K2 son las de menor salinidad y son las de características más similares a las aguas de los acuíferos someros.

## 2.2 DISPOSICIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN-ÁREA DE SOSTENIBILIDAD EN AGROENERGÍA - ASA.

### ➤ Generalidades

Ecopetrol consciente de la necesidad de minimizar el efecto de la industria petrolera en el entorno natural en donde se localizan sus acciones, busca que a través del desarrollo del

proyecto de consolidación del Área de Sostenibilidad en Agroenergía - ASA<sup>2</sup> con el apoyo y trabajo conjunto de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA, se continúe con los trabajos que han permitido evaluar la utilización y efecto de usar las aguas de producción tratadas en condiciones de vertimiento para riego en el desarrollo de modelos productivos, lográndose con esto reducirlas descargas directas o vertimientos sobre cuerpos de agua superficiales, a la vez que se obtiene un uso alternativo del suelo y un aprovechamiento racional del recurso agua, que tiende en el tiempo a ser escaso y costoso llevando con estas acciones el desarrollo de un medio ambiente sostenible.

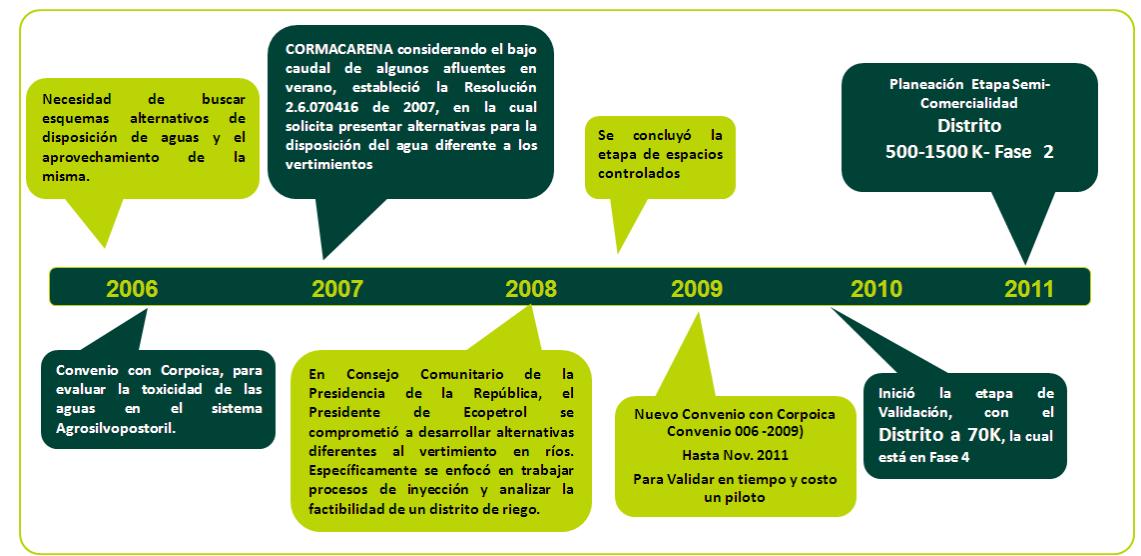
➤ **Objetivos**

- ✓ Implementar el Área de Sostenibilidad en Agroenergía – ASA, bajo un modelo de reutilización de las aguas de vertimiento como insumo para el desarrollo de sistemas agrícolas y forestales con potencial bio y dentro energético y énfasis en la participación y capacitación de la comunidad del área de influencia de Ecopetrol SCC.
- ✓ Evaluar-los cambios físicos, químicos y biológicos ocurridos en el suelo agrícola en producción con diferentes sistemas agrícolas y forestales en condiciones de campo y bajo riego con agua de vertimiento.
- ✓ Evaluar mediante experimentación decampo la persistencia de cinco especies de microorganismos edáficos descomponedores de hidrocarburos.
- ✓ Valorar la emisión de gases de efecto invernadero provenientes de la implementación de los sistemas productivos y del uso de agua asociada a la producción de hidrocarburos.
- ✓ Evaluaren el vivero y en parcelas de campo el efecto del agua de vertimiento asociada a la producción de hidrocarburos en producción y calidad de especies forestales, dentro y bioenergéticas, con potencial de uso en la región.
- ✓ Evaluar la calidad de las aguas de escorrentía provenientes del uso de las aguas de vertimiento sobre los sistemas de producción con el objeto de determinar los efectos sobre los recursos biofísicos del predio y en general sobre la flora de la microcuenca en la que se encuentra inmerso el proyecto.

**2.2.1 Antecedentes**

El proyecto es el resultado de un proceso que viene desarrollando Ecopetrol S.A y Corpocaja desde hace más de cuatro años y el cual nace de la necesidad de buscar esquemas alternativos de disposición de aguas y el aprovechamiento de las mismas, de acuerdo a esto las actividades más relevantes realizadas hasta el momento son:

<sup>2</sup>ASA "Centro modelo de Agroenergía- CAM"



**Figura 2-24 Antecedentes del proyecto de Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA)**

➤ **Actividades año 2006:**

Ecopetrol S.A y Corpoica firmaron el convenio DRI-166-06, para evaluar la toxicidad de las aguas asociadas por la actividad petrolera de la producción directa de la GEC.

Se estableció un esquema experimental para determinar si el agua de vertimiento de los Campos Castilla y Apiay generaban impactos negativos sobre la comunidad biótica. Los protocolos desarrollados fueron:

- ✓ Cultivos
  - o Montaje de cultivos experimentales en áreas controladas (invernáculos) en CORPOICA y Campo Castilla (Ecopetrol).
  - o Suministro del agua de vertimiento en diferentes concentraciones a las plantas.
  - o Monitoreo de variables ambientales en cada área.
  - o Manejo agronómico por parte de expertos de CORPOICA.
  - o Muestreos de agua, suelos y tejido vegetal en cada ciclo de cultivo.
  - o Diseño experimental, registro estadístico y muestreo y análisis de tejidos vegetales.
- ✓ Bovinos
  - o Selección de animales.
  - o Diseño experimental (Efluente 100% - Efluente 50% - Zona de mezcla – Testigo).
  - o Monitoreo y evaluación en la producción y la salud.
  - o El proceso experimental, desarrollado en alrededor de 20 meses, permitió establecer las siguientes conclusiones:
    - o En los vegetales estudiados no se encontró ningún efecto nocivo del agua de vertimiento.
    - o En los suelos estudiados no se encontró evidencia del efecto de los tratamientos aplicados.
    - o De los análisis hechos con el clorofilómetro y muestras foliares, no se encontró efecto nocivo alguno (ni acumulación ni residualidad).
    - o En los animales estudiados, no se encontraron efectos negativos de los tratamientos ni en tejidos, ni en órganos reproductores, ni en leche. Esto se comprobó en animales de primera y segunda generación.

Estos análisis realizados a especies vegetales, suelos y animales bajo condiciones experimentales no evidenciaron efectos de toxicidad que pueden afectar el entorno natural y ambiental en los animales o cultivos sujetos de la investigación.

➤ **Actividades año 2007:**

- ✓ En un consejo comunitario realizado en Castilla La Nueva en agosto de 2007 y moderado por el presidente de la República, Ecopetrol adquirió como compromiso establecer una mesa de trabajo en la cual se le comunicará a la comunidad el proyecto de producción del campo Castilla y la necesidad de ejecutar la obra del vertimiento al Río Guamal. El resultado fue que Ecopetrol debería buscar una opción diferente de vertimiento, para lo cual se estableció el proyecto de vertimiento al Río Guayuriba.
- ✓ CORMACARENA considerando el bajo caudal de algunos afluentes en época de verano, estableció la Resolución 2.6.070416 de 2007, en la cual solicita presentar alternativas para la disposición del agua diferente a los vertimientos, específicamente al de la Estación Castilla 2 en el Río Orotov.

➤ **Actividades año 2008:**

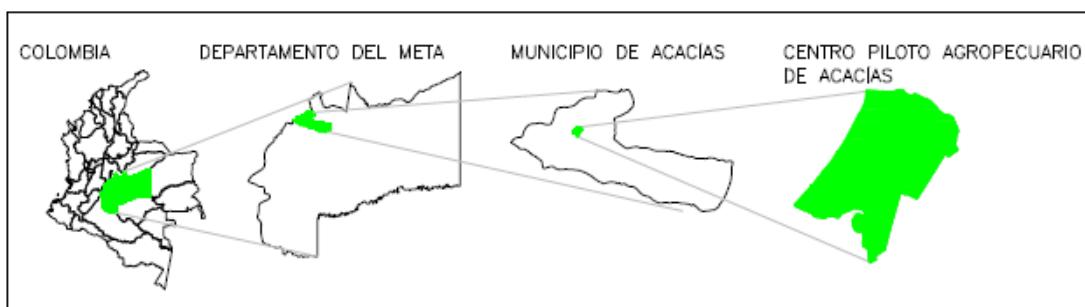
En el Consejo Comunitario de la Presidencia de la República realizado en agosto del 2008 en Castilla la Nueva, el Presidente de Ecopetrol se comprometió a desarrollar alternativas diferentes al vertimiento en los ríos. Específicamente se enfocó en trabajar en procesos de reinyección y analizar la factibilidad de un distrito de riego.

➤ **Actividades año 2009 - 2011:**

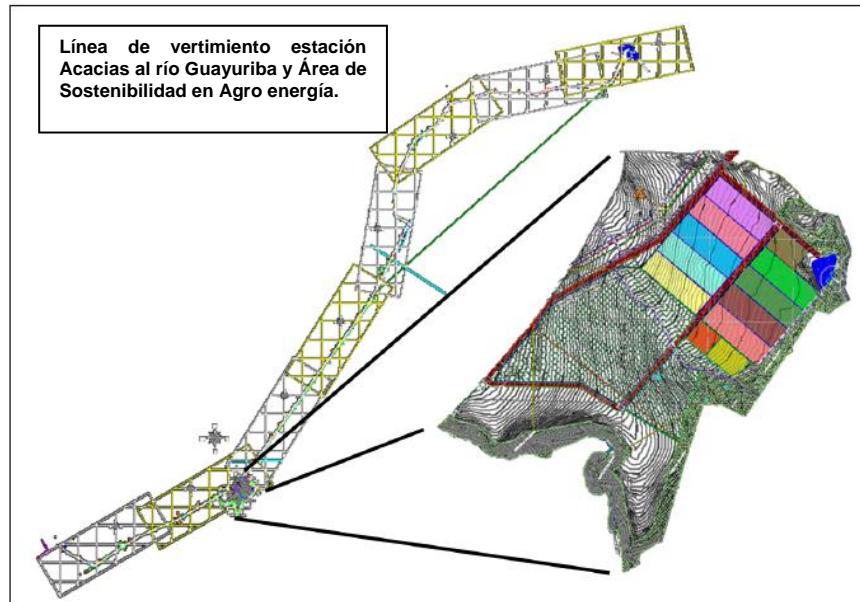
- ✓ Distrito 70K

Una vez se obtienen los resultados del convenio DRI-166-06 celebrado con CORPOICA, el cual concluyó que las aguas asociadas por la actividad petrolera de la producción directa de la GEC no evidencian efectos de toxicidad. Ecopetrol, procedió a la firma del convenio DHS-006-09 con Corpocica, dentro del cual se adquirió un terreno de aproximadamente 46 hectáreas para el desarrollo y validación en campo de los resultados obtenidos en la investigación de espacios controlados.

Este predio, se encuentra localizado en la vereda La Primavera del municipio de Acacias en el Departamento del Meta, su ubicación geográfica se encuentra entre las coordenadas 03°53'36,74"- 03°53'04,21" de latitud norte y 73°35'04,23" - 73°35'35,89" de longitud oeste.



**Figura 2-25 Localización del proyecto**



**Figura 2-26 Ubicación de la línea de Vertimiento y el ASA**

Esta área se encuentra dividida en tres especialidades:

#### Área Agrícola - 11 hectáreas

- ✓ Caña de azúcar (Producción de etanol)
- ✓ Sorgo dulce (Producción de etanol)
- ✓ Pasto elefante (Biomasa para cogeneración)
- ✓ Yopo (dendroenergético)
- ✓ Acacia mangium (dendroenergético)
- ✓ Gmelina (Forestal)
- ✓ Eucalipto pellita (Forestal)
- ✓ Caucho (Industrial)
- ✓ Palma de aceite (Industrial)
- ✓ Moriche (Industrial)

#### Área Pecuaria- 16 hectáreas

- Bovinos
- Búfalos
- Peces (Mojarra y Cachama)

#### Área Restauración ambiental- 14 hectáreas

- Siembra de árboles y conformación de bosque de protección de las fuentes hídricas superficiales.
- Establecimiento de corredores biológicos.
- 2 Lagunas

*Esta etapa se encuentra en operación*

**Figura 2-27 División del área del ASA**

En diciembre de 2010, el distrito comenzó a operar con 70.000 barriles de agua de producción por día proveniente del campo Castilla, se construyeron las facilidades de distribución de agua y se sembraron algunas especies, como:

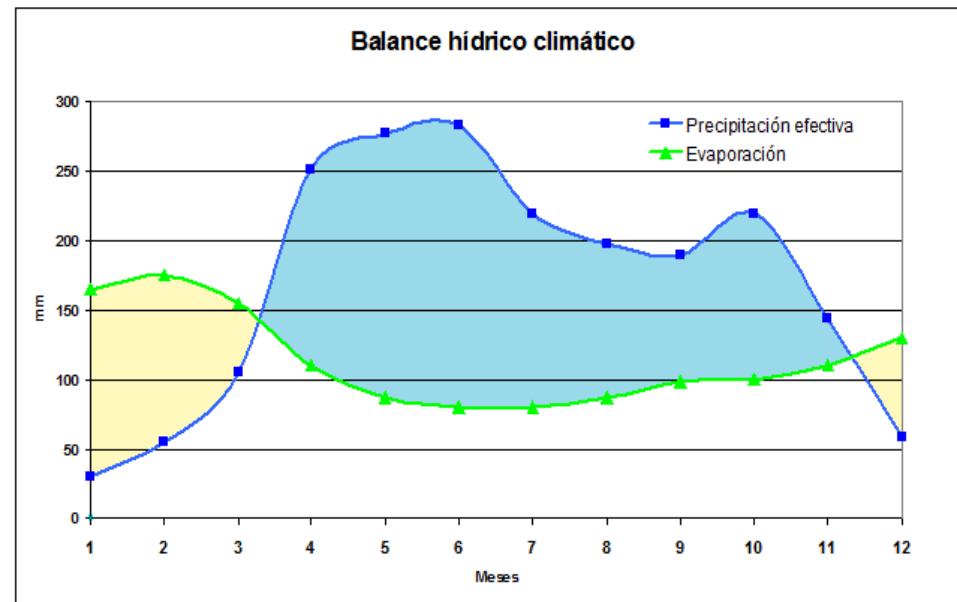
- o Palma Africana
- o Yopo
- o Acacia

- o Gmelina
- o Eucalipto
- o Caucho

Además de lo anterior, se encuentran en el distrito las especies de bovinos y búfalos a evaluar.

➤ **Resultados de estudios realizados por CORPOICA**

- ✓ Déficit y excesos de agua por mes.



**Figura 2-28 Balance hídrico climático**

Como criterio de riego se calculó un módulo de riego de 5,6 Lps/ha con una eficiencia de operación del 10% para lo cual se implementarán los métodos de riego por superficie o melgas.

➤ **Evaluación general del estado ecológico del bosque de ribera en el Caño Danta, en la vereda La Primavera, Acacias-Meta.**

Dentro de las investigaciones realizadas se estableció el estado ecológico del Bosque de ribera en el Caño Danta. A continuación se presentan las conclusiones del estudio realizado:

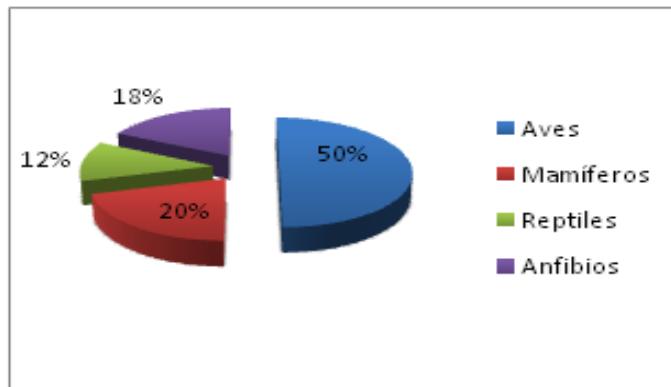
El estado de conservación del Caño Danta está entre los 0 y 35 puntos lo cual lo clasifican entre una alteración fuerte a una **degradación extrema**.

Estas alteraciones son causadas por:

- ✓ Transformaciones de los bosques nativos en pasturas para el desarrollo de la ganadería.
- ✓ La compactación del suelo por el continuo paso del ganado que hace que semillas y plántulas tengan menos probabilidad de germinar y enraizar.
- ✓ El asentamiento humano y el desarrollo industrial y de la agricultura, han generado desecho de basuras, desviamiento de la microcuenca.
- ✓ La intervención de maquinaria y construcciones de represas.

Dentro de este estudio se realizó un inventario biológico del ecosistema terrestre al interior del predio del distrito, del cual como resultado se determina que a pesar de estas condiciones

negativas que presenta el bosque, aún conserva la capacidad para albergar diferentes especies y mejorando sus condiciones de conservación, aumentaría la diversidad y mejorará el estado ecológico tanto de la flora y como de fauna de esta zona.



**Figura 2-29 Inventario biológico del ecosistema terrestre al interior del ASA**

## 2.2.2 Alcances

Disponer aguas de producción tratadas en STAP, en sistemas productivos agroforestales dentro del área del Bloque Cubarral.

## 2.2.3 Descripción del proyecto

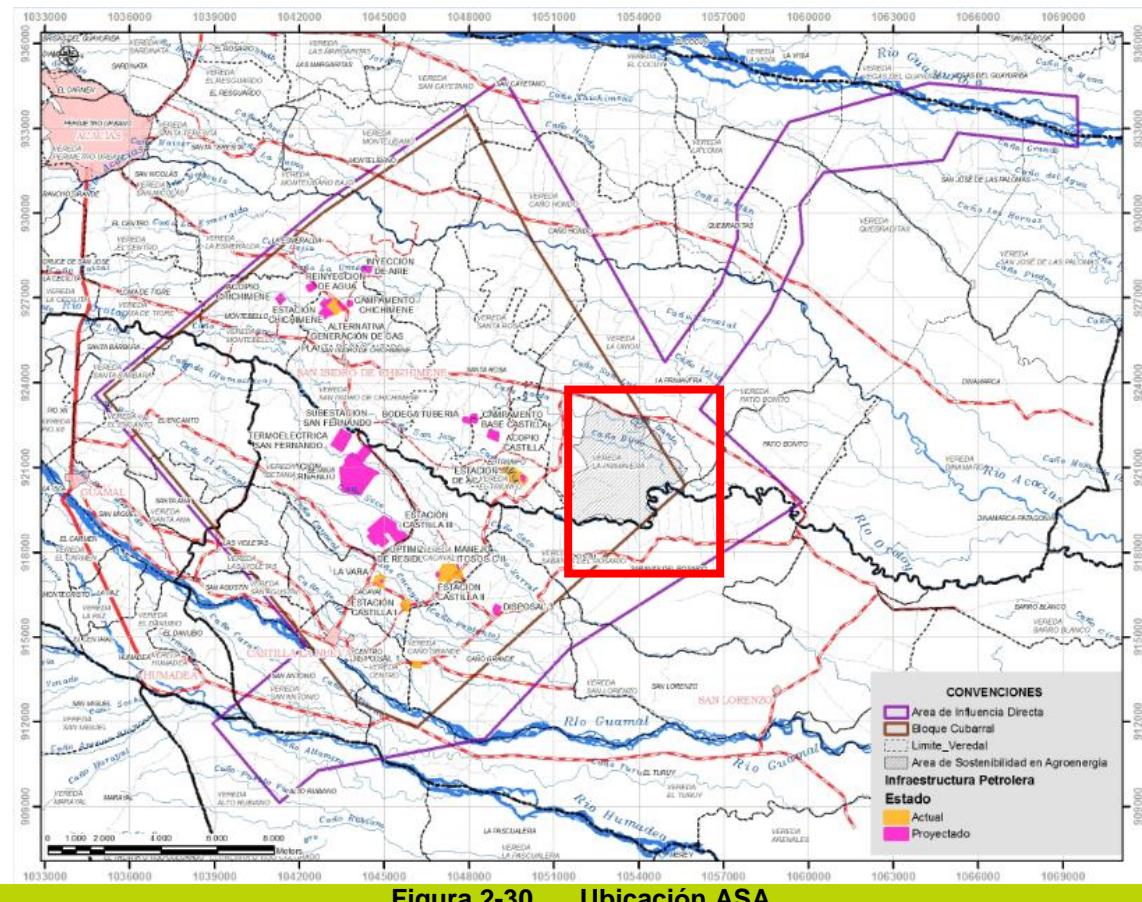
### 2.2.3.1 Localización

La zona de estudio está localizada en el municipio de Acacias, vereda La Primavera-departamento del Meta, entre las coordenadas 1°051.3651'055.700 Este y 918.958 –923.438 Norte, MAGNA\_Colombia\_Bogota. (Ver **Figura 2-30**).

Geográficamente se encuentra en clavada dentro del bloque Cubarral que es una extensión de tierra de limitada específicamente para realizar actividades relacionadas con la exploración y producción de hidrocarburos y que está concesionada por el estado.

El área a utilizar se encuentra emplazada al sur oriente del bloque y en ella se escogieron algunos predios con un área bruta de 1093 hectáreas (ha). Además del criterio anterior de selección se tuvo en cuenta la cercanía a la línea de vertimiento que conduce las aguas del Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción – STAP - de la estación Acacías hasta el Río Guayuriba. (Ver **Figura 2-26**).

Al área de interés se puede ingresar desde el municipio Acacías por la vía que conduce a la vereda Chichimene y al municipio de San Carlos de Guarao.


**Figura 2-30 Ubicación ASA**

Las coordenadas del polígono del ASA proyectado se presentan en la siguiente tabla

**Tabla 2-27 Coordenadas del ASA**

PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE
1	1051553	920672	103	1054178	922473	205	1054538	919402
2	1051668	920726	104	1054194	922456	206	1054541	919396
3	1051744	920762	105	1054200	922428	207	1054550	919312
4	1051875	920824	106	1054204	922386	208	1054527	919199
5	1051968	920867	107	1054197	922284	209	1054493	919129
6	1052079	920916	108	1054196	922264	210	1054407	919092
7	1052159	920952	109	1054192	922224	211	1054335	919073
8	1052203	920972	110	1054167	922158	212	1054304	919091
9	1052179	921030	111	1054136	922091	213	1054277	919104
10	1052141	921124	112	1054102	922041	214	1054230	919075
11	1052097	921214	113	1054053	921963	215	1054174	919003
12	1052068	921268	114	1054006	921895	216	1054129	918976
13	1052048	921313	115	1054067	921886	217	1054066	918959
14	1052016	921365	116	1054107	921871	218	1054024	918961
15	1051974	921424	117	1054154	921844	219	1053982	918974

PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE
16	1051938	921473	118	1054221	921806	220	1053951	919003
17	1051912	921508	119	1054284	921768	221	1053947	919007
18	1051856	921571	120	1054370	921726	222	1053917	919051
19	1051814	921611	121	1054561	921655	223	1053911	919060
20	1051784	921639	122	1054654	921598	224	1053869	919092
21	1051757	921663	123	1054756	921529	225	1053835	919102
22	1051727	921701	124	1054836	921505	226	1053793	919114
23	1051697	921730	125	1054889	921476	227	1053787	919115
24	1051672	921750	126	1054950	921442	228	1053756	919138
25	1051641	921774	127	1055021	921398	229	1053752	919142
26	1051682	921781	128	1055116	921363	230	1053726	919169
27	1051729	921789	129	1055162	921356	231	1053699	919176
28	1051754	921792	130	1055212	921344	232	1053653	919146
29	1051808	921800	131	1055322	921298	233	1053623	919115
30	1051871	921809	132	1055396	921259	234	1053558	919094
31	1051938	921819	133	1055431	921235	235	1053506	919104
32	1051951	921870	134	1055451	921218	236	1053466	919133
33	1051963	921922	135	1055461	921203	237	1053380	919161
34	1051977	922003	136	1055482	921169	238	1053316	919169
35	1051988	922066	137	1055523	921090	239	1053226	919167
36	1052009	922115	138	1055550	921052	240	1053134	919142
37	1052028	922154	139	1055579	921021	241	1053096	919133
38	1052031	922186	140	1055603	920994	242	1053066	919144
39	1052029	922244	141	1055628	920979	243	1053046	919152
40	1052026	922273	142	1055656	920971	244	1053033	919171
41	1052021	922332	143	1055706	920967	245	1053027	919178
42	1052031	922368	144	1055683	920926	246	1053012	919226
43	1052048	922428	145	1055642	920861	247	1052999	919248
44	1052061	922493	146	1055589	920779	248	1052993	919258
45	1052073	922552	147	1055561	920720	249	1052961	919285
46	1052089	922629	148	1055514	920648	250	1052924	919304
47	1052107	922716	149	1055463	920578	251	1052888	919306
48	1052115	922755	150	1055420	920539	252	1052840	919287
49	1052130	922830	151	1055357	920492	253	1052814	919260
50	1052148	922893	152	1055238	920417	254	1052797	919260
51	1052165	922941	153	1055187	920389	255	1052796	919260
52	1052182	922971	154	1055181	920386	256	1052796	919261
53	1052206	923015	155	1055174	920402	257	1052785	919279
54	1052230	923043	156	1055172	920407	258	1052785	919280
55	1052254	923070	157	1055149	920429	259	1052760	919300
56	1052282	923103	158	1055137	920436	260	1052705	919327

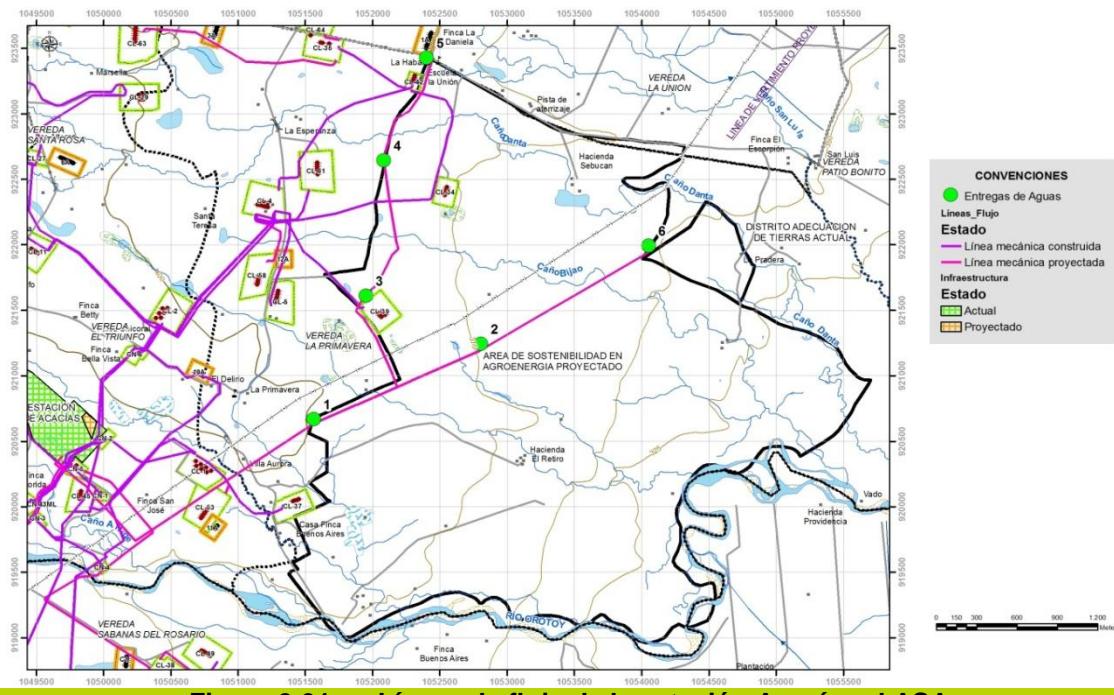
PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE
57	1052318	923144	159	1055118	920447	261	1052653	919344
58	1052341	923193	160	1055073	920454	262	1052604	919344
59	1052351	923236	161	1055005	920461	263	1052539	919335
60	1052361	923275	162	1054972	920460	264	1052443	919310
61	1052372	923316	163	1054911	920442	265	1052356	919260
62	1052382	923342	164	1054871	920402	266	1052305	919244
63	1052399	923385	165	1054805	920307	267	1052298	919241
64	1052413	923435	166	1054761	920271	268	1052249	919228
65	1052639	923304	167	1054720	920252	269	1052207	919209
66	1052859	923178	168	1054682	920256	270	1052138	919180
67	1053103	923035	169	1054656	920264	271	1052041	919127
68	1053153	923006	170	1054627	920282	272	1051915	919049
69	1053325	922905	171	1054610	920292	273	1051840	919003
70	1053392	922874	172	1054553	920319	274	1051814	919001
71	1053482	922852	173	1054493	920321	275	1051779	919005
72	1053565	922841	174	1054485	920318	276	1051739	919029
73	1053635	922831	175	1054464	920311	277	1051682	919075
74	1053734	922815	176	1054428	920283	278	1051658	919098
75	1053929	922805	177	1054390	920241	279	1051602	919185
76	1054019	922789	178	1054366	920207	280	1051555	919248
77	1054116	922782	179	1054341	920175	281	1051519	919293
78	1054228	922773	180	1054323	920137	282	1051426	919419
79	1054309	922758	181	1054312	920114	283	1051426	919419
80	1054325	922755	182	1054287	920035	284	1051376	919486
81	1054315	922726	183	1054270	920000	285	1051396	919505
82	1054305	922685	184	1054262	919986	286	1051445	919521
83	1054292	922661	185	1054260	919952	287	1051422	919550
84	1054258	922638	186	1054260	919949	288	1051402	919568
85	1054219	922617	187	1054266	919902	289	1051529	919643
86	1054180	922602	188	1054291	919848	290	1051522	919658
87	1054140	922577	189	1054293	919804	291	1051416	919925
88	1054078	922537	190	1054291	919726	292	1051594	920000
89	1054042	922518	191	1054270	919659	293	1051682	920041
90	1054007	922511	192	1054243	919606	294	1051655	920057
91	1053934	922514	193	1054237	919579	295	1051625	920096
92	1053884	922509	194	1054247	919561	296	1051583	920132
93	1053864	922495	195	1054253	919550	297	1051528	920185
94	1053863	922487	196	1054287	919518	298	1051618	920239
95	1053878	922469	197	1054329	919493	299	1051662	920267
96	1053904	922449	198	1054334	919485	300	1051662	920495
97	1053949	922429	199	1054361	919444	301	1051526	920560

PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE	PUNTO	ESTE	NORTE
98	1054005	922419	200	1054386	919414	302	1051543	920617
99	1054032	922422	201	1054388	919411	303	1051546	920627
100	1054080	922437	202	1054440	919398	304	1051553	920672
101	1054119	922463	203	1054501	919415			
102	1054155	922475	204	1054533	919415			

### 2.2.3.2 Líneas de flujo

Teniendo en cuenta que para el manejo del agua en el área del proyecto, se definió la ubicación de seis (6) puntos de entrega de agua de acuerdo al diseño del sistema hidráulico para el CMA, se requiere establecer un nuevo corredor para la construcción de las líneas de flujo de agua por bombeo que conducirán el agua de producción tratada desde la Estación Acacias hacia el área del proyecto, así:

- ✓ Partiendo de la Estación Acacias, de forma paralela (hacia el costado derecho) del corredor de la línea proyectada de vertimiento, hasta el punto de entrega de agua No 1, de donde se derivan una para la entrega en los puntos número 3, 4 y 5 y otra que continuaría paralela a la línea de vertimiento pasando por los puntos número 2 y finalmente al punto 6. A continuación se presentan los corredores mencionados (Ver **Figura 2-31**).



**Figura 2-31 Líneas de flujo de la estación Acacias al ASA.**

**Tabla 2-28 Líneas de Flujo ASA**

ORIGEN	DESTINO	DIÁMETRO (pulgadas)	Nº LÍNEAS	PROYECTADO	EXISTENTE	LONGITUD APROX (m)
ESTACIÓN ACACIAS	ASA	36	1	X		5369
VERT. GUAYURIBA	ASA	36	1		X	350

ORIGEN	DESTINO	DIÁMETRO (pulgadas)	N° LÍNEAS	PROYECTADO	EXISTENTE	LONGITUD APROX (m)
ESTACIÓN ACACIAS	ASA	36	1	X		2787

#### 2.2.3.3 Características del proyecto

Las actividades a realizar en el proyecto comprenden los siguientes componentes:

1. Adquisición, diseño y adecuación de los predios requeridos, en función de la utilización de las aguas asociadas a la producción de hidrocarburos, previamente tratadas.
2. Proceso de implementación de alternativas tecnológicas de reforestación mediante sistemas Silvopastoriles, las cuales contribuirán al mejoramiento y sostenibilidad de la producción en el área de estudio.
3. Monitoreo del efecto en los recursos biofísicos y en cultivos de importancia económica como: *Caña de Azúcar, Palma de Aceite, Acacia, Eucaliptopellita, Gmelina, Yopo, Caucho*, pasturas y otras especies; del uso del agua de vertimiento asociada a la producción de hidrocarburos.
4. Involucra acciones de socialización y capacitación a través de metodologías participativas, de tal manera que el proyecto se convierta en un espacio permanente de intercambio de conocimientos e interacción con la comunidad.

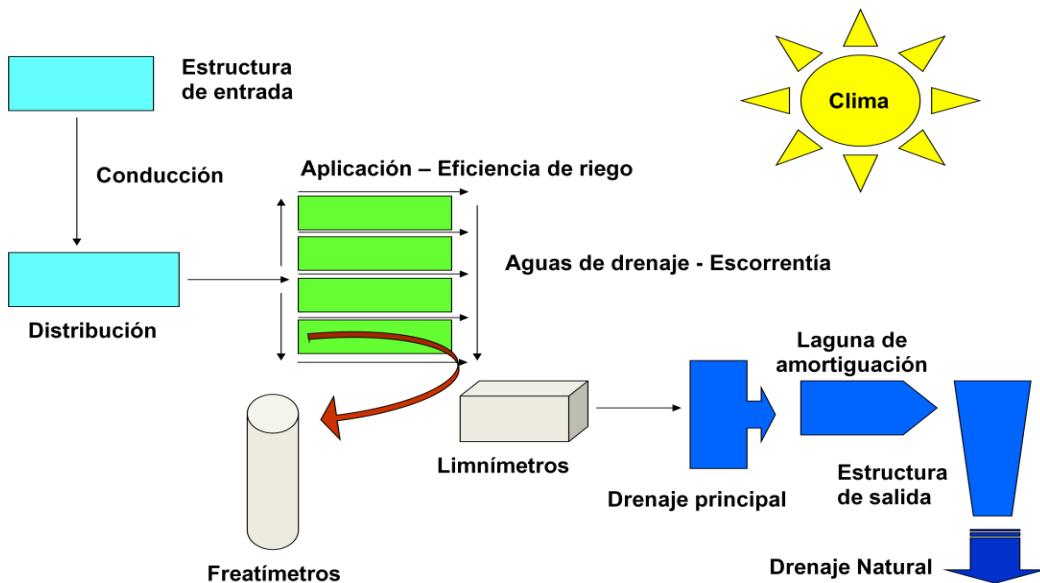
En la **Tabla 2-29** se presentan las actividades a realizar:

**Tabla 2-29 Actividades a realizar**

COMPONENTE	ACTIVIDADES A REALIZAR
Establecimiento de coberturas agrícolas y arbóreas	Elaboración de términos de referencia y fase de contratación topografía y diseño de obras
	Estudios topográficos y diseño
	Construcción de obras para los sistemas de riego y drenaje
	Construcción de redes liminigráficas y freatimétricas
	Adecuación química de terrenos
	Preparación del terreno y siembra de cultivos
	Operación Riego
	Labores culturales
	Manejo Biorremediación
	Monitoreos de agua, suelo y planta (Línea base)
Operación y mantenimiento	Operación y mantenimiento (Fertilizaciones, mantenimiento de infraestructura de riego y drenaje, red freatimétrica, red limnímetrica)
	Monitoreos permanentes (Atmósfera y microcuencas)
	Monitoreo permanente y toma de información y análisis de suelos
	Evaluación de biomasa
	Construcción de facilidades de transporte de Agua desde la Estación de Tratamiento de Acacias hasta el área del Proyecto. (2 líneas de aprox 7 Km de 36 pulgadas de diámetro).
Establecimiento pasturas	Enmiendas
	Semillas
	Preparación de suelos

COMPONENTE	ACTIVIDADES A REALIZAR
	mano de obra Construcción del corral y pisos del corral Establecimiento de arboles Salinas y bebederos ( 10 de cada una) Instalaciones hidráulicas( acondicionamiento de bebederos ) Tubería para sifones (riego de predios)
Establecimiento de cercas	postes de cemento postes de madera alambre de púas alambre liso grapas mano de obra (trazado, ahoyado, hincado, templado, transporte menor) cada tres metros cuatro cuerdas de calibre 12,5
Operación y mantenimiento de pasturas	Mantenimiento y renovación de praderas y forrajeras (EE acacias) y arboles (control de malezas plagas u fertilización) Insumos pecuarios y compra de animales (1 sales, 2 concentrados, 3 medicinas, vacunas baños, 4. elementos de trabajo y dotaciones, 5. medios y reactivos para procesos de 6. lab, hormonas, 7 elementos de laboratorio Análisis especializados y de rutina (evaluación de residuos hc en leche, carne, tejidos, fluidos corporales, aguas de vertimiento y bacteriológicos en aguas y los de rutina son los diagnósticos clínicos , proteínas, pesajes y coprológicos Personal contratado mano de obra , no calificada, jornales, pasantes y tesistas
Restauración ambiental en riveras de caños	Establecimiento de árboles ( trazado, siembra, manejo fitosanitario y evaluaciones ambientales
Divulgación y Capacitación a comunidades del área de influencia Bloque Cubarral	Convocatoria y ejecución de eventos de divulgación y socialización del proyecto Reuniones con comunidad del área de influencia Acopio y análisis de información de fuente primaria y secundaria Definición y puesta en marcha de la estrategia de relacionamiento interinstitucional Talleres con investigadores para definición de los contenidos temáticos de las capacitaciones a realizar Promoción y ejecución de las capacitaciones con la comunidad de interés

En la **Figura 2-32**, se presenta el Diagrama de funcionamiento del sistema de riego elaborado por Corpoica.



**Figura 2-32 Diagrama de funcionamiento del sistema de riego**  
 Fuente: Corpoica 2011

A continuación se describen las principales características y actividades que comprenden el proyecto, las cuales se presentan en mayor detalle en el anexo 2.16.2 Memoria Técnica del ASA.

#### ➤ Materiales y métodos

- ✓ Selección de especies vegetales.

Las especies a cultivar en el Centro Modelo en Agroenergía fueron seleccionadas conjuntamente por Ecopetrol y Corpoica, teniendo en cuenta su adaptabilidad a las condiciones agroecológicas del área, así como su potencial dendro energético y para producción de biocombustibles, como son Ypo, Palma de Aceite, Gmelina, Eucalipto, cañas y un screem de especies forestales nativas.

A continuación se presentan los principales requerimientos edafoclimáticos de las especies seleccionadas.

- o *Anadenanthera* sp (Ypo)



**Figura 2-33 Plantación de Ypo. CPA, Corpoica**

El Yopo (*Anadenanthera* sp) es un árbol de características conocidas desde tiempos coloniales por sus usos y aplicaciones en diversas actividades (**Figura 2-33**). Entre los más importantes están la extracción de tan inosparalacurtiembre de cueros, su uso como combustible (leña), la elaboración de carbón vegetal y lejía (jabón natural), además de su utilización como material de construcción para viviendas rústicas. Debido a sus múltiples usos, pero esencialmente como fuente de leña, la población de esta especie en el área del estudio ha disminuido paulatinamente. Adicionalmente la creciente demanda de esta especie, es debido al incremento poblacional y el requerimiento en algunas industrias como la del turismo se abre una banico de posibilidades para su explotación comercial. En la **Tabla 2-30**, se presentan los requerimientos edafoclimáticos mínimos para esta especie forestal.

**Tabla 2-30 Requerimiento de clima y suelos del cultivo de Yopo**

CULTIVO: YOPO		
Clima	Temperatura (°C)	> 20
	Brillo solar (horas/día)	> 4
	Precipitación (mm/(año))	> 1.500
	Humedad relativa (%)	60 - 80
	Vientos (km/hora)	N.A.
Suelo	Paisaje	Terrazas
	Altitud (msnm)	400 - 1.600
	Pendiente (%)	N.A.
	Textura	FA - FAr
	Drenaje	Bueno
	Profundidad efectiva (cm)	>100
	Nivel freático (cm)	>150
	Fertilidad	Sat. Bases > 30%

- o *Gmelina arbórea Roxb* (Gmelina)



**Figura 2-34 Árbol de Melina**

Gmelina es un árbol de la familia Verbenaceae, es una especie forestal de rápido crecimiento que ofrece amplias posibilidades para el desarrollo de reforestaciones industriales, debido entre otros aspectos a alta velocidad de crecimiento, su relativa facilidad de manejo, sus propiedades adecuadas tanto físicas como mecánicas y la versatilidad de usos de la madera (Rojas y Murillo, 2004) (Ver **Figura 2-34**). En su área de distribución natural se desarrolla en hábitat que varían desde húmedos hasta secos. Se encuentra en forma natural principalmente en las selvas mixtas

de *Birmania*, asociado con *Tectonagrandis*, *Terminalia tomentosa*, varias especies latifoliadas y bambúes.

La *Gmelina arborea* es nativa de India, Bangladesh, Sri Lanka, Myanmar, Tailandia, sur de China, Laos, Camboya y Sumatra en Indonesia y es una importante fuente maderera en las regiones tropicales y subtropicales de Asia. La especie ha sido introducida en muchos países tropicales incluyendo Filipinas, Malasia, Brasil, Gambia, Costa Rica, Burkina Faso, Costa de Marfil, Nigeria y Malawi; también es común en Cuba, Colombia, Brasil, Venezuela, Guatemala y en la zona tropical de México.

En América Central existe N 52000ha plantadas con melina. Las cuales han sido plantadas con propósitos comercial es tanto en Costa Rica, Colombia, Brasil, y Nicaragua (Obregón, 2012). En cuanto a calidad, la madera de *Gmelina* en América Central, no compite con las especies nativas de bosque. Sin embargo, el aumento en las restricciones es en el uso del bosque nativo ha provocado una reducción de la disposición de esa materia prima, originando la necesidad de buscar fuentes de maderas alternativas y la melina se muestra con gran potencialidad. Los mejores sitios para melina se ubican en las partes bajas de los terrenos, donde por lo general tienen mayor disponibilidad de agua y nutrientes, los sitios con buenos contenidos de calcio y magnesio y los ubicados en áreas con uso anterior productivo. Aunque *Gmelina arborea* se adapta a una amplia variedad de condiciones edáficas y sobrevive con facilidad en una gran variedad de tipos de suelo; entre ellos ácidos, calcáreos limosos, suelos rojizos arcillosos; su mejor desarrollo lo alcanza en aquellos cuyas texturas varían de arenosas a francas, profundos, de origen aluvial, húmedo, bien drenado y aireado y ricos en bases. En la **Tabla 2-31**, se presentan los requerimientos edafoclimáticos mínimos para esta especie forestal.

**Tabla 2-31 Requerimientos del cultivo de *Gmelina arborea*.**

CULTIVO: GMELINA		
Clima	Temperatura (°C)	24 - 29
	Brillo solar (horas/día)	Heliófita
	Precipitación (mm/año)	2.000 - 2.500
	Humedad relativa (%)	Bosque húmedo - seco
	Vientos (km/hora)	No tolera vientos fuertes
Suelo	Paisaje	Tierras altas
	Altitud (msnm)	0 - 900
	Pendiente (%)	< 30
	Textura	F - FAr
	Drenaje	Bueno
	Profundidad (cm)	>60
	Nivel freático (cm)	>150
	Fertilidad	Suelos fértiles

- *Eucalipto pellita* (Eucalipto)



**Figura 2-35 Cultivo de Eucalipto. CPA, Corpoica**

El Eucalipto es una especie con condiciones para repoblar terrenos improductivos, terrenos pobres, donde otras especies tendrían un crecimiento lento. Esta especie, originaria de Australia, se encuentra difundida por muchos países tales como, Brasil, Argentina, Venezuela, España, Portugal, Nueva Guinea, Java, Costa Rica, Francia, Estados Unidos, Japón, Kenia, entre otros (FAO, 1981). El eucalipto es una especie que por su rápido crecimiento, alta producción de biomasa y buena forma, es apta para una amplia variedad de usos. Mundialmente la producción de las plantaciones de eucalipto está dividida, aproximadamente en: leña o madera para pulpa (85%), postes y productos de madera en rollo de mejor calidad (10%), madera aserrada (5%) (FAO, 1990). La **Tabla 2-32** muestra los requerimientos edafoclimáticos mínimos para esta especie forestal.

**Tabla 2-32 Requerimientos del cultivo de Eucalipto pellita**

CULTIVO: EUCALIPTO		
Clima	Temperatura (°C)	18 - 26
	Brillo solar (horas/día)	> 6
	Precipitación (mm/año)	900 - 2.400
	Humedad relativa (%)	60 - 80
	Vientos (km/hora)	N.A.
Suelo	Paisaje	Tierras altas
	Altitud (msnm)	0 - 760
	Pendiente (%)	<15
	Textura	F - FA
	Drenaje	Bueno
	Profundidad (cm)	>150
	Nivel freático (cm)	>150
	Fertilidad	Sat, Bases >40%

- *Acacia Mangium* Willd (Acacia)



**Figura 2-36 Cultivo de Acacia. CPA, Corpoica**

La acacia es un árbol nativo de Australia, Indonesia, Ypapua Nueva Guinea, pero actualmente se encuentra en un rango de latitud que va desde los 19° S a 24° Nyun rango de longitud que está entre los 88° a 146° E. La acacia es un árbol de rápido crecimiento y puede alcanzar hasta los 30m en su relativamente corta vida (30 – 50 años) y diámetros que raramente exceden los 50cm. La *Acaciamangium* es una especie de baja elevación asociada con linderos de bosques húmedos y perturbados, suelos ácidos bien drenados (pH4, 5-6,5). Su rango de altitud está entre el nivel del mar hasta 1000 metros, con un límite superior de 780 metros. Es encontrado típicamente en zonas climáticas de tierras bajas tropicales y húmedas caracterizadas por una estación seca corta y un promedio anual de lluvia entre 1.446 y 2.970mm. La *Acaciamangium* puede tolerar un mínimo de precipitación de 1.000 mm, temperaturas medias mensuales entre 13-21°C (temperaturas mínimas), y 25-32° C (temperaturas máximas). En plantación la acacia usualmente desarrolla un fuste casi recto de hasta 10m de altura y con poca conicidad, se destaca su excelente poda natural que puede alcanzar hasta 2/3 de su altura, y responde bien a los distintos tratamientos silviculturales. Su crecimiento es muy rápido y notable en buenos sitios, y se compara, o aun supera, el de especies como *Eucalyptus deglupta*, *Gmelinaarborea*, o *Albiziafalcata*, consideradas entre las especies útiles de mayor crecimiento en el mundo, y particularmente para los trópicos húmedos. En suelos pobres tales como sitios disturbados o quemados, suelos arcillosos lateríticos degradados, en suelos agrícolas abandonados por su empobrecimiento, y en suelos dependientes moderadas, presenta un mejor desempeño que el *Pinuscaribaea* y muchas otras especies. En la **Tabla 2-33**, se presentan los requerimientos edafoclimáticos mínimos para esta especie forestal.

**Tabla 2-33 Requerimientos para el cultivo de Acacia mangium Willd**

CULTIVO: ACACIA		
Clima	Temperatura (°C)	22 - 29
	Brillo solar (horas/día)	> 6
	Precipitación (mm/año)	1.000 - 4.500
	Humedad relativa (%)	60 - 80
	Vientos (km/hora)	N.A.
Suelo	Paisaje	Tierras altas
	Altitud (msnm)	0 - 750
	Pendiente (%)	0 - 10
	Textura	FA - FAr

CULTIVO: ACACIA		
	Drenaje	Bueno
	Profundidad (cm)	>150
	Nivel freático (cm)	>150
	Fertilidad	Sat, Bases > 40%

- *Elaeis guineensis* Jacq. ( Palma de aceite)



**Figura 2-37 Plantación de palma de aceite**

La palma de aceite es una planta tropical propia de climas cálidos que crece bien a menos de 500 msnm. Su origen se ubica en el golfo de Guinea en el África occidental. De ahí su nombre científico, *Elaeis guineensis* Jacq., y su denominación popular: palma africana de aceite. Actualmente se han desarrollado materiales híbridos (*Elaeis guineensis* Jacq.) los cuales están en evaluación con buenos resultados especialmente en la resistencia a enfermedades. La expansión del cultivo en Colombia ha mantenido un crecimiento sostenido. A mediados de la década de 1960 existían 18.000 hectáreas en producción y hoy existen cerca de 405.000 ha distribuidas en 73 municipios del país distribuidos en cuatro regiones productivas (Oriental, Central, Norte y Occidental). En América Latina, Colombia es el principal productor de aceite de palma y el quinto a nivel mundial. Tiene como fortaleza un gremio que cuenta consolidadas instituciones, ya que desde 1962 fue creada la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. Los departamentos en Colombia que poseen más área sembrada en palma de aceite son en su orden: Meta (1), Cesar (2), Santander (3), Magdalena (4), Nariño (5), Casanare (6), Bolívar (7), Cundinamarca (8) y Norte de Santander (9). El aceite de esta palma está considerado como un producto privilegiado en el marco de las negociaciones de tratados comerciales con otros países, especialmente los usos no alimentarios del mismo para la producción de biodiesel. La **Tabla 2-34** presentan los requerimientos edafoclimáticos para un desarrollo óptimo del cultivo.

**Tabla 2-34 Requerimientos para el cultivo de palma de aceite**

CULTIVO: PALMA DE ACEITE		
Clima	Temperatura (°C)	>21
	Brillo solar (horas/día)	> 5,5
	Precipitación (mm/año)	2.000 - 4.000
	Humedad relativa (%)	> 75
	Vientos (km/hora)	N.A.
Suelo	Paisaje	Tierras planas

CULTIVO: PALMA DE ACEITE		
	Altitud (msnm)	<500
	Pendiente (%)	<7
	Textura	FA - F - FL
	Drenaje	Moderado a bien drenado
	Profundidad (cm)	>100
	Nivel freático (cm)	>150
	Fertilidad	Sat, Bases > 40%

- *Pasturas*



**Figura 2-38 Pasturas. Humidícola**

Integrar pasturas mejoradas en términos de calidad y producciones una forma estratégica para manejar los sistemas ganaderos modernos, especialmente si esas pasturas se integran bajo sistemas agroforestales, que mejoran la oferta ambiental y permiten incrementar la productividad de los sistemas. En la **Tabla 2-35**, aparecen las especies de gramíneas herbáceas que pueden formar parte de la oferta forrajera en las instalaciones del Centro Piloto de Acacias.

**Tabla 2-35 Requerimientos para el cultivo de palma de Pasturas**

CULTIVO: PASTOS		B. DECUMBENS	B. HUMIDICOLA
Clima	Temperatura (°C)	24 - 27	24 - 27
	Brillo solar (horas/día)	>4	>4
	Precipitación (mm/año)	>1.600	>1.500
	Humedad relativa (%)	60 - 80	60 - 80
	Vientos (km/hora)	N.A.	N.A.
	Paisaje	Tierras altas	Tierras altas
	Altitud (msnm)	0 - 1.500	0 - 1.500
	Pendiente (%)	N.A.	N.A.
	Textura	FA - FAr	FA - Ar
	Drenaje	Bueno	Moderado
	Profundidad efectiva (cm)	>20	>20
	Nivel freático (cm)	>50	>20
	Fertilidad	Sat. Bases > 30%	Sat. Bases > 30%

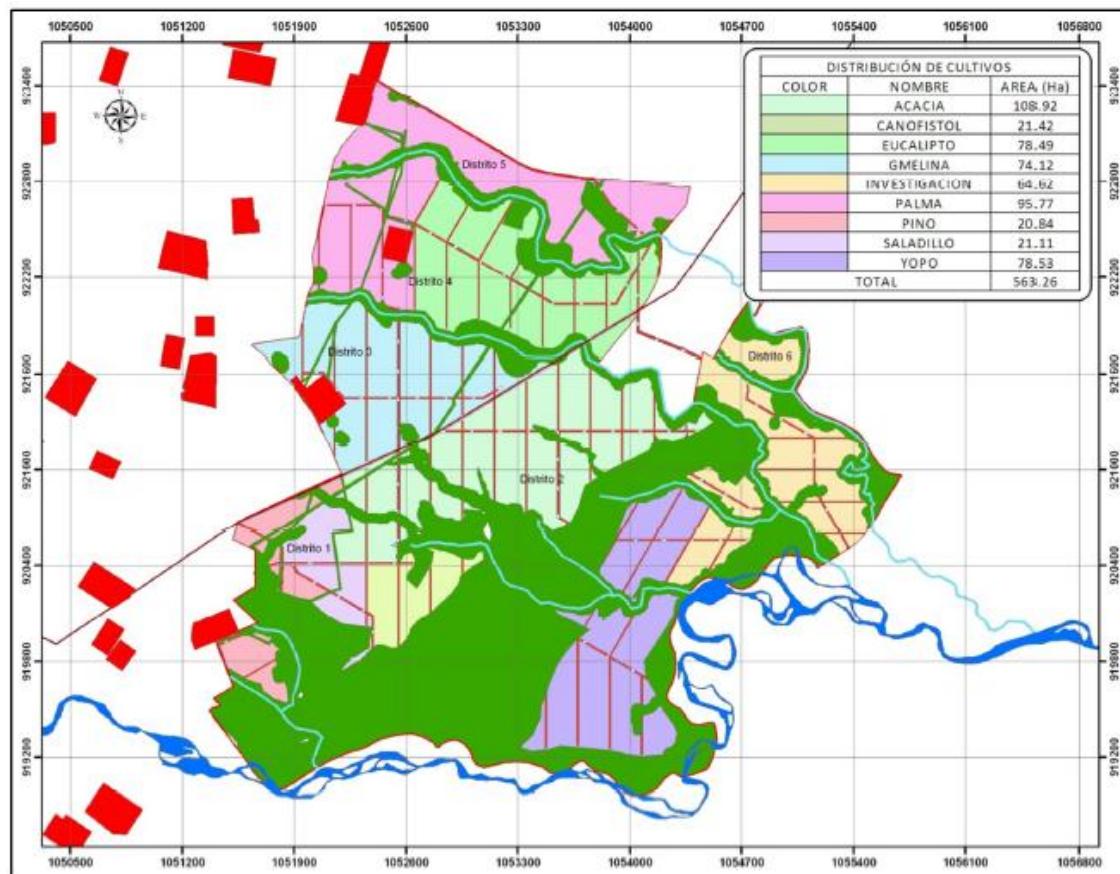
✓ Distribución de las especies a cultivar en el ASA

La distribución de las especies se realizó con base en las directrices dadas por Ecopetrol y Corpoica en las cuales se precisaron los porcentajes de participación de cada una de las especies.

**Tabla 2-36 Distribución de áreas por coberturas**

CULTIVO	ÁREA(Ha)	%
Palma de aceite	95.77	8.76
Yopo	78.53	7.18
Acacia	108.92	9.97
Eucalipto	78.49	7.18
Gmelina	74.12	6.78
Saladillo	21.11	1.93
Caño fistol	21.42	1.96
Screem de especies forestales	85.46	7.82
Inv. Biomassas	15	1.37
Inv. Pasturas	41.26	3.77
Recuperación ambiental e infraestructura	472.92	43.27
<b>TOTAL</b>	<b>1093</b>	<b>100%</b>

En la **Figura 2-39**, se muestra la ubicación espacial de los cultivos dentro del área de estudio, las áreas rojas de la imagen, corresponden a la ubicación de los Clúster en la zona referenciada.


**Figura 2-39 Distribución espacial de las especies**

- ✓ Caracterización físico-química de suelos.

Se realizó un análisis de suelo en 108 puntos ubicados en el ASA, en la **Tabla 2-37**, se presentan las coordenadas de los puntos muestreados y los parámetros monitoreados. En el **Anexo 4.2.8** se presenta el informe completo del laboratorio ANTEK.

**Tabla 2-37 Suelos monitoreados en el ASA (27 al 29 de diciembre/11)**

CÓDIGO	CULTIVO	SUB MUESTRA	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		CÓDIGO	CULTIVO	SUB MUESTRA	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		PARÁMETROS
			NORTE	ESTE				NORTE	ESTE	
SD-01 (30cm)	ACACIA	SUB-1	923035	1052330	SD-05A (60cm)	PASTURA	SUB-1	919480	1052888	CONDUCTIVIDAD 1:2 HUMEDAD ACIDEZ TOTAL ALCALINIDAD TOTAL CARBONATOS CLORUROS SULFATOS FOSFATOS NITRATOS NITRÍTOS NITRÓGENO AMONIACAL ORTOFOSFATOS FENOLES TOTALES ALUMINIO ANTIMONIO ARSÉNICO BARIO
		SUB-2	923059	1052349			SUB-2	919445	1052918	
		SUB-3	923006	1052378			SUB-3	919411	1052900	
		SUB-4	923027	1052394			SUB-4	919432	1052889	
		SUB-5	922997	1052425			SUB-5	919392	1052861	
		SUB-6	922977	1052406			SUB-6	919387	1052868	
SD-01A (60cm)	ACACIA	SUB-1	922903	1053138	SD-06 (30cm)	YOPO	SUB-1	921173	1053130	
		SUB-2	922927	1053156			SUB-2	921171	1053186	
		SUB-3	922871	1053181			SUB-3	921172	1053237	
		SUB-4	922890	1053198			SUB-4	921199	1053169	

CÓDIGO	CULTIVO	SUB MUESTRA	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		CÓDIGO	CULTIVO	SUB MUESTRA	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		PARÁMETROS
			NORTE	ESTE				NORTE	ESTE	
		SUB-5	922864	1053232			SUB-5	921188	1053214	
		SUB-6	922842	1053214			SUB-6	921180	1053247	
SD-02 (30cm)	GEMELINA	SUB-1	922343	1052787	SD-06A (60cm)	YOPO	SUB-1	920221	1052398	BORO CADMIO CALCIO COBALTO COBRE CROMO TOTAL ESTRÓNICO HIERRO LITIO MAGNESIO MANGANEZO MERCURIO MOLIBDENO NIQUEL PLATA PLOMO POTASIO SELENIUM SODIO VANADIO ZINC BERILIO SILICE RAS ESP GRASAS Y ACEITES HIDROCARBUROS TOTAL PAH's ARENA (SC) ARCILLA (SC) LIMO (SC) TEXTURA (SC) CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO
		SUB-2	922361	1052802			SUB-2	920219	1052453	
		SUB-3	922306	1052831			SUB-3	920221	1052503	
		SUB-4	922319	1052845			SUB-4	920249	1052436	
		SUB-5	922268	1052876			SUB-5	920236	1052481	
		SUB-6	922283	1052891			SUB-6	920228	1052514	
SD-02A (60cm)	GEMELINA	SUB-1	921771	1052216	SD-07 (30cm)	CADA	SUB-1	921164	1055261	
		SUB-2	921790	1052233			SUB-2	921151	1055290	
		SUB-3	921734	1052260			SUB-3	920629	1055349	
		SUB-4	921748	1052273			SUB-4	921194	1055285	
		SUB-5	921698	1052308			SUB-5	921153	1055353	
		SUB-6	921712	1052319			SUB-6	921112	1055314	
SD-03 (30cm)	CAUCHO	SUB-1	921326	1052622	SD-07A (60cm)	CADA	SUB-1	919422	1052105	
		SUB-2	921356	1052638			SUB-2	919410	1052135	
		SUB-3	921303	1052672			SUB-3	919388	1052194	
		SUB-4	921318	1052686			SUB-4	919454	1052128	
		SUB-5	921280	1052698			SUB-5	919411	1052197	
		SUB-6	921296	1052711			SUB-6	919406	1052204	
SD-03A (60cm)	CAUCHO	SUB-1	922098	1053514	SD-08 (30cm)	EUCA利PTO	SUB-1	922476	1052153	
		SUB-2	922116	1053530			SUB-2	922483	1052160	
		SUB-3	922063	1053563			SUB-3	922459	1052175	
		SUB-4	922078	1053576			SUB-4	922466	1052177	
		SUB-5	922045	1053590			SUB-5	922447	1052188	
		SUB-6	922056	1053601			SUB-6	922453	1052191	
SD-04 (30cm)	PALMA ACEITE	SUB-1	921542	1053621	SD-08A (60cm)	EUCA利PTO	SUB-1	922673	1054011	
		SUB-2	921572	1053615			SUB-2	922678	1054018	
		SUB-3	921512	1053620			SUB-3	922656	1054033	
		SUB-4	921524	1053620			SUB-4	922663	1054036	
		SUB-5	921489	1053652			SUB-5	922642	1054046	
		SUB-6	921503	1053652			SUB-6	922650	1054049	
SD-04A (60cm)	PALMA ACEITE	SUB-1	920681	1052010	SD-09 (30cm)	PINO	SUB-1	920279	1053562	
		SUB-2	920711	1052002			SUB-2	920286	1053569	
		SUB-3	920651	1052009			SUB-3	920268	1053575	
		SUB-4	920664	1052008			SUB-4	920279	1053583	
		SUB-5	920627	1052041			SUB-5	920251	1053597	
		SUB-6	920641	1052039			SUB-6	920263	1053599	
SD-05 (30cm)	PASTURA	SUB-1	920676	1054286	SD-09A (60cm)	PINO	SUB-1	921582	1054294	
		SUB-2	920641	1054317			SUB-2	921589	1054301	

CÓDIGO	CULTIVO	SUB MUESTRA	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		CÓDIGO	CULTIVO	SUB MUESTRA	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		PARÁMETROS
			NORTE	ESTE				NORTE	ESTE	
		SUB-3	920608	1054298			SUB-3	921571	1054309	
		SUB-4	920628	1054288			SUB-4	921583	1054316	
		SUB-5	920588	1054259			SUB-5	921555	1054330	
		SUB-6	920583	1054267			SUB-6	921567	1054332	
SD-10A (60cm)	BLANCO		922321	1053938	SD-10 (30cm)	BLANCO		922320	1053939	

En la **Tabla 2-38** se presenta el consolidado de los resultados del laboratorio de suelos realizados en el ASA

**Tabla 2-38 Resultados de Análisis de Suelos en el ASA**

PARÁMETRO	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	Resultados de Análisis de Suelos en el ASA																																												
			SD - 1 30m		ANTEK 11124		ANTEK 11125		ANTEK 11126		ANTEK 11127		ANTEK 11128		ANTEK 11129		SD 03 30cm		SD 03A 60cm		SD 04 30cm		SD 04A 60cm		SD 05 30cm		SD 05 A 60cm		SD 06 30cm		SD 06A 60cm		SD 07 30cm		SD 07A 60cm		SD 08 30cm		SD 08A 60cm		SD 09 30cm		SD 09A 60cm		SD 10 30cm 0 BLANCO		SD 10A 60cm BLANCO
HORA	h.	-----	13:00	13:00	15:20	15:20	17:15	17:15	09:15	09:15	11:20	11:20	13:10	13:10	11:00	11:00	13:10	13:10	11:20	11:20	13:10	13:10	11:20	11:20	13:10	13:10	11:20	11:20	13:10	13:10	11:20	11:20	N.E.														
pH 1:1	UNIDADES	ELECTROMÉTRICO	4,41	4,33	4,32	4,34	4,36	4,32	4,36	4,95	4,62	4,38	5,31	4,93	4,72	4,35	4,43	4,65	4,33	4,35	4,43	4,65	4,33	4,36	6,0-9,0																						
CONDUCTIVIDAD 1:2	µS/cm	ELECTROMETRICO	68,6	88,5	113	115	91,5	29,9	22,1	22,6	34,7	11,8	32,4	51,0	27,9	54,2	33,6	28,6	18,7	26,3	17,3	16,5	<4000																								
HUMEDAD	%	GRAVIMETRICO	1,62	2,00	7,48	5,58	7,03	5,85	6,50	8,92	5,58	6,86	11,2	6,20	10,7	8,05	7,77	6,46	7,11	4,62	1,90	1,31	N.E.																								
ACIDEZ TOTAL	mg/Kg CaCO <sub>3</sub>	VOLUMÉTRICO	110	114	122	84,6	93,9	118	110	114	120	124	137	135	69,7	1124	94,6	92,1	89,9	84,5	81,4	89,1	N.E.																								
ALCALINIDAD TOTAL	mg/Kg CaCO <sub>3</sub>	VOLUMÉTRICO	29,7	39,7	34,8	49,8	64,2	36,8	32,4	37,2	27,5	29,8	39,8	25,0	34,8	40,0	49,8	32,5	34,9	47,2	24,7	29,7	N.E.																								
CARBONATOS	mg/Kg CaCO <sub>3</sub>	TITULOMETRICO - CALCULO	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	N.E.																	
BICARBONATOS	mg/Kg CaCO <sub>3</sub>	VOLUMÉTRICO CÁLCULO	29,7	39,7	34,8	49,8	64,2	36,8	32,4	37,2	27,5	29,8	39,8	25,0	34,8	40,0	49,8	32,5	34,9	47,2	24,7	29,7	N.E.																								
CLORUROS	mg/Kg Cl-	ARGENTOMÉTRICO	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	N.E.																	
SULFATOS	mg/Kg SO <sub>4</sub>	TURBIDIMETRO	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	N.E.																		
FOSFATOS	mg/Kg PO <sub>4</sub>	COLORIMETRICO-ACIDO ASCORBICO	1,62	1,16	1,08	1,04	1,53	1,23	1,55	2,01	2,35	1,39	4,18	2,62	1,34	2,02	4,06	1,39	2,82	3,55	2,59	1,78	N.E.																								

PARÁMETRO	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	ESTACIONES DE MONITOREO																																			
			ANTEK 111124	SD - 1 30m	ANTEK 111125	SD - 01A 60m	ANTEK 111126	SD 02 30cm	ANTEK 111127	SD 02A 60cm	ANTEK 111128	SD 03 30cm	ANTEK 111129	SD 03A 60cm	ANTEK 111276	SD 04 30cm	ANTEK 111277	SD 04A 60cm	ANTEK 111278	SD 05 30cm	ANTEK 111279	SD 05A 60cm	ANTEK 111280	SD 06 30cm	ANTEK 111281	SD 06A 60cm	ANTEK 111282	SD 07 30cm	ANTEK 111283	SD 07A 60cm	ANTEK 111284	SD 08 30cm	ANTEK 111285	SD 08A 60cm	ANTEK 111286	SD 09 30cm	ANTEK 111287	SD 09A 60cm
NITRATOS	mg/Kg N-NO3	ESPECTROMETRICO UV	0,495	3,05	<0,375	0,996	0,692	1,118	<0,375	0,794	<0,375	0,75	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	<0,375	N.E.							
NITRITOS	mg/Kg N-NO2	COLORIMETRICO	0,272	<0,150	<0,150	<0,150	0,346	<0,150	0,150	<0,150	0,324	1,74	<0,150	1,74	<0,150	1,74	<0,150	1,74	<0,150	1,74	<0,150	1,74	<0,150	1,74	<0,150	1,74	<0,150	1,74	<0,150	<0,150	N.E.							
NITRÓGENO AMONIACAL	mg/Kg N-NH3	DESTILACION-TITULOMETRICO	3,8	3,2	4,1	3,9	4,4	4,2	3,8	4,2	4,6	4,8	4,0	4,3	4,1	3,6	4,0	4,6	3,4	3,8	4,0	4,6	3,4	3,8	4,0	4,4	N.E.											
ORTOFOSFATOS	mg/Kg P-PO4-3	COLORIMETRICO - ACIDO ASCORBICO	1,62	1,16	1,08	1,04	1,08	1,23	1,55	2,01	2,35	1,39	4,18	2,62	1,34	2,02	4,06	1,39	2,82	3,55	2,59	1,78	N.E.															
FENOLES TOTALES	mg/Kg	DESTILACION-FOTOMETRICO	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	<0,160	N.E.										
ALUMINIO	mg/Kg	E.A.A.	20900	20800	2290	15500	16300	19300	14200	19800	11300	11400	13400	15900	18600	11100	16000	14800	20300	5220	7220	N.E.																
ANTIMONIO	mg/Kg	E.A.A.E.	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	N.E.										
ARSÉNICO	mg/Kg	E.A.A.E	0,367	0,372	0,365	0,374	0,394	0,384	0,388	0,385	0,364	0,374	0,364	0,355	0,355	0,378	0,389	0,351	0,395	0,315	0,341	0,310	0,315	0,341	0,310	0,341	0,310	0,341	0,310	0,341	10							
BARIO	mg/Kg	I.C.P.	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	20000								
BORO	mg/Kg	COLORIMETRICO	4,04	4,23	4,57	4,68	4,57	4,62	4,10	4,55	3,89	3,10	2,98	2,24	3,27	3,22	3,35	3,94	3,54	2,87	2,21	2,31	N.E.															
CADMIO	mg/Kg	E.A.A.	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	<0,880	10										
CALCIO	mg/Kg	E.A.A.	<0,88	3,62	<4,60	<4,60	0,960	<4,60	0,90	<4,60	<4,60	<4,60	<4,60	11,1	9,26	18,4	21,5	20,6	25,4	22,3	24,3			N.E.														

PARÁMETRO	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	PLAN DE MANEJO AMBIENTAL BLOQUE CUBARRAL CAMPOS CASTILLA Y CHICHIMENE																					
			SD - 1 30m	ANTEK 111124	ANTEK 111125	SD - 01A 60m	SD 02 30cm	SD 02A 60cm	SD 03 30cm	SD 03A 60cm	SD 04 30cm	SD 04A 60cm	SD 05 30cm	SD 05A 60cm	SD 06 30cm	SD 06A 60cm	SD 07 30cm	SD 07A 60cm	SD 08 30cm	SD 08A 60cm	SD 09 30cm	SD 09A 60cm	SD 10 30cm 0 BLANCO	SD 10A 60cm BLANCO
COBALTO	mg/Kg	E.A.A.	<1, 48	<1,4 8	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	<1, 48	N.E.			
COBRE	mg/Kg	E.A.A.	<5, 78	<5,7 8	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	<5, 78	N.E.			
CROMO TOTAL	mg/Kg	I.C.P.	13, 4	12,2	13, 9	14, 0	17, 5	17,1	13, 6	19,9	13,6	16, 9	16, 3	14,9	18, 2	15,6	17,2	14,8	12,1	14, 2	15, 5	20,6	500	
ESTRONCIO	mg/Kg	E.E.A	<2, 00	<2,0 0	<2, 00	<2, 00	<2, 00	<2,0 0	<2, 00	<2,0 0	<2,0 0	<2, 00	<2, 00	<2, 00	<2, 00	<2, 00	<2,0 0	<2,0 0	<2,0 0	<2,0 0	<2,0 0	N.E.		
HIERRO	mg/Kg	E.A.A.	14 340	14 600	29 200	11 800	22 568	18 500	23 300	20 500	24 200	35 100	27 200	10 400	17 500	29 300	21 300	17 200	23 700	16 400	7 300	12 400	N.E.	
LITIO	mg/Kg	E.E.A.	<1, 25	<1,2 5	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	<1, 25	N.E.		
MAGNESIO	mg/Kg	E.A.A.	4,6 6	7,67	7,6 0	<4, 60	8,3 2	5,89	<4, 60	7,02	5,05	8,2 9	10, 2	14,8	<4, 6	<4,6	<4,6	<4,6	5,47	6,3 9	<4, 6	<4,6	N.E.	
MANGANEZO	mg/Kg	E.A.A.	78, 8	76,6	80, 2	82, 0	74, 0	77,6	57, 2	62,8	89,2	73, 5	52, 1	35,5	88, 3	50,3	38,7	39,7	47,8	38, 8	13, 8	34,0	N.E.	
MERCURIO	mg/Kg	E.A.A./V.F.	<0, 10	<0,1 0	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 10	<0, 095	<0,0 95	<0,0 95	<0,0 095	<0,0 95	<0,0 95	10	
MOLIBDENO	mg/Kg	E.A.A.	<12, .5	<12, 5	<1, 2,5	<1, 2,5	<1, 2,5	<12, .5	<12, 5	<12, 5	N.E.													
NIQUEL	mg/Kg	E.A.A.	<6, 70	<6,7 0	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	<6, 70	N.E.		
PLATA	mg/Kg	I.C.P.	<10, .0	<10, 0	<1, 0,0	<1, 0,0	<1, 0,0	<10, .0	<10, .0	<10, .0	200													
PLOMO	mg/Kg	I.C.P.	<10, .0	<10, 0	<1, 0,0	<1, 0,0	<1, 0,0	<10, .0	<10, .0	<10, .0	500													
POTASIO	mg/Kg	E.E.A.	761	283	29 4	52, 3	38 0	405	326	576	376	725	823	999	62, 0	62,6	66,7	63,6	741	752	211	233	N.E.	
SELENIO	mg/Kg	E.A.A.E	0,2 45	0,29 8	0,2 65	0,2 83	0,2 65	0,27 8	0,25 65	0,24 4	0,25 4	0,24 74	0,2 81	0,2 5	0,24 75	0,2 1	0,26 1	0,28 1	0,22 5	0,27 3	0,2 58	0,2 15	0,23 3	10

PARÁMETRO	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	ESTACIONES DE MONITOREO																		ESTACIONES DE MONITOREO																				
			ANTEK 111124	SD - 130m	ANTEK 111125	SD - 01A 60m	ANTEK 111126	SD 02 30cm	ANTEK 111127	SD 02A 60cm	ANTEK 111128	SD 03 30cm	ANTEK 111129	SD 03A 60cm	ANTEK 111276	SD 04 30cm	ANTEK 111277	SD 04A 60cm	ANTEK 111278	SD 05 30cm	ANTEK 111279	SD 05A 60cm	ANTEK 111280	SD 06 30cm	ANTEK 111281	SD 06A 60cm	ANTEK 111282	SD 07 30cm	ANTEK 111283	SD 07A 60cm	ANTEK 111284	SD 08 30cm	ANTEK 111285	SD 08A 60cm	ANTEK 111286	SD 09 30cm	ANTEK 111287	SD 09A 60cm	SD 10 30cm 0 BLANCO	ANTEK 111288	SD 10A 60cm BLANCO
SODIO	mg/Kg	E.A.A.	60, 0	105	12 8	58, 3	12 2	67,0	48, 2	84,2	77,1	102	172	188	139	381	174	31,1	116	134	42, 6	43,8	N.E.																		
VANADIO	mg/Kg	E.A.A.	53, 3	52,6	51, 3	59, 0	54, 5	53,2	44, 3	48,8	53,8	52, 2	42, 2	30,0	44, 2	43,0	54,2	52,7	46,3	43, 4	14, 8	18,6	N.E.																		
ZINC	mg/Kg	I.C.P.	<10, ,0	<10, 0	<1 0,0	<1 0,0	<1 0,0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	<10, 0	500							
BERILIO	mg/Kg	E.A.A.	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 15	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 1	<0, 5	<0, 1	<0, 5	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 5	<0, 15	<0, 015	<0, 015	<0, 015	N.E.									
SILICE	mg/Kg	E.A.A./CALCULO	5 400	7 900	10 800	13 100	9 300	8 790	9 290	10 400	14 700	11 300	9 420	7 040	9 500	10 900	10 200	9 700	5 600	9 070	278	89,7	N.E.																		
RAS		E.A.A./CALCULO	5,5 7	1,03	6,4 3	6,7 5	7,0 7	6,43	1,2 6	2,34	3,28	1,0 9	5,9 7	6,69	1,5 5	2,84	2,04	2,30	1,21	2,2 9	0,6 6	1,41	<12																		
ESP	%	E.A.A./CALCULO	6,3 5	0,25	7,4 2	7,8 2	8,2 1	7,43	0,5 8	2,09	3,37	0,3 4	6,8 6	7,74	0,9 9	2,79	1,68	2,03	0,50	2,0 2	<0, 1	0,79	<15																		
GRASAS Y ACEITES	mg/Kg	PARTICIÓN / INFRARROJO	<20	<20	<2 0	<2 0	<2 0	<2 0	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<10 000									
HIDROCARBUROS TOTALES	mg/Kg	EXTRACCION - INFRARROJO	<20	<20	<2 0	<2 0	<2 0	<2 0	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	N.E.										
PAH's	mg/Kg	CROMATOGRAFIA DE GASES - FID	<0, 01	<0,0 1	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	<0, 01	N.E.											
ARENA (SC)	%	AGENTE DISPERSANTE	52, 80	52,6 4	52, 42	50, 41	54, 47	52,8 5	52, 53	50,2 3	52,1 7	51, 61	51, 55	51,2 6	52, 56	50,4 8	52,5 9	52,2 4	50,3 2	52, 12	72, 64	74,6 6	N.E.																		
ARCILLA (SC)	%	AGENTE DISPERSANTE	33, 17	35,3 0	35, 46	35, 46	33, 42	33,1 4	27, 32	29,5 1	27,5 3	27, 85	29, 94	32,1 9	33, 34	31,3 7	31,3 1	31,5 4	27,4 3	33, 65	19, 29	17,2 7	N.E.																		
LIMO (SC)	%	AGENTE DISPERSANTE	14, 02	12,0 6	12, 12	14, 13	12, 11	14,0 1	20, 15	20,2 7	20,3	20, 54	18, 51	16,5 5	14, 10	18,1 5	16,1 0	16,2 2	22,2 5	14, 23	8,0 7	8,07	N.E.																		



A continuación se presentan las conclusiones de los análisis de suelo realizados en el ASA:

- o Los resultados obtenidos del análisis a las muestras de suelos provenientes del área proyectada para el ASA, respecto a los parámetros fisicoquímicos, cumplieron satisfactoriamente con los límites establecidos en el Protocolo de Louisiana 29-B, excepto los valores de pH relación 1:1, los cuales muestran una naturaleza ácida característica de la zona objeto del estudio.
  - o Los metales contenidos en los suelos analizados, se establecieron inferiores a los límites máximos permisibles, cumpliendo satisfactoriamente con el Protocolo de referencia.
  - o Las muestras de suelos analizadas no revelaron contenido de compuestos como grasas y aceites e hidrocarburos totales en esta etapa del proyecto, por lo tanto no representan riesgo alguno, al establecerse la ausencia de estos en los suelos analizados.
- ✓ A Descripción geomorfológica del área.

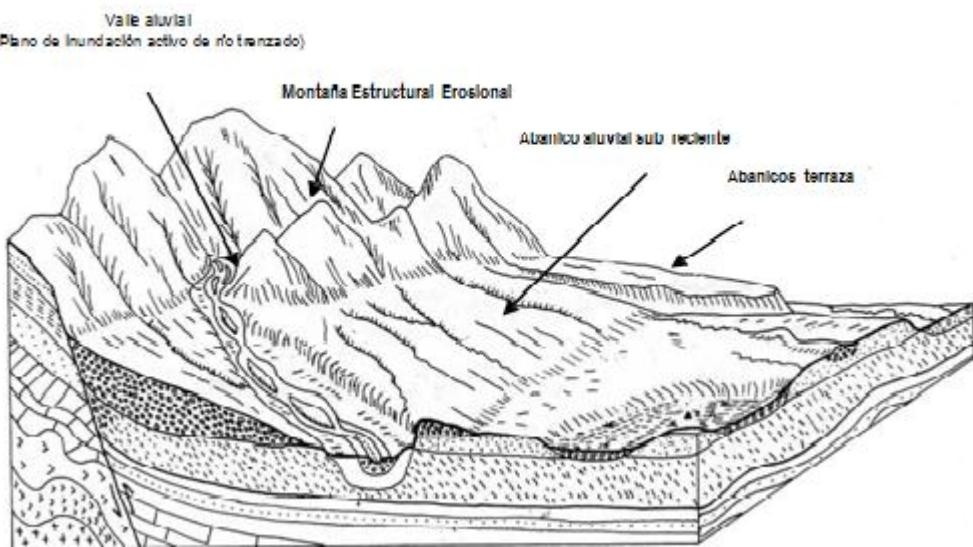
Para la caracterización de suelos de esta jurisdicción se ha adoptado el sistema taxonómico geomorfológico de Zinck (1987). A continuación se hará una descripción de cada uno de estos paisajes, incluyendo sus tipos de relieve y formas del terreno de acuerdo con la leyenda que se estructuró (Ver **Tabla 2-39**).

**Tabla 2-39 Leyenda unidades del suelo según sistema Alfred Zinck**

UNIDAD CLIMÁTICA	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS			SÍMBOLO	ÁREA	%
	PAISAJE	TIPO DE RELIEVE	FORMA DEL TERRENO			
TIERRAS CÁLIDO - HÚMEDAS	Piedemonte aluvial - P	Abanico sub-reciente	Napas de desborde	Nab	591.5	54.3
			Cubetas de desborde	Ca	320.3	29.4
			Cubetas de decantación	Da	30.8	2.8
			Vallecitos aluviales	Vab	104.3	9.6
	Valle aluvial - V	Plano de inundación de río meandrífico	Sobrevegas	S	32.5	3.0
			Vegas actuales	E	9.7	0.9

#### ➤ Paisaje de piedemonte aluvial (P)

El paisaje de piedemonte está localizado al pie de las vertientes de los relieves fuertes de las montañas y lo más, estando representado por el cambio morfológico existente entre las estribaciones de cordillera oriental y las planicies o llanuras aluviales, conformado por diferentes tipos de geoformas, asociadas a los principales ríos que nacen sobre el eje de la cordillera Oriental y fluyen hacia las partes planas. Los detalles del pie de monte se ilustran en la **Figura 2-40**.



**Figura 2-40 Vista esquemática de un piedemonte y la coalescencia de abanicos terraza**

Los tipos de relieve y sus formas del terreno se describen a continuación.

✓ Abanico sub - reciente

El abanico aluvial sub-reciente, pertenece a la llanura aluvial de piedemonte, corresponde a un tipo de relieve de tipo semicircular con su parte superior más estrecha y empinada, se compone de las siguientes partes: el ápice o parte proximal, que a menudo se extiende hacia la montaña o elevación mayor siguiendo el cauce de la corriente que lo depositó, el cuerpo como porción del medio que cubre la mayor superficie de este tipo de relieve y la base o parte distal es una franja angosta y suavemente inclinada que gradualmente se confunde con la parte más plana o la llanura sobre la cual se explaya el abanico.

El carácter de la esencia de los abanicos se refiere a la propiedad que tienen los diferentes eventos que han ocurrido de unir sus materiales constitutivos entre sí para formar unos o lo, a causa de la sobre posición de diferentes abanicos en razón de no coincidir en el tiempo las épocas de crecidas que determina diferentes episodios de acumulación. De otra parte, el carácter torrencial se asocia a los eventos de precipitación o corrientes hídricas de gran magnitud en abundancia e intensidad para el desarrollo de estos tipos de relieve.

Las formas del terreno en este abanico son las napas de desborde, la cubeta de desborde, la cubeta de decantación y los vallecitos aluviales.

✓ Napas de desborde (N)

Es una zona de transición entre el dique natural y el basín, no siempre tan definida como esas unidades, formada por la acumulación de sedimentos de granulometría mediana en los que tienden a prevalecer los limos. El relieve es ligeramente plano a ligeramente inclinado con pendientes que oscilan entre 1 y 7%, en ocasiones cruzadas por una fina red de líneas de drenaje que se pierden en dirección al basín. Los suelos son menos permeables que en el dique natural, con un drenaje natural imperfecto ha moderado. Aquí todavía es posible encontrar

algún parcelaje y un uso menos intensivo de la tierra, o en su defecto, una cobertura vegetal algo menos desarrollada que en el albardón.

✓ **Cubetas de desborde (C)**

Es la unidad más amplia del plano inundable, está localizada atrás del dique natural, con extensión hacia los taludes de las terrazas o hacia la base de los piedemontes, o también hasta las márgenes externas de la llanura. Su topografía plano cóncava favorece el estancamiento tanto de las aguas de desborde, como de aquellas aportadas por pequeños tributarios intermitentes y las de las mismas lluvias, lo cual facilita a su vez la decantación de las partículas más finas. Aquí las aguas de desborde se desplazan inicialmente hacia los tramos más bajos, para finalmente quedar cubierto durante un cierto período de tiempo.

En esta posición dominan los suelos con granulometría francesa fina, la permeabilidad es moderada y el drenaje natural pobre, con fuertes signos de hidromorfismo. En los períodos de aguas bajas los ribereños suelen aprovechar la cubeta de desborde para sostener un pastoreo extensivo. El relieve es plano a ligeramente plano con pendientes hasta del 3%.

✓ **Cubetas de decantación (D)**

Están localizadas en la parte central de las terrazas, con extensión hacia los taludes o hacia la base de los piedemontes, o también hasta las márgenes externas de la llanura. Su topografía plano cóncava favorece el estancamiento tanto de las aguas a portadas por pequeños tributarios intermitentes y de las mismas lluvias, lo cual facilita a su vez la decantación de las partículas más finas. Las pendientes fluctúan entre 1 y 3%.

➤ **Valle aluvial (V)**

Este paisaje se asocia a los principales sistemas de drenaje que cruzan el área de estudio, correspondiendo a una porción amplia alargada de relieve plano a ligeramente plano, con pendientes bajas, siendo de amplitud variable respecto de su longitud, estando intercalado entre dos sectores de relieves más fuertes tenido como eje un curso de agua.

La forma del terreno en este valle es el plano de inundación de río meandrífico. Este es un Tipo de relieve de tamaño considerable perteneciente a la llanura aluvial meandrífica de edad actual, es susceptible a inundaciones periódicas u ocasionales, está conformado por la sobre vega y la vega actual.

✓ **La sobre vega (S)**

La sobre vega ocupa espacios paralelos discontinuos a lado y lado del cauce, es la geoforma más sobresaliente, esta posición se debe al aporte de la propia corriente por medio de la acumulación longitudinal de sedimentos finos durante crecidas excepcionales, en especial aportes laterales de material coluvio aluviales provenientes de los escarpes y taludes de terrazas adyacentes de la misma corriente, de relieve plano a ligeramente plano, con pendientes del 0 al 3% El nivel del terreno se ve elevado por el aporte de sedimentos a los orillares y meandros abandonados, limitando la frecuencia de inundaciones.

✓ **La vega actual (E)**

Es el lecho mayor de un río, el que origina un patrón de barras de cauce y canales de estiaje que en conjunto constituyen el lecho mayor o vega baja. Son zonas altamente susceptibles a las avenidas torrenciales, razón por la cual no permiten el desarrollo de vegetación ni suelos.

➤ **Descripción de las unidades geomorfológicas**

- ✓ Napas de desborde (Nab)

Cuenta con área de 591.5 ha, lo cual corresponde al 54.3% del área estudiada (Ver **Figura 2-41**).



**Figura 2-41 Fotos panorámicas y morfología del suelo de la napa de desborde**

- o Propiedades físicas

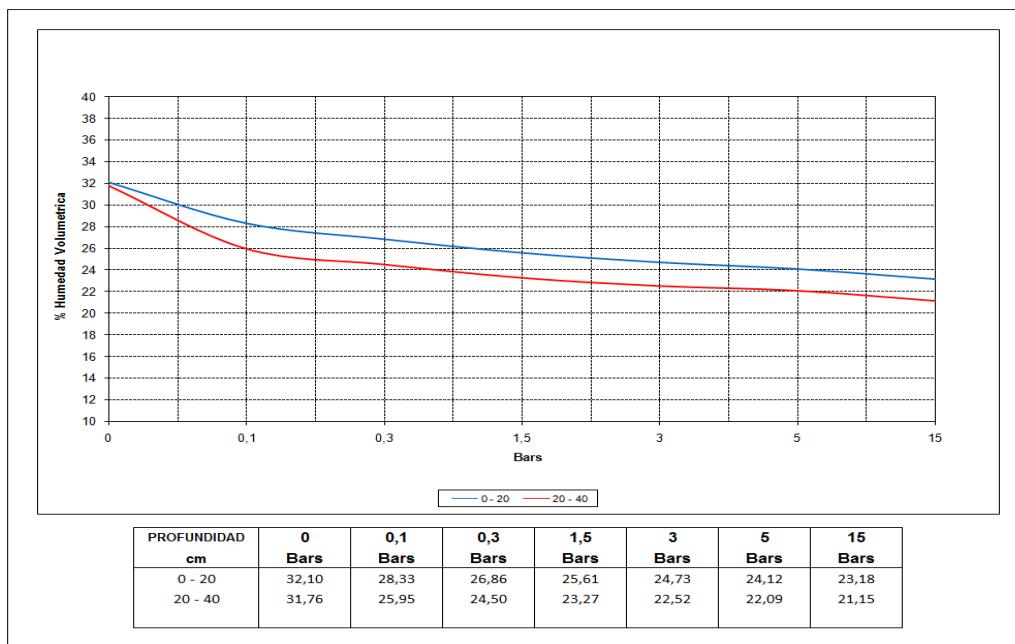
Para la evaluación de las propiedades físicas, se tuvo en cuenta el conjunto de pruebas realizadas en el área de trabajo.

Los resultados de granulometría evidencian la dominancia de texturas franco arcillo arenosas, bien estructurados de tipo granular, de consistencia ligeramente plástica y ligeramente pegajosa.

Los valores promedios de densidad real son de 2.70 g/cm<sup>3</sup>, la densidad aparente varía de media a baja con valores que oscilan entre 1.56 a 1.34 g/cm<sup>3</sup>.

Según los resultados de macro, micro y porosidad total, el suelo presenta promedios de porosidad total alta – media con valores que varían entre 44.9 a 38.6 %, muy alta micro porosidad (34.7%) y la macro porosidad varia de baja a media (6.9 a 13.1 %)

El análisis de las curvas de retención de humedad de la muestran que el suelo posee humedad aprovechable muy baja (3.5%). Del análisis de las propiedades físicas podemos afirmar que el suelo presenta indicios de degradación ligera por efectos de la compactación y se espera que posea tasas de infiltración y conductividad hidráulica moderadas.



**Figura 2-42 Curvas de retención de humedad de la unidad Nab**

La unidad presenta buena aptitud para el riego por superficie. De acuerdo con la experiencia de Corpoica en el proyecto, en lo posible no deben incorporar separa tal fin aquellas tierras que excedan el 4% dependiente. Como la unidad en mención posee pendientes entre el 1 y 7%, quiere decir que parte no facilita el riego por superficie.

- o Propiedades químicas

Para la evaluación de las propiedades químicas, se tuvo en cuenta el conjunto de pruebas realizadas en el área de trabajo.

El contenido de materia orgánica es alto a medio (9.4 a 2.7%), el pH es fuertemente ácido variando a extremadamente ácido, con valores que fluctúan entre 4.8 y 4.5.

Las bases totales son muy bajas con valores que fluctúan entre 0.7 y 1.1 meq/100g de suelo; los calcios y sodios son bajos (0.5 – 0.05 meq/100g de suelo), el magnesio varia de bajo a medio (0.1 – 0.26 meq/100g de suelo) y bajos en potasio (0.06 meq / 100 g de suelo).

La saturación de calcio y magnesio es baja y varía a media con valores que oscilan entre 1.505 – 24.8% y 4.4 – 12.6%, respectivamente; la de potasio es baja (2.1%), la saturación de sodio es baja (1.7%) y la de aluminio alta (72.3%).

El fosforo posee un promedio de 1.9 a 17.8 ppm con calificación baja a media.

Bajos a altos contenidos de azufre (3.6 y 18.1 ppm), bajos de boro (0.04 ppm), medios a latos contenidos de hierro (mayores de 22.9 ppm) y bajos a medios de magnesio zinc y cobre (3.1 – 9.8 ppm, 0.2. – 1.3 ppm y 0.4 – 0.9 ppm)

Con un programa de enmiendas para neutralizar la acidez intercambiable y adición de bases, se pueden incorporar estos suelos a la producción de cultivos transitorios y perennes.

- ✓ Unidad de cubeta de desborde (Ca)

Cuenta con un área de 320.3 ha, lo cual corresponde al 29.4% del área estudiada. (Ver **Figura 2-43**).

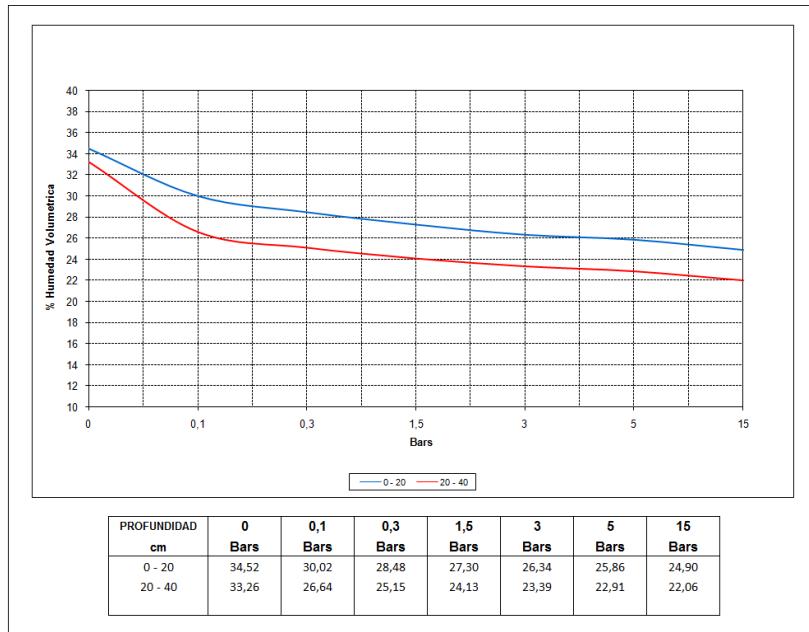


**Figura 2-43 Panorámicas y morfología del suelo de la cubeta de desborde**

- o Propiedades físicas

Los resultados de granulometría evidencian la dominancia de texturas franco arcillo arenosas, estructuras de tipo granular bien desarrollada, consistencia ligeramente pegajosa a ligeramente plástica en mojado.

La densidad real oscila en promedio entre 2.69 a 2.71 g/cm<sup>3</sup>, alta a media porosidad total (46.9 – 37.5 %), muy alta microporosidad (36.2%) y baja a media macroporosidad (7.4– 13.2%), la humedad aprovechable en promedio es muy baja (3.3%). De lo anterior se deduce que posee problemas de drenaje por efectos de encarcamientos pero que cuenta con buen drenaje interno del suelo por lo que se espera que las conductividades hidráulicas e infiltración fluctúen entre moderadas a moderadamente rápidas. Se deben construir canales para abatir el nivel freático y permitir la infiltración del agua.



**Figura 2-44 Curvas de retención de humedad de la unidad Cab**

- o Propiedades químicas

El contenido de carbón orgánico varía ampliamente de bajo a muy alto con valores 1.3 y 4.4%.

El pH es muy fuerte menteácido, con un promedio de 4.8.

Las saturaciones de calcio varían de medias a altas (25.0-49.7%), las de magnesio y potasio son bajas a medias (14.8 y 3.8%, respectivamente), la saturación de sodio es baja (1.5%) y la saturación de aluminio oscila entre media a alta con valores de 39.3 y 69.7%. El fósforo es bajo (2.1ppm) al igual que el azufre, zinc y boro (3.69, 0.28 y 0.04ppm, respectivamente), el manganeso, hierro y cobre fluctúan de medios a altos (7.9-16.9ppm, 20.7-57.4 ppm y 0.9-1.7ppm), respectivamente.

- ✓ Unidad cubeta de decantación (Da)

Cuenta con un área de 30.8 ha, lo cual corresponde al 2.8% del área estudiada. (Ver Figura 2-45).



**Figura 2-45 Panorámica y morfología del suelo de la cubeta de decantación**

- o Propiedades físicas

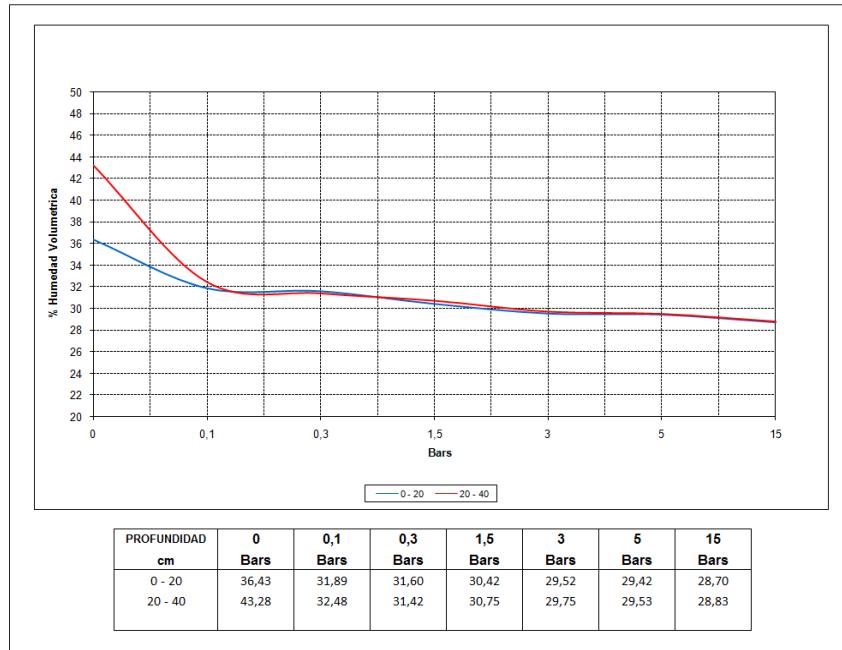
Los resultados de granulometría evidencian la dominancia de texturas franco arcillo arenosas, estructura de tipo granular bien desarrollada, consistencia ligeramente pegajosa a ligeramente plástica en mojado.

La densidad real oscila en promedio entre 2.69 a 2.71 g/cm<sup>3</sup> y de densidad aparente de 1.35 y 1.49 g/cm<sup>3</sup> alta a media porosidad total (46.9–37.5%), muy alta microporosidad (36.2%) y baja a media macroporosidad (7.4– 13.2%), la humedad aprovechable en promedio es muy baja (3.3%) (Ver **Figura 2-46**). De lo anterior se deduce que posee problemas de drenaje por efectos de encarcamientos pero que cuenta con buen drenaje interno del suelo por lo que se espera que las conductividades hidráulicas e infiltración fluctúen entre moderadas a moderadamente rápidas. Se deben construir canales para abatir el nivel freático y permitir la infiltración del agua.

- o Propiedades químicas

El contenido de carbón orgánico en promedio varía de alto a medio (4.5 y 2.3%), el pH es muy fuerte mente ácido (4.8), las saturaciones de calcio y aluminio son medias con valores de 26.3 y 39.3%, respectivamente; las de magnesio, potasio y sodio califican como bajas con valores de 6.2, 2.1 y 1.4%, respectivamente.

El fósforo es bajo (1.5 ppm) al igual que el azufre, zinc y boro (4.02ppm, 0.26 ppm y 0.01ppm, respectivamente), el manganeso y cobre son medios con nivel es de 7.12 y 1.46 ppm y el hierro fluctúan de medios a altos (18.5 a 38.6 ppm).



**Figura 2-46 Curvas de retención de humedad de la unidad Da**

Al igual que la unidad anterior posee un buen potencial agronómico, haciendo las aplicaciones de fertilizantes y enmiendas que se encuentran en déficit o desbalanceadas.

- ✓ Unidad vallecitos (Vb)

Cuenta con un área de 104.3ha, lo cual corresponde al 9.6% del área estudiada. (Ver **Figura 2-47**).



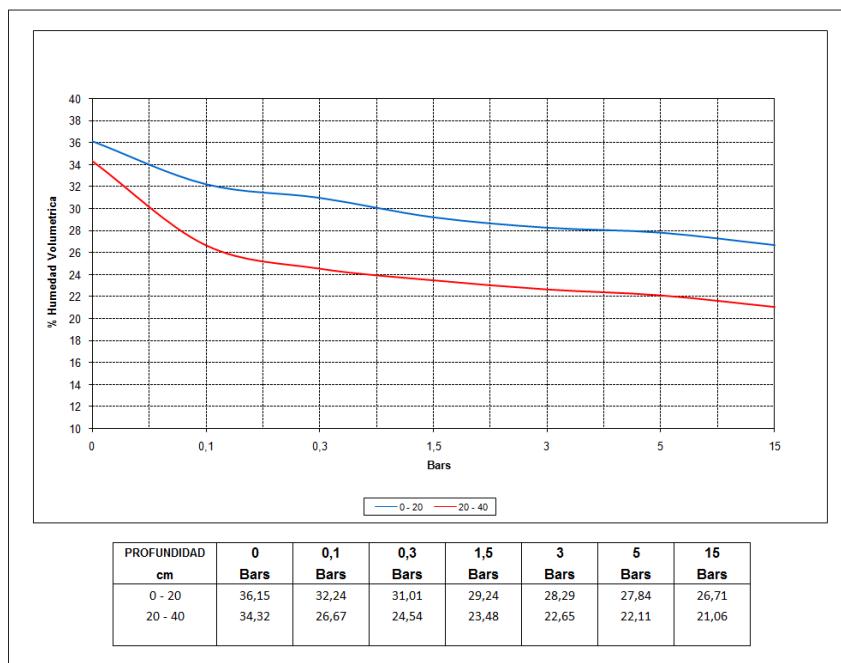
**Figura 2-47 Panorámica vallecitos aluviales**

- o Propiedades físicas

Los resultados de granulometría evidencian la dominancia de texturas franco arenosas, consistencia en mojado no pegajosa y no plástica, densidad real varía de 2.70 a 2.60 g/cm<sup>3</sup>, la densidad aparente oscila entre 1,64 y 1.18 g/cm<sup>3</sup>, valores que se consideran normales para suelos de texturas moderadamente gruesas.

Según los resultados de la macro, micro y porosidad total, el suelo presenta porosidad total media a alta (38.6– 50,1%), la macro porosidad es baja con valor promedio de 6.83% y la micro porosidades muy alta (35.1%), muy baja a baja humedad aprovechable (Ver **Figura 2-48**) lo que guarda relación estrecha con los bajos contenidos de arcilla y materia orgánica.

Es una unidad de importancia ambiental que corresponde a los drenajes naturales y que no se utilizarán. De otra parte, al poseer una baja estabilidad estructural producto de los bajos contenidos de arcilla, son muy susceptibles a degradación por efectos de la erosión hídrica, situación que se acentúa si se tiene en cuenta la pendiente que oscila entre 3 y 7%.



**Figura 2-48 Curvas de retención de humedad de la unidad Vb**

- o Propiedades químicas

El contenido de materia orgánica es alto a medio con valores promedios que oscilan entre 9.9 a .5, el pH varía de muy fuertemente ácido a extremadamente ácido (4.7 y 4.5), las saturaciones de bases son bajas, con valor promedio de 22.5%, la saturación de calcio, magnesio y sodio son bajas en toda la unidad con valores de 14.3, 4.0, 2.0%, respectivamente; la de potasio es baja a media, con valores que oscilan entre 2.0 y 3.4%, la de aluminio es alta con valores de 77.5%.

El fósforo es bajo a medio (<17.6ppm) al igual que el cobre y boro oscilando sus valores en 3.7, 0.3 y 0.05ppm, el hierro fluctúa de alto a medio con valores entre 48.0 a 26.68 ppm, el manganeso y zinc están en un promedio de bajo a medio (2.1-8.7 y 0.1-1.9pp m).

- ✓ Unidades de sobre vegas (S) y vegas actuales (E)

Las sobrevegas ocupan un área de 32.5 ha, lo que equivale al 3.0 % y las vegas actuales 9.7 ha, correspondiente al 0.9 de la zona estudiada. Son unidades que se encuentran paralelas al Río Orotoy y por su cercanía a esta importante corriente de agua no se utilizarán para el proyecto de riego por superficie.

➤ **Cálculo de requerimientos de agua y requerimientos de drenaje.**

En este aparte, se presentan las metodologías utilizadas para estimar los requerimientos de riego críticos del área de estudio y los requerimientos críticos de drenaje con base en las características edafoclimáticas de la zona.

La información edáfica fue tomada de la caracterización de suelos descrita anteriormente y la información climática se tomó de los registros históricos de la estación agro-climatológica del Centro de Investigación de La Libertad, localizado a 24km del área de estudio. Se escogió esta estación, considerando que es representativa de las condiciones del clima de la zona según el mapa de Isoyetas de la región, por tener una serie de registros diarios confiables y por ser la única

estación de tipo "AM" Agro-meteorológica cercana, lo cual indica que aparte de los registros pluviométricos cuenta con registro de otras variables importantes como evaporación, temperatura, humedad relativa, brillo solar, entre otras.

✓ Balance hídrico agrícola

Un balance hídrico agrícola requiere además de los datos de precipitación y evapotranspiración, la información hidrodinámica del tipo de suelo y profundidad efectiva del sistema radical del cultivo a establecer. Su cálculo contempla la utilización de valores de precipitación en función de la probabilidad de ocurrencia.

Su utilidad radica en determinar con buena precisión y los posibles requerimientos o excesos de agua que podría experimentar el cultivo, con lo cual es posible tomar decisiones de tipo técnico y económico para su establecimiento.

Los elementos de entrada y salida considerados en este estudio se resumen a continuación:

o Profundidad radicular efectiva

Se refiere a la profundidad del suelo en la cual se considera que se encuentran aproximadamente el 80% de las raíces de los cultivos a establecer. En este estudio, el valor se toma de 40cm, considerando que es la profundidad de intervención de los equipos de la branza y a donde se puede influenciar químicamente la fertilidad del suelo.

o Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo

La lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA), que se puntuó utilizar para la realización del balance hídrico, corresponde al 50% de la humedad existente entre capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). El primer valor oscila entre 0.1 y 0.3 atmósferas de tensión y el segundo corresponde al contenido de humedad a 15 atmosferas de presión.

o Precipitación

La precipitación se constituye en la variable más importante en la realización de un balance hídrico, porque es el elemento responsable de los mayores aportes de agua. Su magnitud y distribución son las que le confieren las principales características agroclimáticas a una zona determinada. Para este caso se cuenta con registro de precipitación de 18 años de la estación de meteorología ubicada en el C.I. La Libertad, ubicada en el pie de monte llanero y aproximadamente a 24km del área de estudio en línea recta.

o Precipitación efectiva

El método utilizado para el presente proyecto consiste en un método simple desarrollado por la FAO para obtener datos sobre las probabilidades de lluvia. Para su cálculo se procedió de la siguiente manera:

Se establecieron los valores de precipitación mensual para un periodo determinado.

Se organizaron en forma decreciente, dando a cada valor el número de orden correspondiente.

Se calculó la probabilidad de ocurrencia mediante la fórmula de Weibull:

$$P = \frac{100M}{N+1}$$

Dónde:

P = Probabilidad esperada (%)

M = Número de orden

N = Número de observaciones

Los datos de precipitación y probabilidad esperada del 75% se presentan en la **Tabla 2-40**.

**Tabla 2-40 Resultados del cálculo de la precipitación efectiva según la metodología propuesta por la FAO**

MES	DÉCADA	PRECIPITACIÓN PROB. 75%(MM)	PRECIPITACIÓN EFECTIVA(MM)
Enero	I	4.52	
	II	5.15	
	III	17.08	
Febrero	I	40.37	14.22
	II	35.02	11.01
	III	27.05	6.23
Marzo	I	46.08	17.65
	II	55.61	23.37
	III	75.57	35.46
Abril	I	131.90	80.52
	II	108.23	61.58
	III	198.66	133.93
Mayo	I	201.57	136.25
	II	154.73	98.78
	III	207.80	141.24
Junio	I	134.98	82.98
	II	184.00	122.20
	III	129.92	78.94
Julio	I	118.93	70.14
	II	106.75	60.40
	III	138.00	85.40
Agosto	I	100.19	55.15
	II	112.63	65.10
	III	94.31	50.45
Septiembre	I	103.43	57.74
	II	117.23	68.78
	III	82.80	41.24
Octubre	I	131.14	79.91
	II	106.79	60.43
	III	130.82	79.66
Noviembre	I	129.27	78.42
	II	94.74	50.79

MES	DÉCADA	PRECIPITACIÓN PROB. 75%(MM)	PRECIPITACIÓN EFECTIVA(MM)
	III	74.50	34.70
Diciembre	I	55.30	23.18
	II	29.88	7.93
	III	19.93	1.96
<b>TOTALES</b>		<b>3,504.88</b>	<b>2,015.75</b>

o Evapotranspiración

La evapotranspiración es la responsable de las salidas mayores en el balance hídrico. Su determinación en condiciones potenciales para un cultivo de referencia puede realizarse mediante diversos métodos que involucran ciertos datos climáticos-métodos de Blaney-Criddle, de la radiación, de Penman, entre otros o mediante el método del tanque de evaporación. (FAO,1976).

Para la determinación de la evapotranspiración potencial del cultivo (ET<sub>0</sub>), se trabajó con datos de evaporación según el método del tanque evaporímetro, metodología propuesta por la FAO en su publicación "Estudio FAO riego y drenaje # 56 evapotranspiración del cultivo":

$$ET_0 = E_{PAM} * K_p$$

Dónde:

ET<sub>0</sub>: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

K<sub>p</sub>: Coeficiente del tanque evaporímetro (adimensional)

E<sub>PAM</sub>: Evaporación del tanque evaporímetro (mm/dia)

El coeficiente del tanque es tomado como:

$$E_{PAM} = 0.85$$

La determinación de la evapotranspiración del cultivo, se utiliza la fórmula FAO

- Penman – Monteith:

$$ET_c = ET_0 * K_c$$

Dónde:

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

K<sub>c</sub>: Coeficiente del cultivo (adimensional)

ET<sub>0</sub>: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo, esta variable toma un papel muy importante en la ecuación de balance, pues limita la capacidad de almacenamiento del suelo tanto por abajo para definirlos déficits y elaborar un plan de riego, como por arriba para cuantificar los excesos y elaborar un plan de drenaje. Para este proyecto, se trabajó con una capacidad de almacenamiento de 10.07mm, ajustada a la información de suelos tomada en campo para una profundidad efectiva de 40cm-**Tabla 2-41**, correspondiente a un suelo de textura Franco arcillo arenosa que son las predominantes de la zona de estudio- 36 de 42 sitios muestreados.

**Tabla 2-41 Lamina rápidamente aprovechable**

TEXTURA	PROFUNDIDAD EFECTIVA (CM)	LAMINA DE AGUA APROVECHABLE (MM)	LAMINA DE AGUA RÁPIDAMENTE APROVECHABLE (MM)	SITIOS MUESTREADOS
Franco Arcillo Arenoso	40	20.14	10.07	36
Franco	40	15.12	7.56	2
Franco arenoso	40	18.69	9.35	3
Franco arcilloso	40	16.88	8.44	1

Una vez definidos los parámetros anteriores, se procede a realizar el balance a escala de caudal. En la siguiente tabla se presentan los resultados.

Tabla 2-42 Balance a escala decadal.

MES	DÉCADA	PRECIPITACIÓN PROB 75% (MM)	PRECIPITACIÓN EFECTIVA (MM)	EVAPORACIÓN (MM)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (MM) KC=0.85	ALMACENAMIENTO DE AGUA (MM)	DÉFICIT (MM)	EXCESOS (MM)
Enero	I	-	-	46.50	39.53		(39.53)	
	II	-	-	46.86	39.83		(39.83)	
	III	-	-	48.02	40.82		(40.82)	
Febrero	I	-	-	43.87	37.29		(37.29)	
	II	-	-	44.62	37.93		(37.93)	
	III	-	-	45.01	38.25		(38.25)	
Marzo	I	0.75	-	35.27	29.98		(29.98)	
	II	5.42	-	35.60	30.26		(30.26)	
	III	7.92	-	35.69	30.33		(30.33)	
Abril	I	72.07	33.24	32.84	27.91	5.33		
	II	53.21	21.92	32.94	28.00	-	(0.74)	
	III	84.85	42.88	32.62	27.73	10.07		5.08
Mayo	I	79.55	38.64	32.34	27.49	10.07		21.22
	II	52.10	21.26	32.04	27.24	4.09		
	III	107.95	61.36	31.95	27.16	10.07		38.30
Junio	I	76.01	35.60	29.37	24.96	10.07		10.64
	II	73.17	33.90	29.10	24.74	10.07		9.17
	III	70.25	32.15	28.61	24.32	10.07		7.83
Julio	I	49.08	19.45	29.24	24.85	4.67		
	II	60.46	26.28	29.15	24.78	6.17		
	III	28.57	7.14	29.44	25.02		(11.71)	
Agosto	I	55.79	23.47	35.50	30.18		(6.71)	
	II	34.57	10.74	34.88	29.65		(18.91)	
	III	25.31	5.19	34.44	29.28		(24.09)	
Septiembre	I	32.56	9.54	36.76	31.25		(21.71)	
	II	63.35	28.01	36.60	31.11		(3.10)	
	III	41.83	15.10	36.67	31.17		(16.07)	

MES	DÉCADA	PRECIPITACIÓN PROB 75% (MM)	PRECIPITACIÓN EFECTIVA (MM)	EVAPORACIÓN (MM)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (MM) KC=0.85	ALMACENAMIENTO DE AGUA (MM)	DÉFICIT (MM)	EXCESOS (MM)
Octubre	I	55.79	23.48	38.02	32.31		(8.84)	
	II	34.30	10.58	37.81	32.14		(21.56)	
	III	68.26	30.95	37.72	32.06		(1.11)	
Noviembre	I	27.65	6.59	36.89	31.36		(24.76)	
	II	25.34	5.20	36.89	31.36		(26.15)	
	III	16.94	0.17	37.03	31.48		(31.31)	
Diciembre	I	3.67	-	40.83	34.70		(34.28)	
	II	0.28	-	40.33	34.28		(34.28)	
	III	-	-	40.83	34.70		(34.70)	
<b>TOTALES</b>		<b>1,307.00</b>	<b>542.84</b>	<b>1,312.26</b>	<b>1,115.42</b>	<b>80.68</b>	<b>(644.25)</b>	<b>92.23</b>

El balance agrícola de caudal está mostrando que con una probabilidad del 75% cada dos años se puede presentar un déficit de 644.25mm lo cual indica la importancia del riego para cultivos de tardío rendimiento, principalmente por la irregular distribución de las lluvias y la baja capacidad de retención de agua de estos suelos. Siendo los meses de Diciembre, Enero, Febrero y Marzo los de mayor valor. Los meses de Mayo, Junio y Julio son los de mayores precipitaciones y excesos de agua.

Con el balance hídrico agrícola se determinó que la tercera década del mes de enero presenta la mayor demanda de agua asuplirconunvalorde40,82 mm equivalentes a 4.08mm/día, esta demanda es considerada como el requerimiento crítico neto día y por tanto el requerimiento bruto depende de la eficiencia del método de riego a implementar. A continuación se presenta un resumen de los requerimientos netos, es decir asumiendo una eficiencia de aplicación del 100% (Ver Tabla 2-43).

**Tabla 2-43 Resumen del cálculo de requerimiento crítico de riego**

REQUERIMIENTO DE RIEGO.	
Evapotranspiración máxima diaria (mm)	4.08
Jornada de riego(horas/día)	24.00
Consumo de agua por ha (m <sup>3</sup> /día)	40.8
Módulo de riego con 100% eficiencia (l/s-ha)	0.47

- ✓ Requerimientos críticos de drenaje

El drenaje agrícola se define como la evacuación del exceso de agua en el suelo. Para el proyecto, el drenaje es tan importante como el riego ya que en forma conjunta mantendrán en el suelo un ambiente propicio para el desarrollo de los diferentes cultivos a establecer. El exceso de humedad produce una reducción de contenido de oxígeno en el interior del suelo que disminuye la respiración de las raíces de la planta, la mineralización del nitrógeno, la absorción de agua y nutrientes, y propicia la formación de sustancias tóxicas.

Teniendo en cuenta las condiciones del drenaje de área de estudio, se sabe que los principales requerimientos de drenaje son de tipo superficial, por tanto será necesario determinar el coeficiente de drenaje superficial el cual a su vez depende del análisis de las variables climáticas como la precipitación, evapotranspiración, suelos y topografía. A continuación se presenta de manera simplificada las metodologías aplicadas para determinar el coeficiente de drenaje por unidad de área.

- o Lluvia crítica de diseño

El análisis de las lluvias en drenaje agrícola tiene como objetivo determinar la "lluvia crítica de diseño", con el fin de calcular la cantidad de agua que se debe evacuar. Para el efecto, se requiere información sobre las precipitaciones diarias a través de varios años, que permitan realizar un análisis de frecuencias y con base en él, seleccionar lluvias con períodos de retorno de 5 años para el caso de drenaje superficial.

Según el balance hídrico realizado con los datos de la estación La Libertad, usados para el presente estudio, se sabe que el periodo de mayores precipitaciones se presenta entre los meses de abril a octubre por lo cual se realizó un análisis diario de los eventos de lluvia de este periodo. Los datos usados para este análisis corresponden al periodo de 1986 a 1990 y de 1995 al 2007, 18 años en total con registros diarios confiables.

**Tabla 2-44 Análisis de frecuencia con base en intervalos de lámina de lluvia diaria. Datos obtenidos con base en los registros diarios multianuales del C.I La Libertad – Villavicencio**

INTERVALO DE LLUVIA (mm)		OBSERVACIONES (Nº)		FRECUENCIA DE EXCEDENCIA		PERIODO DE RETORNO	
Inferior (ai)	Superior (bi)	ai<P>bi (mi)	(mi/N)	F(P>ai) ; (Mi/N)	F(P<ai);1-F(P>ai)	Tai (días);1/(5)	Tai (años);(7)/293
1	2	3	4	5	6	7	8
0	10	4525	0.735	0.265	0.735	3.77	0.01
10	20	460	0.075	0.190	0.810	5.26	0.02
20	30	280	0.045	0.145	0.855	6.91	0.02
30	40	594	0.096	0.048	0.952	20.73	0.07
40	50	96	0.016	0.033	0.967	30.63	0.10
50	60	81	0.013	0.019	0.981	51.30	0.18
60	70	34	0.006	0.014	0.986	71.58	0.24
70	80	31	0.005	0.009	0.991	111.93	0.38
80	90	19	0.003	0.006	0.994	171.00	0.58
90	100	13	0.002	0.004	0.996	267.65	0.91
100	110	7	0.001	0.003	0.997	384.75	1.31
110	120	4	0.001	0.002	0.998	513.00	1.75
120	130	6	0.001	0.001	0.999	1,026.00	3.50
130	140	4	0.001	0.000	1	3,078.00	10.51
140	150	1	0.000	0.000	1	6,156.00	21.01
150	160	1	0.000	0.000	1		
	N=	6156					

Una vez realizado el análisis anterior, se seleccionó la lluvia de diseño. Para drenaje superficial se escoge la lluvia correspondiente a un periodo de retorno de 5 años. En este caso los resultados no arrojaron el valor directamente por lo cual hubo la necesidad de realizar una interpolación por regresión lineal simple entre los períodos de retorno de 3.5y 10.5 años que dieron como valores 120 y 140mm respectivamente; el resultado de esta interpolación fue un valor de lluvia de diseño de 124mm. Valor que será usado como la lluvia crítica de diseño.

- o Escorrentía de diseño

La escorrentía es el excedente de aguas lluvias que recibe una zona o área determinada denominada cuenca hidrográfica, normalmente se estima como el resultado de la precipitación menos la infiltración en el suelo y la evaporación.

El valor de CN se debe extraer de la **Tabla 2-45**, que contempla el tipo de uso y laboreo que va a tener el suelo, a la vez, la tabla depende de la **Tabla 2-46**, que describe los grupos hidrológicos de la zona de estudio teniendo como objeto tener en cuenta las condiciones de infiltración y el tipo de suelo del área de estudio.

**Tabla 2-45 Valores CN para el cálculo de escorrentía**

COBERTURA DEL SUELO CLASE	LABOREO	CONDICIONES HIDROLÓGICAS	NÚMERO DE CURVA			
			A	B	C	D
Cultivos alineados	Recto	Pobres	77	86	91	94
	Contorno	Pobres	70	79	84	88

COBERTURA DEL SUELO CLASE	LABOREO	CONDICIONES HIDROLÓGICAS	NÚMERO DE CURVA			
			A	B	C	D
Cultivo alineados o con surcos pequeños	Recto	Pobres	65	76	84	88
	Contorno y Terrazas	Pobres	61	72	79	82
	Contorno y Terrazas	Buenas	59	70	78	81
Cultivo densos de leguminosas o prados en alternativa	Recto	Pobres	66	77	84	88
	Contorno	Pobres	64	75	83	85
	Contorno y Terrazas	Buenas	51	57	76	80
Pastizales (pastos naturales)	Contorno	Pobres	47	67	81	88
	Contorno	Regulares	25	59	75	83
Montes con pastos (ganadero-forestal)		Pobres	45	66	77	83
		Regulares	36	60	73	79
Bosques (forestales)		Pobres	46	68	78	84
		Regulares	36	60	70	76
		Buenas	26	52	63	69

Para el caso del proyecto se trabajó con un valor de curva número de 52 ponderando las diversas condiciones que implican las diversas especies seleccionadas para el estudio.

Teniendo en cuenta que el terreno por sus condiciones edáficas y bajo condiciones mejoradas, presentará moderadamente bajo potencial de escorrentía se realizaron los cálculos de escorrentía asumiendo un grupo.

**Tabla 2-46 Descripción de grupos hidrológicos para el cálculo de escorrentía**

GRUPO	DESCRIPCIÓN
A	Bajo potencial de escorrentía. Suelos que tienen altas tasas de infiltración aun cuando están bien mojados, consistentes principalmente en arenas o gravas profundas y bien a excesivamente drenados. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.
B	Moderadamente bajo potencial de escorrentía. Suelos con tasas de infiltración moderadas cuando están bien mojados, moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien a bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua moderada.
C	Moderadamente alto potencial de escorrentía. Suelos con tasas de infiltración lentas cuando están bien mojados, principalmente con una capa que impide el movimiento hacia abajo del agua, o de textura moderadamente fina a fina y una tasa de infiltración lenta. Estos suelos tienen una tasa lenta de transmisión de agua.
D	Alto potencial de escorrentía. Suelos que tienen tasas de infiltraciones muy lentas principalmente suelos arcillosos con un alto potencial de expansión; suelos con nivel freático D alto; suelos con claypan o capa arcillosa en la superficie o cercana a ella; y suelos poco profundos sobre materiales casi impermeables. Estos suelos tienen una tasa muy lenta de transmisión de agua.

- o Tiempo de drenaje

El tiempo de drenaje es el periodo de tiempo empleado para evacuar los excesos de humedad en el suelo hasta que alcance un punto aireación mínimo del 10% y a su vez antes que el cultivo experimente daños considerables por efecto de ahogamiento de raíces.

**Tabla 2-47 Tiempo de aireación en horas, requerido para diferentes texturas de suelo**

TEXTURA	t8	t10	t15
Arena	1.3	2.0	4.1
Arena fina	2.0	3.0	6.9
Franco arenoso	6.3	10.8	29.8
Franco	11.2	20.2	61.3
Franco limoso	19.3	36.7	122.2
Franco arcilloso arenoso	10.2	18.4	55.0
Franco arcilloso	9.5	16.9	49.9
Franco arcilloso limoso	18.4	34.9	115.4
Arenoso Franco	4.4	7.3	19.0
Arcillo limoso	16.0	29.9	96.3
Arcilloso	31.9	63.6	230.8

En este caso se consideró que la textura del suelo predominante es de tipo Franco arcillo Arenoso para lo cual corresponde un tiempo de 18.4 h.

- o Caudal de diseño

El caudal de diseño es la cantidad de agua que debe evacuarse en un tiempo determinado de manera que se impida el daño de los cultivos por falta de oxígeno en la zona radicular del cultivo; el caudal de diseño es el producto de la escorrentía en 24 horas por el coeficiente de drenaje de la zona.

El coeficiente de drenaje se calculó por medio de la ecuación de Stephen & Mills, por medio de este se obtuvo que el drenaje superficial de 4.6Lps/ha, al cual se debe sumar el módulo de riego teniendo en cuenta que las obras de drenaje deberán tenerla capacidad de evacuar en estado crítico el total del volumen de agua de riego más el total del volumen de agua de escorrentía generada por la lluvia crítica. Este coeficiente será utilizado para calcular el caudal requerido por cada uno de los drenajes según sus áreas de influencia.

➤ **Selección del método de riego y sus parámetros técnicos**

Para la disposición de aguas tratadas de la producción del petróleo en la menor área posible, se hace necesario adoptar un método de riego que se pueda implementar bajo criterios de baja eficiencia de aplicación aprovechando las condiciones edáficas y climáticas del área. Para este propósito y con base en las experiencias de Corpocaja, en el área actual del proyecto, se planteó la implementación del método de riego por melgas rectangulares, cuyo principio se basa en la irrigación de la superficie del suelo mediante la generación de escorrentía controlada por la aplicación de caudales máximos no erosivos sobre una franja de terreno con el propósito de mantener los contenidos de agua requeridos por las diferentes especies a cultivar (Ver Figura 2-49).



**Figura2-49 Método de riego por melgas rectangulares**

Para la conducción y distribución de agua en el sistema de riego, se propone la construcción de canales en tierra con el fin de favorecer las perdidas por infiltración, contrario a lo que ocurre en los proyectos agrícolas convencionales en este proyecto se plantea el diseño de canales de riego con secciones transversal amplias para obtener la mayor infiltración posible. Algunos tramos donde la pendiente puede ser erosiva, será necesaria la construcción de canales con recubrimiento de concreto. La definición de estos tramos específicos dependerá de un diseño detallado de ingeniería.

- ✓ Caudal máximo no erosivo

Para definir el caudal por melga se tomó un ancho de melga de 4.5 m, que corresponde al diseño del sistema de siembra típico de las coberturas forestales y palma de aceite y una longitud máxima de 200 m, con el fin de lograr una baja eficiencia de aplicación y menores costos en la implementación de la infraestructura.

Para el cálculo de este caudal se utilizó la metodología propuesta por Villalobos Marvin (2005) que relacionado la lámina a aplicar con la permeabilidad de los suelos.

Para el proyecto se tomó una permeabilidad de 0.75 cm/hr por considerar que es la permeabilidad que debe tener el suelo después de una labor de cincelado que descompactó el suelo, información validada con los datos de permeabilidad obtenidos en el área actual del proyecto luego del laboreo con cincel.

Considerando lo anterior y teniendo en cuenta una lámina de riego de 10.07 mm (LARA en suelos de textura franco arcillo arenosa) se determinó un caudal unitario de riego es de 1.25 lps/100 m<sup>2</sup> de melga.

Caudal por melga (lps)= Caudal unitario de riego x ancho de melga x longitud de melga

$$\text{Caudal por melga} = 1.25 \text{ lps}/100\text{m}^2 \times 4.5 \text{ m} \times 200 \text{ m}$$

$$\text{Caudal por melga} = 11.25 \text{ lps.}$$

✓ Eficiencia de aplicación

De acuerdo a la experiencia actual, se ha encontrado un tiempo de avance promedio de 20 minutos para longitudes de melga de 50 m, teniendo en cuenta esta experiencia y la longitud del proyecto se infiere un tiempo de avance de 1.3 horas para una longitud de 200 m.

Con este tiempo de avance y un numero de 6.41 melgas por ha (según el diseño una hectárea corresponde a 50 m de ancho y 200 m de longitud de línea de siembra, suponiendo una distancia de línea de cultivos de 7.8 m distancia, como el caso de la palma de aceite se tendría un número de 6.41 melgas por (ha), se estaría aplicando una lámina bruta de 34.62 mm.

Lamina bruta "Lb" (mm)= Caudal por melga (lps)\*tiempo de avance (hr)\*3600\*#melgas por ha/10.000.

$$Lb = 11.25 \text{ lps} * 1.33 * 3600 * 6.41 / 10000$$

$$Lb = 34.62 \text{ mm.}$$

Eficiencia de aplicación "Ea" (%)= LARA/Lamina bruta\*100

$$Ea = 10.07 \text{ mm} / 34.62 \text{ mm} * 100$$

$$Ea = 29.09\%$$

Es así que de acuerdo a los criterios anteriormente descritos y teniendo en cuenta las áreas de exclusión definidas para el proyecto, se presenta a continuación las áreas y volúmenes a manejar en el área del proyecto, distribuidas en 6 diferentes zonas o distritos establecido teniendo en cuenta la topografía del terreno, la pendiente y las facilidades para el manejo y distribución del agua.

**Tabla 2-48 Volúmenes de aguas por distrito de riego**

DISTRITO	ÁREA TOTAL ha	ÁREA NETA ha SIN LAGUNAS	CAUDAL (LPS)	VOLUMEN (BWPD)
1	125.58	121.8	658	357,440
2	126.33	122.5	662	359,574
3	88.92	86.3	466	253,094
4	119.1	115.5	624	338,995
5	55.17	53.5	289	157,031
6	48.15	46.7	252	137,050
<b>TOTAL</b>	<b>563.25</b>	<b>546.4</b>	<b>2950</b>	<b>1,603,184</b>

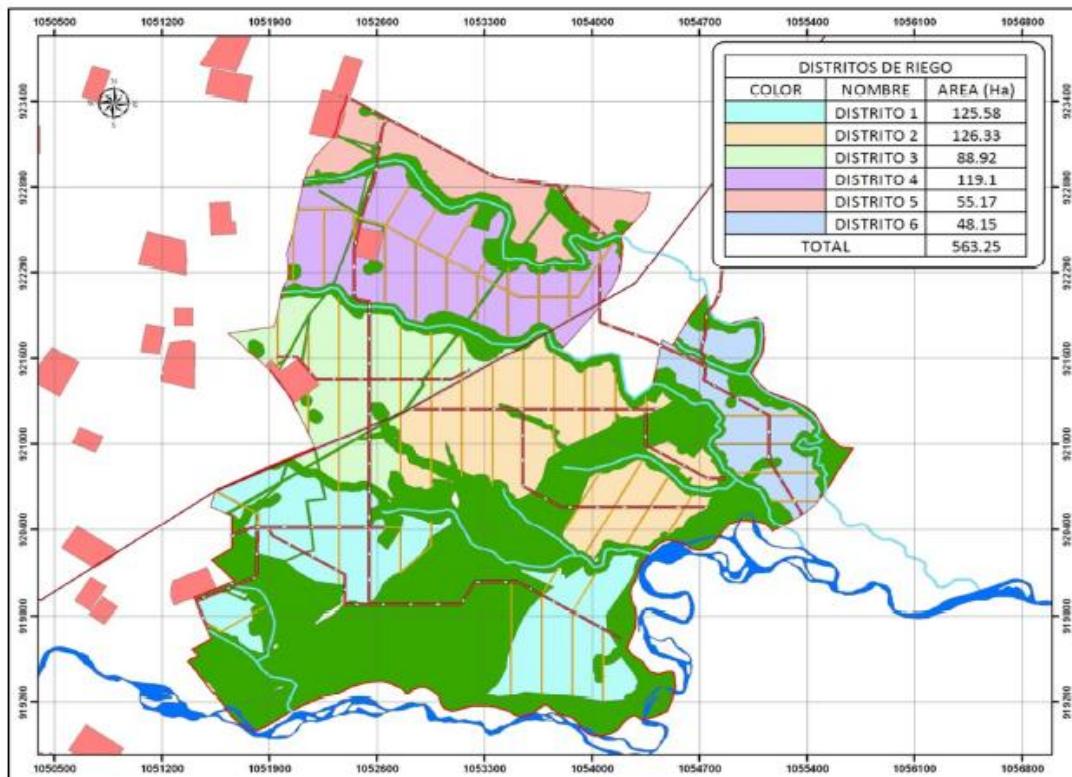
➤ **Trazado geométrico de infraestructura de riego y drenaje**

De acuerdo a la distribución presentada anteriormente, se realizó el trazado de los canales principales de riego, teniendo en cuenta las curvas de nivel obtenidas del modelo digital de elevación, la ubicación de la línea de vertimiento de las aguas tratadas de producción, las líneas de flujo de escorrentía (parte aguas) y la infraestructura petrolera y agropecuaria existente.

Con la información anterior, se procedió a definir el ancho máximo de los lotes (longitud de melga), de acuerdo a la pendiente del terreno y a la textura del suelo (textura media a gruesa), con el fin de establecer el ancho ideal, se consideró 200 metros como la longitud más apropiada para el proyecto y se determinó un tamaño máximo de lote de 10 ha, esto con el criterio logístico de controlar los avances diarios de riego—se estima que una persona entrenada de riego por superficie puede operar el riego de 10 ha en una jornada laboral de 8 horas.

Finalmente, se trazaron canales secundarios de riego que se ubicaron en la zona de mayor cota de los lotes y los canales secundarios de drenaje localizados en la zona de cota más baja, los canales de drenaje principales se trazaron paralelos a los cauces naturales, con el fin de entregarlos excedentes de agua a unas lagunas de regulación y evitar el escorrimento directo a los cauces naturales. Para estimar el tamaño de las lagunas, se utilizó un indicador realizado por Corpoica en el área actual del proyecto el cual indica que por cada hectárea de cultivo se debe manejar 300m<sup>2</sup> de espejo de agua.

Con la información derivada de este trazo se identificaron seis sectores de riego áreas beneficiadas por canales principales, estos sectores deben contar con un punto de suministro de agua en condiciones de vertimiento, que esté ubicado en la cota de elevación más alta de cada sector para de esta manera conducir las aguas por acción única de la gravedad. En la siguiente figura se ilustran los distritos seleccionados. En la **Tabla 2-49**, se relaciona el área de cada uno de los sectores definidos.



**Figura 2-50 Trazado de sectores de riego, canales principales de riego y ubicación de la infraestructura petrolera actual**

**Tabla 2-49 Área neta de cada distrito**

DISTRITO #	ÁREA
1	125.58
2	126.33
3	88.92
4	119.1
5	55.17
6	48.15

DISTRITO #	ÁREA
TOTAL	563.25

Las áreas netas presentadas en la tabla anterior fueron calculadas luego de descontar las áreas ocupadas por la infraestructura diseñada, es decir que corresponden a las extensiones disponibles para el establecimiento de los diferentes cultivos.

Como resultado final del trazado geométrico de infraestructura se cuentan con planos del trazado de la totalidad de la infraestructura del proyecto y planos parciales con la infraestructura de cada distrito.

Otro resultado relevante del trazado geométrico, consiste en los indicadores de diseño los cuales permiten establecer los requerimientos de infraestructura por unidad de área. A continuación se presentan estos indicadores.

- ✓ Indicadores del trazado geométrico

El trazado de la infraestructura, incluyó el cálculo de indicadores de áreas así como los indicadores de infraestructura de riego, drenaje y vías para el total del proyecto y para cada distrito. En las siguientes tablas se resumen estos índices.

**Tabla 2-50 Indicadores generales de vías y canales de riego y drenaje. Valores calculados con base en el área neta**

DESCRIPCIÓN	LONGITUD	Nº CANALES	INDICADOR (m/ha)
<b>Canales de Riego</b>			
Primarios	16850.5	9	29.92
Primarios revestidos en concreto	942.59	3	1.67
Secundarios	25797.68	82	45.80
<b>TOTAL</b>	<b>44533.39</b>	<b>94</b>	<b>78.73</b>
<b>Canales de Drenaje</b>			
Primarios	29510.3	18	52.39
Secundarios	26016.08	81	46.19
<b>TOTAL</b>	<b>55526.38</b>	<b>99</b>	<b>98.58</b>
<b>Vías</b>			
Primarias	22250.7	12	39.50
Secundarias	23624.89	52	41.94
<b>TOTAL</b>	<b>45875.59</b>	<b>75</b>	<b>81.45</b>

**Tabla 2-51 Indicadores generales de obras de arte**

DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Obras de captación.	6
Lagunas de regulación de drenajes.	15
Partidores de Caudal.	43
Compuertas de riego (Trinchos)	1524
Cruce de cauces naturales.	2
Disipadores de energía en lagunas de regulación.	15

- o Distrito No 1

El área neta del distrito son 125.58 ha

**Tabla 2-52 Indicadores de infraestructura distrito 1**

DESCRIPCIÓN	LONGITUD	INDICADOR (Mt/ha)
<b>Canales de Riego</b>		
Primarios	5635.01	44.87
Secundarios	5334.78	42.48
<b>TOTAL</b>	<b>10969.79</b>	<b>87.35</b>
<b>Canales de Drenaje</b>		
Primarios	7722.14	61.49
Secundarios	4995.84	39.78
<b>TOTAL</b>	<b>12717.8</b>	<b>101.27</b>
<b>Vías</b>		
Primarias	5786.53	46.07
Secundarias	5860.92	46.67
<b>TOTAL</b>	<b>11647.45</b>	<b>92.8</b>

**Tabla 2-53 Indicadores de obras de arte para el distrito 1**

OBRAS	UNIDADES
Captación	1
Descarga (Lagunas)	5
Partidores De Caudal	9
Trinchos	381
Cruce De Drenajes Naturales	1

- o Distrito No 2

El área neta del distrito son 126.33 ha

**Tabla 2-54 Indicadores de infraestructura distrito 2.**

DESCRIPCIÓN	LONGITUD	INDICADOR (Mt/ha)
<b>Canales de Riego</b>		
Primarios	4150.49	32.85
Secundarios	6769.59	53.58
<b>TOTAL</b>	<b>10920.08</b>	<b>86.44</b>
<b>Canales de Drenaje</b>		
Primarios	6874.91	54.42
Secundarios	6598.92	52.23
<b>TOTAL</b>	<b>13473.83</b>	<b>106.65</b>
<b>Vías</b>		
Primarias	4229.9	33.48
Secundarias	6256.92	49.52
<b>TOTAL</b>	<b>10486.82</b>	<b>83.01</b>

**Tabla 2-55 Indicadores de obras de arte para el distrito**

OBRAS	UNIDADES
Captación	1
Descarga (lagunas)	3
Partidores de caudal	13
Trinchos	350
Cruce de drenajes naturales	2

o Distrito No 3

El área neta del distrito son 88.92ha

**Tabla 2-56 Indicadores de infraestructura distrito 3.**

DESCRIPCIÓN	LONGITUD	INDICADOR (Mt/ha)
<b>Canales de Riego</b>		
Primarios	1341.33	15.08
Secundarios	5299.66	59.60
<b>TOTAL</b>	<b>6640.99</b>	<b>74.68</b>
<b>Canales de Drenaje</b>		
Primarios	3668.94	41.26
Secundarios	5378.2	60.48
<b>TOTAL</b>	<b>9047.14</b>	<b>101.74</b>
<b>Vías</b>		
Primarias	2589.21	29.12
Secundarias	3890.86	43.76
<b>TOTAL</b>	<b>6480.07</b>	<b>72.88</b>

**Tabla 2-57 Indicadores de obras de arte para el distrito 3**

OBRAS	UNIDADES
Captación	1
Descarga (lagunas)	1
Partidores de caudal	7
Trinchos	293
Cruce de drenajes naturales	0

o Distrito No 4

El área neta del distrito son 119.1 ha

**Tabla 2-58 Indicadores de infraestructura distrito 4.**

DESCRIPCIÓN	LONGITUD	INDICADOR (Mt/ha)
<b>Canales de Riego</b>		
Primarios	2446.89	19.67

DESCRIPCIÓN	LONGITUD	INDICADOR (Mt/ha)
Secundarios	5933.42	47.71
<b>TOTAL</b>	<b>8380.31</b>	<b>67.38</b>
<b>Canales de Drenaje</b>		
Primarios	6436.21	51.75
Secundarios	5909.88	47.52
<b>TOTAL</b>	<b>12346.09</b>	<b>99.27</b>
<b>Vías</b>		
Primarias	3841.09	30.88
Secundarias	5472.23	44.00
<b>TOTAL</b>	<b>9313.32</b>	<b>74.88</b>

**Tabla 2-59 Indicadores de obras de arte para el distrito 4**

OBRAS	UNIDADES
Captación	1
Descarga (lagunas)	1
Partidores de caudal	10
Trinchos	306
Cruce de drenajes naturales	0

- o Distrito No 5

El área neta del distrito son 55.17 ha

**Tabla 2-60 Indicadores de infraestructura distrito 5.**

DESCRIPCIÓN	LONGITUD	INDICADOR (Mt/ha)
<b>Canales de Riego</b>		
Primarios	1990.27	36.08
Secundarios	620.62	11.25
<b>TOTAL</b>	<b>2610.89</b>	<b>47.32</b>
<b>Canales de Drenaje</b>		
Primarios	3147.85	57.06
Secundarios	416.07	7.54
<b>TOTAL</b>	<b>3563.92</b>	<b>64.6</b>
<b>Vías</b>		
Primarias	2346.41	42.53
Secundarias	0	0.00
<b>TOTAL</b>	<b>2346.41</b>	<b>42.53</b>

**Tabla 2-61 Indicadores de obras de arte para el distrito 5**

OBRAS	UNIDADES
Captación	1

OBRAS	UNIDADES
Descarga (lagunas)	2
Partidores de caudal	0
Trinchos	99
Cruce de drenajes naturales	0

- o Distrito No 6

El área neta del distrito son 48.15 ha

**Tabla 2-62 Indicadores de infraestructura distrito 6.**

DESCRIPCIÓN	LONGITUD	INDICADOR (Mt/ha)
<b>Canales de Riego</b>		
Primarios	2228.43	46.28
Secundarios	1839.59	38.21
<b>TOTAL</b>	<b>4068.02</b>	<b>84.49</b>
<b>Canales de Drenaje</b>		
Primarios	1660.23	34.48
Secundarios	2717.27	56.43
<b>TOTAL</b>	<b>4377.5</b>	<b>90.91</b>
<b>Vías</b>		
Primarias	3457.59	71.81
Secundarias	2145.85	44.57
<b>TOTAL</b>	<b>5603.44</b>	<b>116.37</b>

**Tabla 2-63 Indicadores de obras de arte para el distrito 6**

OBRAS	UNIDADES
Captación	1
Descarga (lagunas)	2
Partidores de caudal	4
Trinchos	95
Cruce de drenajes naturales	0

#### ➤ Parámetros de ingeniería para el dimensionamiento hidráulico de la infraestructura

Para determinar los volúmenes de agua requeridos para el sistema de riego se debe tener en cuenta el consumo máximo de agua diario (método del balance hídrico agrícola de caudal), el método de riego a implementar (Para el caso melgas rectangulares), la eficiencia en el transporte del agua y la eficiencia en la aplicación.

En la determinación de la eficiencia de un sistema de riego se debe identificar aquellos factores que afectan este parámetro, como la filtración en los canales de riego, las pérdidas por escorrentía superficial, la evaporación, la irregularidad del terreno, la longitud de las líneas de riego y la presencia de gravas o la existencia de suelos superficiales que aumentan el riesgo de incrementar las pérdidas por percolación profunda.

Para calcular la eficiencia de conducción y aplicación de los sectores de riego se tuvo en cuenta la permeabilidad de los suelos (31 mm/hr para suelos de textura media a gruesa), una escorrentía superficial del 27% con relación al caudal de transporte y una evaporación correspondiente al valor máximo arrojado por el balance hídrico.

La eficiencia de aplicación se calculó teniendo en cuenta un tiempo de avance de 1.3 horas y un caudal por melga de 11, 25 lps; con este caudal se estarían aplicando cerca de 34.5 mm por línea de siembra, de acuerdo a ello, la eficiencia de aplicación es el resultado de dividir lámina rápidamente aprovechable del suelo (10.07 mm) por la lámina aplicada (34.5 mm) multiplicado por 100.

En la **Tabla 2-64**, se muestra la eficiencia de conducción, distribución y aplicación de cada sector de riego, aplicando la metodología anterior.

**Tabla 2-64 Eficiencia de riego por distrito de riego**

DISTRITO	EFICIENCIA DE DISTRIBUCIÓN (ED) (%)	EFICIENCIA DE CONDUCCIÓN (EC) (%)	EFICIENCIA DE APLICACIÓN (EA) (%)
1	19%	59%	29.16
2	26%	48%	29.16
3	38%	68%	29.16
4	35%	65%	29.16
5	100%*	62%	29.16
6	80%	60%	29.16
<b>Eficiencia Promedio</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>	<b>29.16</b>

- ✓ Módulo de riego

Para calcular el módulo de riego se dividió el módulo determinado por el balance hídrico de cada (Ver **Tabla 2-65**), por la eficiencia promedio de los distritos de riego:

$$\text{Módulo de riego del sistema (lps/ha)} = \text{Modulo de riego (100% eficiencia)} / (ED * EC * EA.)$$

**Tabla 2-65 Modulo de riego del sistema**

MODULO DE RIEGO	
Caudal 100% eficiencia (lps)	0.47
Eficiencia del sistema (%)	8.7
Módulo de riego del sistema (lps/ha)	5.4

- ✓ Módulo de drenaje

El módulo de drenaje se calculó sumando el coeficiente de drenaje (4.6 lps/ha) y el módulo de riego (5.4 lps/ha), considerada la condición más crítica de operación del sistema que ocurre en días con intensas lluvias, donde el sistema debe evacuar los excesos de agua producidos por las lluvias y el agua tratada de producción entregado a los sectores de riego, para este caso el módulo de diseño de las obras de drenaje es de 10 lps/ha.

**Tabla 2-66 Volúmenes de agua a drenar por distrito bajo condición más crítica**

DISTRITO	ÁREA TOTAL ha	ÁREA NETA ha SIN LAGUNAS	CAUDAL (LPS)	VOLUMEN (BAPD)
1	125.58	121.8	1218	661,857
2	126.33	122.5	1225	665,660
3	88.92	86.3	863	468,951
4	119.1	115.5	1155	627,623
5	55.17	53.5	535	290,717
6	48.15	46.7	467	253,766
<b>TOTAL</b>	<b>563.25</b>	<b>546.4</b>	<b>5463</b>	<b>2,968,574</b>

- ✓ Volúmenes de agua por distrito

Teniendo en cuenta el módulo de riego calculado para el sistema y el área de cada sector de riego, se determinó el caudal a disponer restando al área del distrito el correspondiente a las lagunas de regulación y monitoreo de agua, tomando como base un área de laguna de 300 metros cuadrados por ha drenada como se indicó anteriormente, parámetro que fue utilizado para el diseño del sistema de drenaje de la estación experimental de Acacias (CPA).

**Tabla 2-67 Volúmenes de aguas por distrito de riego**

DISTRITO	ÁREA TOTAL ha	ÁREA NETA ha SIN LAGUNAS	CAUDAL (LPS)	VOLUMEN (BAPD)
1	125.58	121.8	658	357,440
2	126.33	122.5	662	359,574
3	88.92	86.3	466	253,094
4	119.1	115.5	624	338,995
5	55.17	53.5	289	157,031
6	48.15	46.7	252	137,050
<b>Total</b>	<b>563.25</b>	<b>546.4</b>	<b>2950</b>	<b>1,603,184</b>

#### ➤ Diseño hidráulico de obras principales

Para el caso de este proyecto, se considera que las pendientes del terreno (entre 2 y 4% para el área seleccionada) es una limitante en el transporte del agua por gravedad, ante la necesidad de manejar los caudales requeridos con canales en tierra. Se considera que los canales estén recubiertos de vegetación y disipadores de energía que garanticen una velocidad adecuada del agua (flujo subcrítico).

Para el cálculo de las secciones de los canales de riego y drenaje en tierra se utilizó una rugosidad (n) de 0.035, que corresponde a un canal recto con una población alta de hierbas para este caso se considera que los canales podrían ser revegetalizados con cobertura de *Braquiaria Humidicola*, para disminuir la velocidad del agua, dado que las pendientes del terreno que superan el 1%.

Para canales en hormigón se utilizará una rugosidad de 0.012.

**Tabla 2-68 Rugosidades (n) por superficie**

SUPERFICIE	OPTIMO	BUENO	PASABLE	MALO
Canales recubiertos de hormigón	0.012	0.014	0.016	0.018

SUPERFICIE	OPTIMO	BUENO	PASABLE	MALO
Canales en tierra rectos y uniformes	0.017	0.025	0.0225	0.025
Canales con fondo en tierra y hierbas en las paredes	0.025	0.03	0.035*	0.04
* Valores corrientes utilizados en los proyectos.				

\*Fuente Israelsen & Halsen 1973

Para el cálculo de caudal en los canales de riego se utilizó el área a beneficiar multiplicado por el módulo de riego de 5.4lps/ha, para los caudales de los canales de drenaje se utiliza un módulo de drenaje de 10lps/ha multiplicado por el área de captación del canal.

- ✓ Obras de arte
  - o Sección típica canal principal de riego en tierra

Lugar: <b>Acacias - Meta</b> Tramo: <b>Distrito 3</b>	Proyecto: <b>SGI Ecopetrol</b> Revestimiento: <b>Tierra</b>																														
<b>Datos:</b> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Caudal (Q):</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"><b>0.5255</b></td> <td style="width: 60%;">m<sup>3</sup>/s</td> </tr> <tr> <td>Ancho de solera (b):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.5</b></td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>Talud (Z):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.5</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rugosidad (n):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.03</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Pendiente (S):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.002</b></td> <td>m/m</td> </tr> </table>		Caudal (Q):	<b>0.5255</b>	m <sup>3</sup> /s	Ancho de solera (b):	<b>0.5</b>	m	Talud (Z):	<b>0.5</b>		Rugosidad (n):	<b>0.03</b>		Pendiente (S):	<b>0.002</b>	m/m															
Caudal (Q):	<b>0.5255</b>	m <sup>3</sup> /s																													
Ancho de solera (b):	<b>0.5</b>	m																													
Talud (Z):	<b>0.5</b>																														
Rugosidad (n):	<b>0.03</b>																														
Pendiente (S):	<b>0.002</b>	m/m																													
<b>Resultados:</b> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Tirante normal (y):</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"><b>0.8244</b></td> <td style="width: 40%;">m</td> <td style="width: 50%;">Perímetro (p):</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"><b>2.3435</b></td> <td style="width: 40%;">m</td> </tr> <tr> <td>Área hidráulica (A):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.7521</b></td> <td>m<sup>2</sup></td> <td>Radio hidráulico (R):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.3209</b></td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>Espejo de agua (T):</td> <td style="text-align: center;"><b>1.3244</b></td> <td>m</td> <td>Velocidad (v):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.6987</b></td> <td>m/s</td> </tr> <tr> <td>Número de Froude (F):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.2961</b></td> <td></td> <td>Energía específica (E):</td> <td style="text-align: center;"><b>0.8493</b></td> <td>m-Kg/Kg</td> </tr> <tr> <td>Tipo de flujo:</td> <td colspan="5" style="text-align: center;"><b>Subcrítico</b></td> </tr> </table>		Tirante normal (y):	<b>0.8244</b>	m	Perímetro (p):	<b>2.3435</b>	m	Área hidráulica (A):	<b>0.7521</b>	m <sup>2</sup>	Radio hidráulico (R):	<b>0.3209</b>	m	Espejo de agua (T):	<b>1.3244</b>	m	Velocidad (v):	<b>0.6987</b>	m/s	Número de Froude (F):	<b>0.2961</b>		Energía específica (E):	<b>0.8493</b>	m-Kg/Kg	Tipo de flujo:	<b>Subcrítico</b>				
Tirante normal (y):	<b>0.8244</b>	m	Perímetro (p):	<b>2.3435</b>	m																										
Área hidráulica (A):	<b>0.7521</b>	m <sup>2</sup>	Radio hidráulico (R):	<b>0.3209</b>	m																										
Espejo de agua (T):	<b>1.3244</b>	m	Velocidad (v):	<b>0.6987</b>	m/s																										
Número de Froude (F):	<b>0.2961</b>		Energía específica (E):	<b>0.8493</b>	m-Kg/Kg																										
Tipo de flujo:	<b>Subcrítico</b>																														

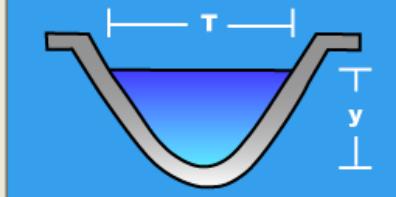
**Figura 2-51 Ficha de cálculo (HC canales)**

- o Sección típica para canal secundario de riego

Lugar:	Acacias - Meta	Proyecto:	SGI ECOPETROL
Tramo:	Canal Secundario Riego	Revestimiento:	Tierra

**Datos:**

Caudal (Q):	0.1	m <sup>3</sup> /s
Espejo de agua (T):	1	m
Rugosidad (n):	0.035	
Pendiente (S):	0.002	m/m

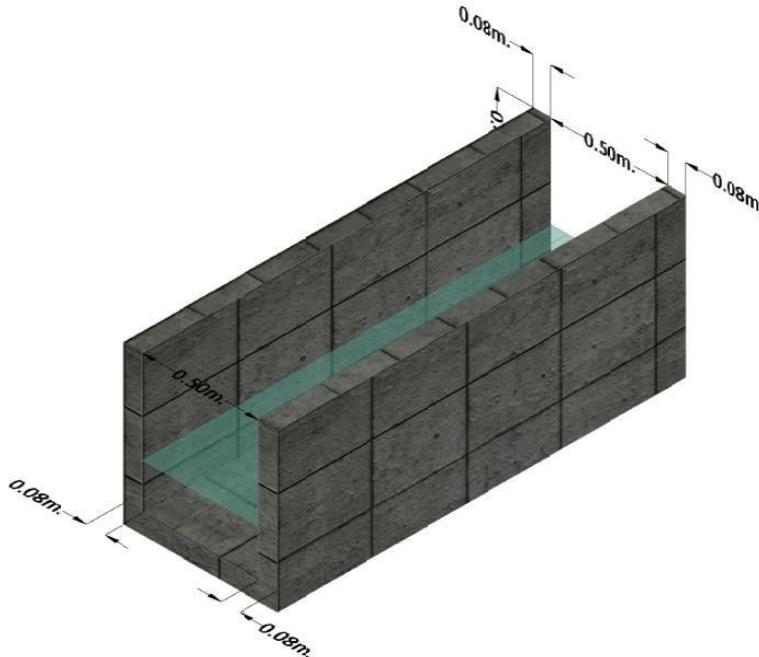


**Resultados:**

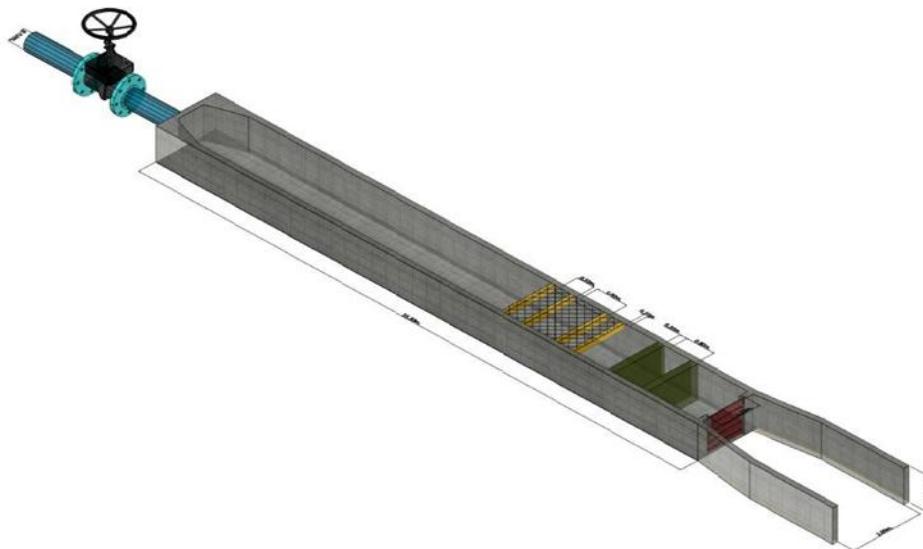
Tirante normal (y):	0.3588	m	Perímetro (p):	1.2781	m
Área hidráulica (A):	0.2392	m <sup>2</sup>	Radio hidráulico (R):	0.1871	m
Foco de la parábola (k):	0.3484	m	Velocidad (v):	0.4181	m/s
Número de Froude (F):	0.2729		Energía específica (E):	0.3677	m-Kg/Kg
Tipo de flujo:	Subcrítico				

**Figura 2-52 Ficha de calculo (HC Canales)**

- o Sección típica para canal de riego principal en concreto

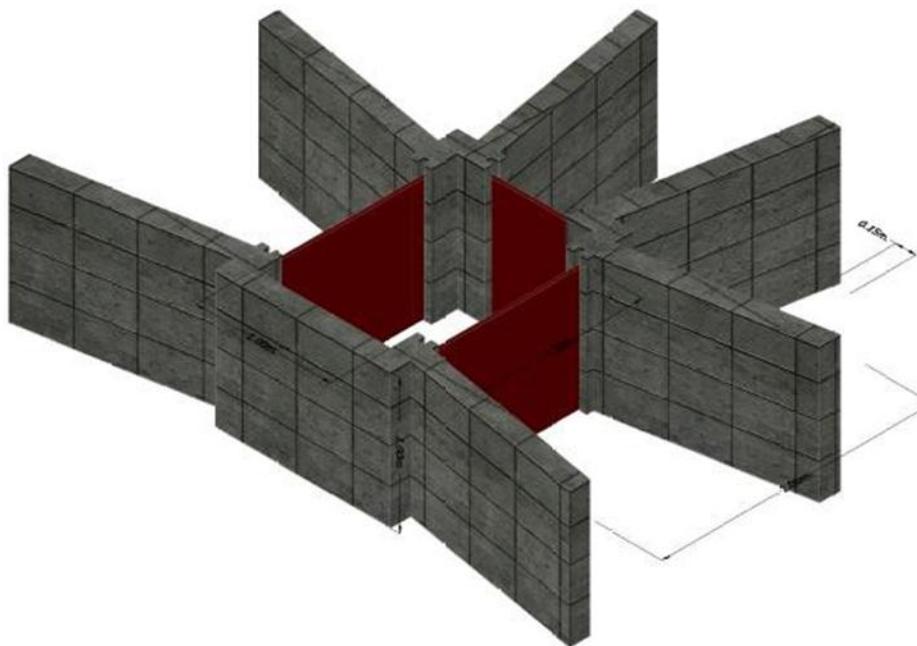

**Figura 2-53 Sección de riego principal revestido**

- o Estructura de captación de aguas



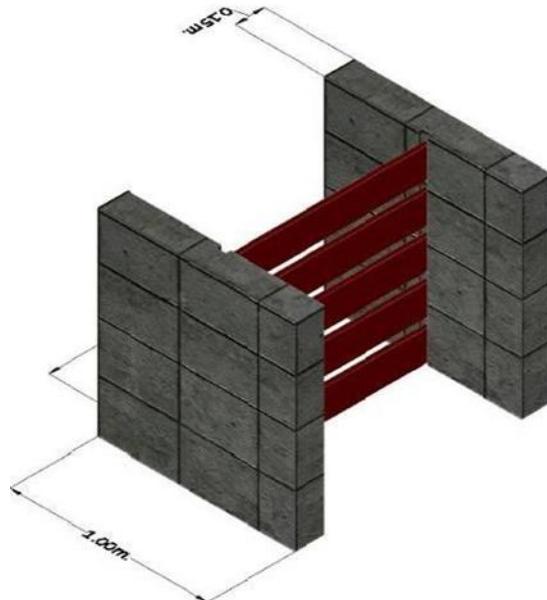
**Figura 2-54      Estructura de captación**

- o Partidores de caudal



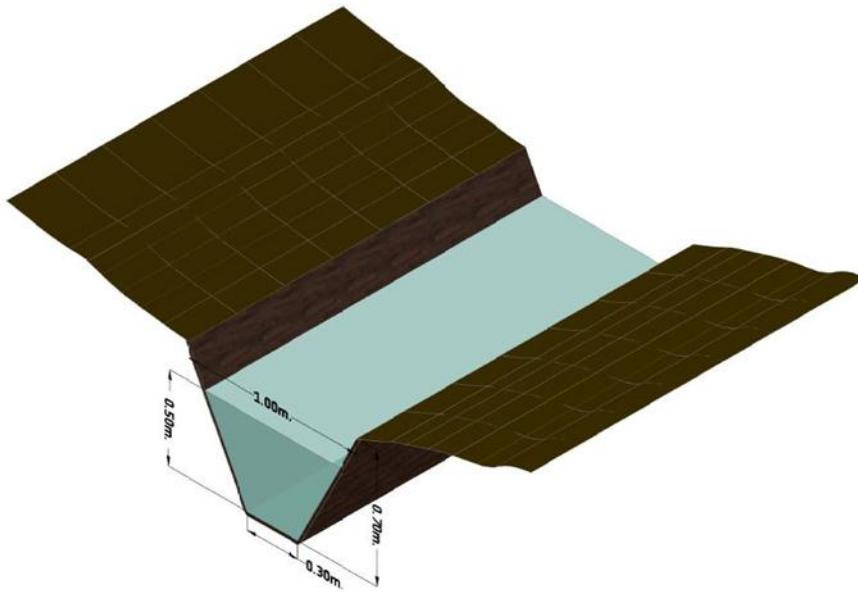
**Figura 2-55      Partidores de caudal**

- o Dimensiones compuertas de control o trinchos de riego

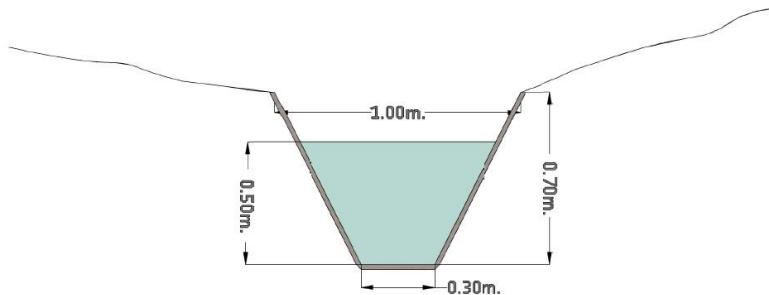


**Figura 2-56 Trinchos de riego**

- o Canales de drenaje

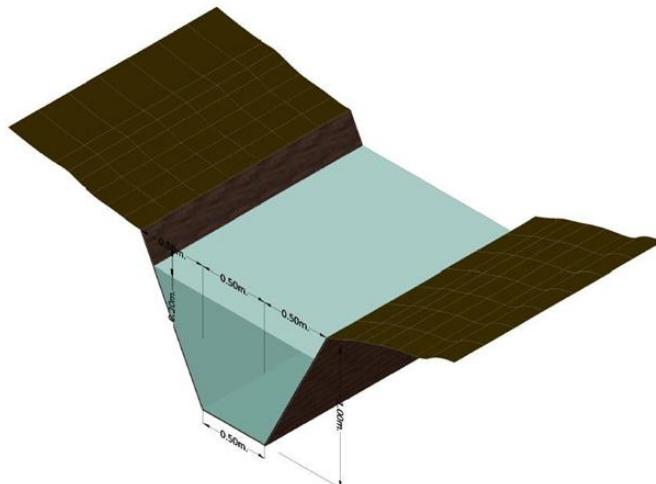


**Figura 2-57 Canal de drenaje**



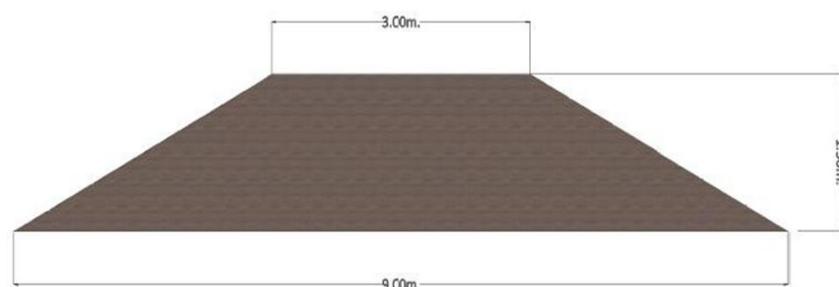
**Figura 2-58 Perfil canal de drenaje secundario**

- o Sección típica drenaje principal



**Figura 2-59 Canal de drenaje principal**

- o Sección dique lagunas de amortiguación y regulación de escorrentía



**Figura 2-60 Sección dique lagunas de regulación**

Como actividad adicional y para mantener un monitoreo y seguimiento a las aguas subterráneas del Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA), se instalará una red de cuatro piezómetros, con el fin de monitorear el comportamiento de la dirección del flujo subterráneo en el área de influencia. El diseño, construcción, localización, método de perforación empleado e instalación se presenta en el Anexo 2.16 (2). También, como parte del estudio para la ubicación de los cuatro piezómetros se realizaron muestras de suelos a los 3, 6 y 9 m de profundidad de cada uno de estos. Los resultados se presentan en el Anexo 2.16 (3).

#### ➤ **Modelo hidrogeológico Matemático ASA**

Para la elaboración del modelo de transporte matemático, se empleó el programa comercial Visual Modflow Pro Versión 4.0, el cual utiliza la herramienta de cálculo MODFLOW 2000, MODPATH, MT3DMS, desarrollada por el Servicio Geológico Americano (USGS). El modelo generado es de cuatro (4) capas, al cual se le incorporó el cuerpo de agua principal de la zona (Río Orotay), parámetros hidráulicos, condiciones de frontera y Datos de calibración.

El modelo matemático fue elaborado principalmente para evaluar las relaciones de las aguas superficiales con las aguas subterráneas, y las posibles afectaciones a los sistemas acuíferos presentes en la zona, para la disposición final de las aguas de producción para riego de áreas de cultivo.

Este modelo se generó a partir del modelo hidrogeológico conceptual definido con base en la interpretación de las variables más relevantes como: topografía, clima, hidrología, geología, hidrogeología y características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas que pueden interactuar con las aguas de producción.

Los trabajos de modelamiento hidrogeológico tienen como objetivo conocer el comportamiento del acuífero al ser utilizado el suelo superficial para la disposición por riego de aguas asociadas a la producción. El área de cultivo ha sido utilizada para desarrollar un proyecto piloto de 22 de hectáreas, en donde se han cultivado con aguas asociadas a la producción especies forestales, caña, palma africana y pastos para consumo de animales dentro de un proyecto de investigación desarrollado por Ecopetrol en asocio con Corpoica coordinador del proyecto investigativo.

Para el caso del área actual se realizó una calibración con el ASA en las condiciones observadas, partiendo del modelo de capas observado y las condiciones de nivel freático medidos en el área del ASA actual sin riego (Periodo de cierre temporal Noviembre/2011 a Febrero/2012). Esta información del escenario inicial es utilizada para la calibración del modelo estacionario son las condiciones de referencia para el modelo inicial del área y sirve de base para conocer la respuesta del área a las proyecciones futuras.

Para conocer condiciones de la columna litológica, se utilizó la información obtenida con los piezómetros construidos y la de los pozos existentes en el área del proyecto. Para la definición de los parámetros hidráulicos se utilizó los Datos obtenidos en las pruebas de bombeo sobre esta unidad y la información obtenida de las pruebas Slug de los piezómetros construidos.

Para conocer las condiciones iniciales de calidad del acuífero después del riego del orden de 10 meses de utilización del agua asociada, se utilizó la información de calidad del agua subterránea de los piezómetros construidos.

La modelación hidrogeológica se presenta de manera detallada en el **Anexo 2.16.9**. A continuación se presentan las conclusiones:

- A pesar de la limitada información que existe para la elaboración del modelo hidrogeológico matemático, se puede evidenciar con los resultados que arroja el modelamiento que se ajustan razonablemente a las condiciones reales del sistema.

- Toda la información para alimentar el modelo se obtuvo de datos y cálculos realizados a partir de información primaria, tanto en las capas someras como en las profundas del modelo.
- Las concentraciones calculadas para los diferentes escenarios sobre el Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA) actual estarían en niveles permitidos para el agua potable por la EPA, sin embargo; por la magnitud de la recarga del acuífero, éste, tomaría las concentraciones del agua que sea utilizada para riego, de allí que el agua de riego debe garantizar una buena calidad para que no genere problemas de afectación de aguas subterráneas y superficiales.
- El modelo de riego en el ASA, realiza la disposición en el primer horizonte acuífero; el cual corresponde al primer acuífero de uso por parte de la comunidad y al regulador del flujo base de las corrientes de agua superficiales.
- Se recomienda la construcción de la red monitoreo propuesta en informe en donde las coordenadas de los pozos de monitoreo están definidas de acuerdo a los módulos de riego.

**Tabla 2-69 Coordenadas piezómetros propuestos**

PUNTO	NORTE (M)	ESTE (M)
PZ-1	922387.8761	1054431.417
PZ-2	922627.4695	1053398.977
PZ-3	920010.6255	1051235.702
PZ-4	919420.5458	1052062.45
PZ-5	919377.5333	1052928.932
PZ-6	919162.2642	1053808.759
PZ-7	919349.8527	1054417.282
PZ-8	919867.4477	1054282.842
PZ-9	920162.9954	1053870.275
PZ-10	920262.2422	1053188.442
PZ-11	920738.7982	1052427.415
PZ-12	920506.8619	1053627.272
PZ-13	920285.261	1054397.973
PZ-14	921073.0819	1054276.732
PZ-15	921080.8508	1054744.963
PZ-16	920565.4577	1055016.457
PZ-17	920035.1455	1055664.682
PZ-18	920413.7948	1055675.674
PZ-19	921579.4162	1055329.714
PZ-20	921788.9221	1053673.468
PZ-21	922997.4847	1053864.091
PZ-22	922957.0601	1052570.71
PZ-23	922825.5814	1052001.988
PZ-24	922034.934	1051926.04

PUNTO	NORTE (M)	ESTE (M)
PZ-25	921402.9787	1051446.341

- El modelo arroja como resultado, que el agua se dispone temporalmente en el acuífero somero hasta que alcanza un nivel piezómetro más alto, lo que obliga a que posteriormente el agua se descargue a los drenajes superficiales del área de influencia.
- Todas las corrientes de agua superficiales del área de influencia, recibirán un incremento de caudal, por el aporte de los excedentes del vertimiento.
- Las concentraciones de la calidad del agua del acuífero, están relacionadas a las condiciones del agua de vertimiento, la concentración de las sustancias de interés en el acuífero adquieren las características del agua de vertimiento en el primer año de operación en condiciones plenas (5.6L/Sg-Ha).
- En el agua de vertimiento se identificaron cuatro sustancias de interés sanitario; Bario, Cloruros, Benceno y TPH en concentraciones diferentes a las caracterizadas en las aguas subterráneas del acuífero del primer horizonte.
- Si el proyecto quiere ser manejado como una área de disposición por riego (no descarga a otros cuerpos de agua), requeriría un área efectiva de riego mayor, aproximadamente de 5630 Ha; o disponer un volumen aproximado de 160.000 Ba en el área proyectada en el alcance del PMA.
- El proyecto es viable, sin embargo requiere que el agua utilizada cumpla los criterios de calidad de agua para consumo humano establecidos por la EPA (benceno 0.005 microgramos por litro y Bario en 2.0 mg por litro) o los que en el futuro establezca la normatividad nacional. Ya que estas son las dos únicas sustancias de interés ambiental que presentan valores que en el algún momento pueden superar estos límites. Esto es importante ya que el acuífero está siendo utilizado para suministro de agua para consumo humano de algunos predios del área de influencia y la aportación del acuífero es la reguladora del flujo base de las corrientes superficiales.

#### 2.2.3.4 Resultados y conclusiones de Corpocaja en el proyecto piloto del ASA

➤ **Efecto de las aguas asociadas a la producción de hidrocarburos en los recursos biofísicos y en cultivos de importancia económica**

Los análisis que ha venido realizando Corpocaja en flora para el ASA y los resultados que se han obtenido se explican a continuación:

Se establecieron diferentes coberturas de cultivos en un centro experimental construido con el fin de evaluar en campo el efecto de las aguas de producción tratadas de la industria petrolera en el bloque Cubarral (Castilla La Nueva – Acacías).

Al medir parámetros de crecimiento se observó en los valores medios, que las especies de mayor altura actualmente son la Gmelina (5.13m) seguida por la Acacia mangium con 5.01m y así mismo, la Gmelina tuvo el mayor diámetro con un valor de 80.9mm, seguida por el Yopo con 80.6mm en un periodo de medición de 398 días después del transplante.

Teniendo en cuenta la información obtenida hasta el momento y con la edad de plantaciones se han obtenido los siguientes resultados parciales:

Las especies A. mangium y Gmelina se han tenido que podar dos veces antes de cumplir el primer año, situación no común en plantaciones comerciales sin riego.

El crecimiento en altura promedio de todas las especies es un 25% superior al promedio regional del crecimiento de las mismas especies en plantaciones comerciales sin riego.

Las especies A. mangium, Gmelina arbórea y Eucalipto pellita, se vieron afectadas parcialmente en cuanto al desarrollo radicular, producto de la cercanía del riego a la base de los árboles lo que ocasionó en algunos pocos casos el volcamiento de individuos. Esta situación se mejoró, con las podas y manejando el riego entre los surcos de los árboles.

No se evidencio la presencia de plagas o enfermedades de importancia para el desarrollo de las plantaciones en general. Solo en Gmelina se observó la presencia de caracoles, debido a la gran cantidad de follaje; situación que se superó con la aplicación de la poda.

A pesar que en condiciones normales de plantación comercial sin riego la especie Eucalipto pellita tiene poda natural, en el área actual del proyecto esta especie no ha presentado esta situación lo que ha ocasionado la realización de la misma para disminuir el peso del árbol y evitar su caída.

En términos generales las plantaciones forestales en el área actual del proyecto presentan un buen desarrollo inicial, con una producción abundante de follaje y crecimientos superiores a los promedios regionales, tendencia que se ve evidente en los parámetros evaluados.

Es necesario continuar con la toma de datos y sumar a los parámetros evaluados aspectos de propiedades mecánicas de la madera, índice de sitio para generar los modelos anteriormente anotados.

Resulta muy interesante observar, que el tenor de Na en los suelos no ha presentado cambios significativos debido al uso de las aguas de producción tratadas para el riego.

En los monitoreos realizados a las aguas de riego no se presentaron condiciones anormales de salinidad y conductividad eléctrica. La investigación que se realiza ha servido para generar metodologías o protocolos para la toma de información en aspectos relacionados con el uso del agua y de los recursos biofísicos. Para su adecuada implementación y desarrollo hace falta complementar procesos de infraestructura física y de gestión humana.

En la búsqueda e identificación de microorganismos degradadores de hidrocarburos se aislaron nueve cepas promisorias de bacterias, de las cuales siete fueron aisladas en pH 5.0 y dos en pH 7.0. Se seleccionaron 5 cepas y se realizaron cinéticas de crecimiento a diferentes concentraciones de fenol para observar su consumo y degradación. Se han realizado extracciones de DNA y amplificación de la región 16s rDNA para la secuenciación de las cepas.

Se inició el trabajo de enlace entre el laboratorio de microbiología de suelos del C.I. Tibaitatá y el laboratorio de suelos del C.I. La Libertad para la evaluación en campo de los microorganismos seleccionados en laboratorio.

En muestras de biopelículas asociadas al agua de producción utilizada como riego, se han realizado diferentes evaluaciones microbiológicas. De las observaciones microscópicas efectuadas fue posible identificar la cianobacteria *Phormidium sp*; algunas especies de este microorganismo han sido reportadas en investigaciones científicas por ser capaz de disminuir la concentración de hidrocarburos, dentro de estos, los del tipo fenantreno y antraceno, lo que justifica aún más la importancia de continuar con este estudio, pues lo más probable es que se pueda llegar a definir la capacidad de biorremediación y biodegradación que puede tener esta cianobacteria.

Teniendo en cuenta la morfología observada se puede afirmar que existen microalgas en estas biopelículas, su identificación se encuentra aún proceso, sin embargo es importante destacar que existen reportes científicos acerca de la capacidad biorremediadora de este tipo de organismos.

De acuerdo a los resultados obtenidos es bastante probable que en este caso existan asociaciones entre las microalgas, cianobacterias y bacterias que pueden mineralizarlos hidrocarburos presentes en esta agua. Al originarse esta asociación, el proceso se puede optimizar por los aportes de cada tipo de organismo a las necesidades de su metabolismo o probablemente las cianobacterias y microalgas estén tomando el CO<sub>2</sub> producido por la mineralización de los compuestos hidrocarburos presentes en el agua para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, brindándole oxígeno a las bacterias degradadoras.

En términos generales, se encontraron resultados interesantes, lo cual hace pensar que en suelos y aguas hay organismos con potencial degradador de hidrocarburos que pueden ser capaces de tolerar altas concentraciones; por lo cual, se hace necesario darle continuidad al trabajo de investigación realizado.

Es importante tratar de identificar la especie de la cianobacteria encontrada, pues hay reportes sobre algunas especies que resultan ser terapéuticas y otras potencialmente tóxicas (Teneva, et al; 2005)

De los estudios biológicos realizados se encontró que el cuadrante al que pertenece el predio del actual del proyecto es una zona con alto grado de degradación ambiental. El bosque de ribera es afectado principalmente por la tala de árboles para extensión de potreros; la naturalidad del caño es intervenida por factores antrópicos, que lo deterioran a través del tiempo.

El uso extensivo del suelo para la ganadería trae como consecuencia baja diversidad vegetal y edafofaunística.

El desarrollo de actividades forestales permitió dar un cambio paisajístico. Se incrementaron sitios de anidación y actividad para especies faunísticas, observando un aumento en la composición de avifauna en la zona de plantación.

El incremento de avifauna en la zona permite monitorear otras especies que son atraídas por la avifauna; por lo tanto es necesario seguir realizando monitoreos de grupos taxonómicos faunísticos que permitan evaluar el cambio y la dinámica del ecosistema a través del tiempo.

Tomar conciencia sobre los diferentes compromisos de conservación de los ecosistemas, desarrollando principalmente el uso sostenible de los recursos naturales.

En los estudios realizados para determinar la dinámica de los gases efecto invernadero se encontró inicialmente que los flujos de GEI horarios no presentaron diferencias significativas.

Existen diferentes factores que influyen en la concentración de los GEI en el suelo, entre los que se encuentran la textura, la cobertura vegetal, la fauna, las raíces, entre otras.

La humedad del suelo, es un factor ecológico que influye en el medio ambiente, por ser el agua constituyente esencial de la materia viva; sin embargo los datos obtenidos de la misma, en el momento del estudio, (antes de utilizar riego de agua residual asociada a la producción de hidrocarburos) no es una variable que influya en la emisión de GEI.

Los flujos de GEI determinados pueden asociarse a los distintos procesos biológicos que se producen en el suelo y están determinados por el consumo de oxígeno y por la producción de CO<sub>2</sub> que realizan los microorganismos y las plantas durante sus procesos de oxidación.

Al comparar los flujos de los GEI del suelo a la atmósfera en los diferentes sistemas, se observó que éstos no representan mayor afectación a la atmósfera.

En cuanto al restablecimiento de bosques y su funcionalidad se logró establecer parcelas de investigación en donde se inició la recolección de información sistemática.

**Tabla 2-70 Resultados esperados, obtenidos e indicadores verificables**

RESULTADO ESPERADO	RESULTADO OBTENIDO	INDICADOR VERIFICABLE
Efectos determinados en el suelo y cultivos por el uso de las aguas de vertimiento en la producción agropecuaria a nivel de campo	Establecimiento de parcelas experimentales con cultivos de interés económico (Caucho, Palma de aceite, Acacia, Gmelina, Caña de azúcar, Eucalipto, Yopo, Pino, Guadua, Jatropha).	Área establecida 10 Ha permanentes desde 2010 a 2011
	Monitoreo químico, físico, biológico y de hidrocarburos totales en suelos	Cambios ocurridos en los suelos por el uso del agua tratada de producción para el riego.
Efectos cuantificados en el suelo y cultivos por el uso de las aguas de vertimiento en la producción agropecuaria bajo condiciones controladas	Evaluación de cultivos en dos localidades. (Caña de azúcar, pasto elefante, achote, caucho, Jatropha, Pino, Eucalipto, Guadua)	8 especies evaluadas. Monitoreo de los cambios ocurridos en los suelos por el uso del agua tratada de producción para el riego.
Número de microorganismos edáficos descomponedores de hidrocarburos	Selección de 9 microorganismos edáficos descomponedores de hidrocarburos	9 especies de bacterias consumidoras de hidrocarburos
Presencia cuantificada de hidrocarburos en las aguas freáticas	Montaje de una red freatimétrica.	15 pozos de observación. Protocolo de captura de información
Emisiones de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O Emisiones de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O cuantificadas en cada uno de los sistemas productivos sometidos a manejo de agua asociada a la producción de hidrocarburos	Mediciones temporales de concentraciones de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O en cinco sistemas de producción	Protocolos de captura de información. 20 cámaras de captura de emisiones en total.
Efectos ambientales cuantificados en la microcuenca por la actividad agropecuaria adelantada en el predio piloto con uso de las aguas asociadas a la producción agropecuaria	Recopilación de información de campo en el CPA por sistema productivo y estudio general de la microcuenca del Caño Danta.  Estudios de recuperación funcional del bosque ripario en el CPA	Establecimiento línea base ambiental del CPA. Inventario de aves, mamíferos, anfibios y reptiles. Inventario de macrofauna edáfica. Montaje Parcela experimental.

**Tabla 2-71 Productos y/o procesos generados e impactos**

TIPO DE PRODUCTO Y/O PROCESO	NOMBRE DEL PRODUCTO Y/O PROCESO	DESCRIPCIÓN	IMPACTO ESPERADO	PLAZO (AÑOS) DESPUÉS DE FINALIZADO EL PROYECTO	INDICADOR VERIFICABLE
Estudios y Caracterizaciones	Implementación de un centro piloto de investigación en agrobioenergía y uso alternativo del agua de producción de la industria petrolera	Oportunidad de generar conocimiento sobre el efecto de las aguas de producción en cultivos y recursos biofísicos. La incorporación a la producción agropecuaria de las aguas	La incorporación a la producción agropecuaria de las aguas consideradas residuales aportará valor agregado a un recurso no aprovechado hasta el momento, además de	5 años	Vigencia del CPA y crecimiento de áreas.

TIPO DE PRODUCTO Y/O PROCESO	NOMBRE DEL PRODUCTO Y/O PROCESO	DESCRIPCIÓN	IMPACTO ESPERADO	PLAZO (AÑOS) DESPUÉS DE FINALIZADO EL PROYECTO	INDICADOR VERIFICABLE
		consideradas residuales aportará valor agregado a un recurso no aprovechado hasta el momento, además de contribuir al desarrollo regional a través de la implementación de emprendimientos agroindustrial.	contribuir al desarrollo regional a través de la implementación de emprendimientos agroindustrial.		
Metodologías o Procesos	La incorporación a la producción agropecuaria de las aguas consideradas residuales aportará valor agregado a un recurso no aprovechado hasta el momento, además de contribuir al desarrollo regional a través de la implementación de emprendimientos agroindustrial	Metodologías de captura de información real sistemática para el diseño y construcción de sistemas de riego y drenaje en condiciones de trópico húmedo.	Disminución de la contaminación de los cuerpos de agua superficiales de la región.	5 años	Vigencia del CPA y crecimiento de áreas bajo riego con aguas de producción en otras regiones.
Recomendaciones técnicas y prácticas de manejo	Manejo del agua tratada de producción para el riego de cultivos		El establecimiento de sistemas de uso del agua asociada a la producción de hidrocarburos con fines productivos.	5 años	Utilización de la alternativa generada como método de disponer el agua tratada de producción de la industria petrolera.

➤ **Evaluación del efecto de las aguas de vertimiento sobre especies animales domésticas y especies icticas (cachama y mojarra roja) en el predio piloto.**

Las conclusiones de las alteraciones en algunas especies de fauna que ha traído el proyecto piloto del ASA se presentan a continuación:

- ✓ Calidad y producción de la leche
  - Los resultados obtenidos indican un efecto del consumo agua del tratamiento 100% en la grasa y sólidos totales de la leche. Para las variables proteína y lactosa entre tratamientos no se encontró ninguna diferencia significativa. Estos resultados no son concluyentes, se requiere que en las próximas evaluaciones y análisis se incluya el número y etapa de la lactancia.
  - Los resultados indican una mejor producción en las vacas del control y el tratamiento 25% que en las del tratamiento 100% y 50%. Sin embargo estas respuestas deben interpretarse

en forma definitiva en el tiempo proyectado del proyecto, la respuesta no es concluyente. Se recomienda que en las próximas evaluaciones el análisis debe incluir el número y periodo de lactancia y la evaluación solo debe hacerse en el primer tercio de lactancia

- ✓ Calidad y producción de carne:
  - Los resultados no evidencian cambios aparentes en la calidad y producción de carne en esta fase evaluada por efecto del agua asociada a la producción del petróleo
- ✓ Indicadores de reproducción
  - Los resultados evaluados para esta fase no señalan cambios aparentes sobre calidad espermática, fecundación invitro y desarrollo embrionario por efecto del consumo de agua asociada a la producción del petróleo. Los estudios moleculares basados en proteómica no han generado información consistente que determine el efecto de estas aguas.
- ✓ Indicadores de salud
  - Los indicadores de evaluación clínica (frecuencia cardiaca, frecuencia respiratoria, temperatura corporal), metabolismo proteico y energético, condición corporal para esta fase de evaluación, no indicaron cambios visibles del efecto de las aguas asociadas a la producción del petróleo. En el tema parasitario específicamente, se observó algunos cambios de carga en algunos tratamientos asociados al consumo de agua de vertimiento. Sin embargo los resultados no concuerdan con la condición corporal de los animales.
  - La evaluación macro y microscópica: La evaluación macroscópica postmorten de los animales sacrificados en cada uno de los tratamientos no mostró cambios aparentes a entidades patológicas, se observó en un animal presencia de parásitos, hemorragias petequiales en abomaso, sin afectar la condición de la carcasa. La evaluación microscópica evaluada por tres expertos señaló problemas respiratorios posiblemente de origen bacteriano y hepatotoxicos posiblemente de origen tóxico en los animales sometidos a pastoreo de pasturas regadas con agua de vertimiento. Esta respuesta está asociada al incidente presentado, lo que generó imposibilidad de la evaluación del agua de vertimiento tratada por Ecopetrol descrita como agua asociada a la producción del petróleo.
  - Evaluación de residuos de hidrocarburos: Los estudios controlados en el CI la libertad de consumo de agua de vertimiento por los grupos de animales de los diferentes tratamientos (agua de vertimiento completa (100%), diluida al 50%, al 25% y de control o testigo) indican que los resultados no son persistentes dentro del tratamiento para algunos hidrocarburos. Los hallazgos en el mismo tejido no son recurrentes en los muestreros, ni entre animales. Esto hace pensar en que estos hidrocarburos posiblemente son eliminados o metabolizados en los bovinos y en los búfalos con mejor eficiencia.

Por otra parte la respuesta obtenida no es coherente en los tratamientos posiblemente por efectos externos que involucren contaminación en donde el ambiente está incluido ó por factores no monitoreados. Es de anotar, que esta es una fase de evaluación del estudio que involucra todo el ciclo productivo.

La respuesta obtenida en esta fase de evaluación no evidenció cambios entre los animales que consumieron agua de vertimiento tratada por Ecopetrol a diferentes diluciones con los animales que no tuvieron acceso a este tipo de agua sobre la producción en términos generales y reproducción. En la salud especialmente en el tema de hidrocarburos los cambios observados no evidencian con precisión el efecto de estas aguas sobre residualidad en tejidos, indican posiblemente procesos de metabolización al igual que en la especie bufalina en donde este

metabolismo parece ser más eficiente. La información no es concluyente pues la evaluación corresponde solo a una fase del periodo productivo del animal.

## 2.3 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LA SEGUNDA LÍNEA DE VERTIMIENTO SOBRE EL RÍO GUAYURIBA

### 2.3.1 Generalidades

El desarrollo del proyecto Castilla 170K se ha convertido en una de las principales metas definidas por Ecopetrol S.A. para el desarrollo de los Campos Castilla y Chichimene del Bloque Cubarral; el cual tiene como objetivo consolidar la producción de 440 MBLS de petróleo teniendo como horizonte el año 2025.

Consolidar la meta de producción de 170.000 BOPD para el campo Castilla involucra acciones de perforación, work-over la construcción y puesta en marcha de facilidades que permitan recolectar, tratar y transportar hasta 170 KBOPD de los yacimientos K1 y K2.

Dentro de las estrategias de desarrollo que permitan consolidar tal objetivo, se tiene la construcción de la Estación Castilla 3, en la cual se tratará el crudo proveniente de los pozos de desarrollo contemplados en las nuevas campañas de perforación y los cuales permitirán en buena medida alcanzar las metas de producción propuestas.

En tal sentido, una de las actividades conexas a la construcción y operación de la Estación Castilla 3, involucra el manejo y disposición de las aguas de producción allí tratadas, para lo cual una de las alternativas formuladas consiste en la construcción de una línea de flujo que permita el transporte y disposición final de las aguas sobre el Río Guayuriba.

Partiendo de la Estación Castilla 3, se plantea la construcción de una línea de transferencia de 36", empleando para ello un corredor paralelo a las líneas de flujo que comunican el Clúster –22 con la estación Acacias. En igual sentido desde la Estación Castilla 2 se proyecta la construcción de una línea adicional empleando el corredor existente de la línea que transfiere actualmente las aguas de esta última hacia la estación Acacias. Desde allí se proyecta realizar la construcción de la segunda línea de vertimiento, utilizando para ello un derecho de vía paralelo a la línea de vertimiento ya existente.

Cabe mencionar que el volumen total de aguas de producción a tratar asociadas a las metas ya expuestas, implica de igual manera la ampliación a futuro de los módulos STAP existentes en la estación Acacias y aquellos inicialmente proyectados para la estación Castilla 3.

Dentro de los alcances del proyecto se mencionan los siguientes:

- ✓ Construcción y puesta en funcionamiento de la segunda línea de vertimiento sobre el Río Guayuriba empleando para ello una tubería de acero al carbón de 42 pulgadas de diámetro con capacidad para entregar, en conjunto con la línea existente, 2.000.000 Millones de BWPD.
- ✓ Ampliación de la capacidad de transferencia de agua tratada desde la estación Castilla II hasta la estación Acacias, mediante bombas nuevas y línea nueva para 300 KBWPD
- ✓ Ampliación de la capacidad de vertimiento de agua tratada desde la estación Acacias, hasta el Río Guayuriba, mediante bombas nuevas y línea nueva para 1.26 MBWPD.
- ✓ Ampliación y adecuación de las facilidades para tratamiento de agua de producción en las estaciones castilla 3 y Acacias con el fin de aumentar su capacidad de tratamiento hasta un máximo de 4.320.000 BWPD. La diferencia entre este caudal y el final proyectado para las

líneas de vertimiento, se direccionará hacia el Área de Sostenibilidad en Agroenergíay a los pozos de reinyección.

### 2.3.2 Antecedentes

Con la ampliación de las facilidades del Campo Castilla, Ecopetrol estima que el caudal de vertimiento de agua residual industrial tratada llegará a un caudal de 2.000.000 BWPD, en los próximos 5 años. Las facilidades existentes no tienen la capacidad para transportar este caudal, por lo que se hace necesario aumentar la capacidad existente, mediante la construcción de la nueva infraestructura con el fin de alcanzar dichos niveles de vertimiento demandados por la operación.

Actualmente el agua tratada de los STAP de las estaciones Castilla 2 y Acacias es enviada al sistema de recolección y bombeo de la estación Acacias y conducida mediante una línea de 36" hasta el punto de vertimiento en el Río Guayuriba. El tipo de tubería utilizado en la línea de vertimiento actual es en tubos tipo CCP, cilindro de acero con refuerzo de varilla, revestimiento interior y recubrimiento exterior en mortero de cemento y uniones de acero espiga-campana con empaque de caucho en diámetro de 36", longitudes estándar de 10.00 metros para 128 PSI.

#### 2.3.2.1 Permisos de vertimiento existentes.

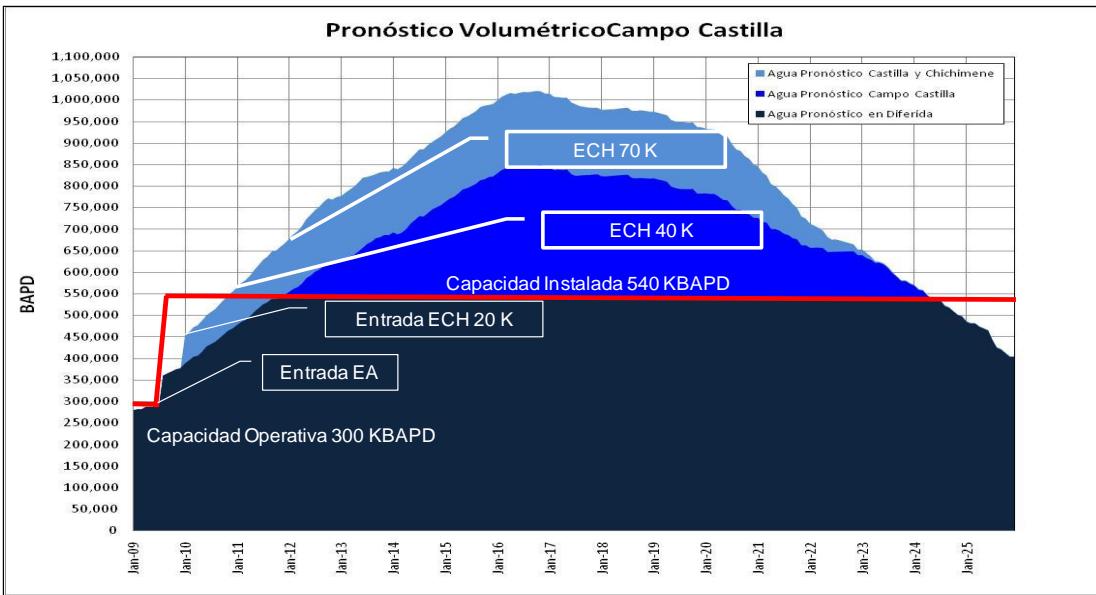
El Campo Castilla cuenta en este momento con un permiso de Vertimiento de Aguas al Río Guayuriba otorgado mediante *Resolución PS-GJ.1.2.6.011-1745*, en un caudal de 850.000 BWPD. En la actualidad la estación Acacias, está vertiendo aproximadamente 650.000 BWPD, sin embargo, con el desarrollo del proyecto Castilla 170K con el cual se espera ampliar la producción del campo a 440 MBLS de petróleo al año 2025, mediante la realización de actividades de perforación, workover y la construcción y puesta en marcha de facilidades que permitan recolectar, tratar y transportar hasta 170 KBOPD de los yacimientos K1 y K2., se deberá realizar la ampliación del permiso de vertimiento a 2'200.000 BWPD para el año 2013 y por tanto se requerirá la construcción de una nueva línea que permita verter aproximadamente 1'000.000 BWPD adicionales.

Paralelo a ello se cuenta con permiso de vertimiento concedido mediante resolución 2.6.06-0420 para disponer un caudal máximo de 140 L/sg, en el punto de coordenadas N 928.857 y E 1.045.435, sobre el Río Acacias. Dicho permiso se encuentra en trámite para su renovación en la actualidad y su vertimiento proviene del STAP de la estación Chichimene.

#### 2.3.2.2 Producción de agua asociada al tratamiento de crudo en el campo Castilla.

Cabe considerar que la producción obtenida en los campos Castilla y Chichimene, lleva asociado un volumen equivalente a 96 barriles de agua por cada 100 barriles extraídos.

Los pronósticos de producción de agua, estimados para el campo Castilla, tomando el año 2025 como horizonte, se presentan en la **Figura 2-61**.



**Figura 2-61 Pronóstico de producción de agua para el Campo Castilla**  
 Fuente: Ecopetrol S.A., 2011

### 2.3.3 Descripción del proyecto

En este aparte se resumen las características más relevantes relacionadas con el proyecto: localización y trazado de la línea proyectada, descripción de accesos y actividades constructivas entre otras. (Ver **Anexo 2.17 Ingeniería detallada Línea de Vertimiento Guayuriba**)

#### 2.3.3.1 Localización

El proyecto de construcción de la segunda línea de vertimiento sobre el Río Guayuriba, se desarrollará en el municipio de Acacias, departamento del Meta; empleando para ello un derecho de vía de 50 metros de ancho, el cual irá paralelo al trazado de la línea de vertimiento que se encuentra actualmente en operación. Dicho trazado alcanzará una longitud estimada de 22.730 metros.

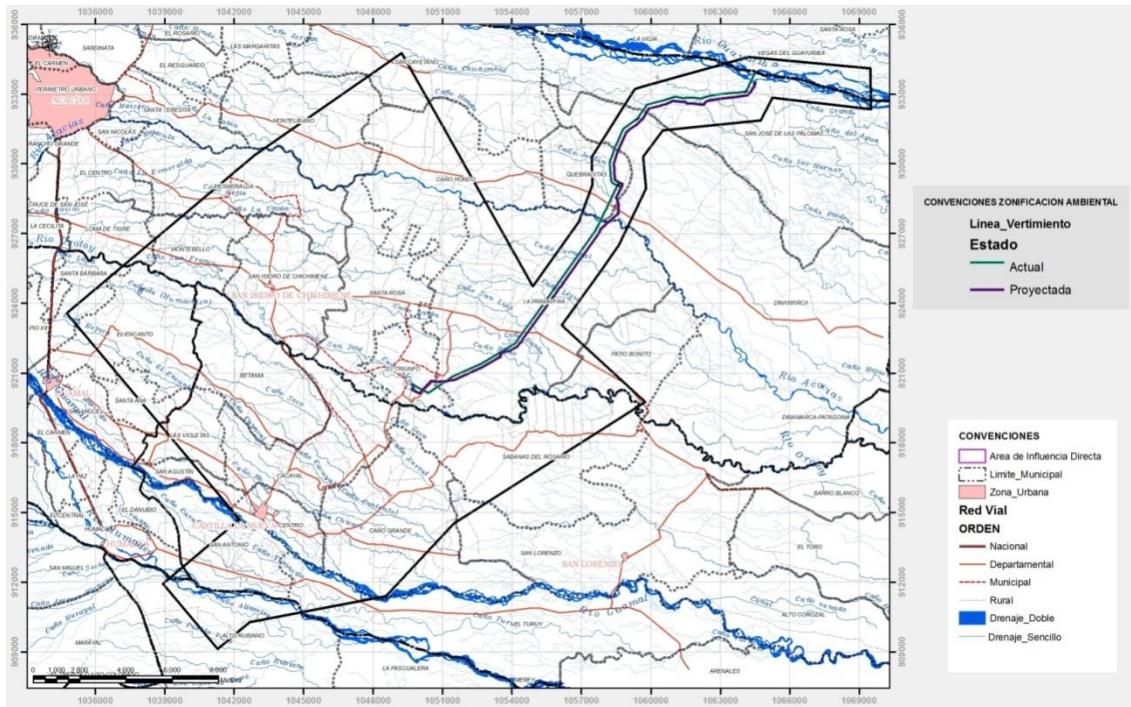
Este corredor parte desde la estación Acacías en dirección Nor- Este atravesando las veredas de La Primavera, Quebraditas y San José de las Palomas del Municipio de Acacias. Se considera igualmente influenciada la Vereda Vegas del Guayuriba, ubicada al norte de este río sobre el punto de vertimiento y la cual se encuentra dentro de la jurisdicción del Municipio de Villavicencio.

La **Tabla 2-72** referencia los puntos de inicio y final de la flauta para la línea proyectada y en la **Figura 2-62** se presentan los alineamientos tanto de la línea existente como de la proyectada.

**Tabla 2-72 Coordenadas flauta de la línea proyectada**

LOCALIZACIÓN	COORDENADAS ORIGEN BOGOTÁ- DATUM BOGOTÁ	
	ESTE	NORTE
Inicio flauta	1064547	933557
Final flauta	1064556	933576

Fuente: Ecopetrol S.A. 2011



**Figura 2-62 Localización de la línea de vertimiento actual y proyectada**  
**Fuente: PMA Bloque Cubarral Ecopetrol S.A. 2011**

### 2.3.3.2 Características del proyecto

Desde la piscina de arietamiento ubicada en la estación Acacias, se construirá la nueva línea de vertimiento que finalizará sobre la margen sur del Río Guayuriba. La tubería tendrá una longitud de 22.730 Kmy se construirá una tubería de acero al carbón de 42" de diámetro, para transportar un caudal máximo de 1.260.000 BWPD de agua de producción tratada. Esta tubería se instalará enterrada de manera paralela ala línea existente.

El sistema de control de bombas de vertimiento será similar al existente, el arranque y parada de las bombas se podrá controlar de manera remota o manual.

El sistema para entrega del efluente de aguas tratadas, está conformado por una flauta con la cual se realizará la descarga al río, la separación entre orificios será de 0.5 m y el diámetro de éstos será de 3". Esta flauta saldrá a la superficie del río ya que la línea se encontrará enterrada respecto al lecho del río una profundidad de 4.5 m. conforme a lo contemplado en el diseño la profundidad de socavación será de 2 m para un período de retorno de 20 años. Esta estructura llegará a un brazo del río el cual tiene un ancho de 60 m y una profundidad mínima de 0.5m.

### 2.3.3.3 Modelación para el río Guayuriba

#### ➤ Descripción del modelo QUAL2K

En el **Anexo 4.7 Modelación Vertimiento** se presenta la modelación realizada para el vertimiento del Río Guayuriba.

QUAL2K o (Q2K), es un modelo de calidad de aguas, que representa la versión actualizada de QUAL2K, siendo similares en los siguientes aspectos:

- ✓ Unidimensionales al asumir mezcla completa en la sección transversal.

- ✓ Modelo de estado estable al determinar la calidad del agua a nivel espacial más no temporal.
- ✓ El calor y la temperatura son simulados como una función de un modelo meteorológico en una escala de tiempo diurna.
- ✓ Las cargas y captaciones puntuales y difusas pueden ser simuladas.
- ✓ Todas las variables de calidad de agua, son simuladas sobre una escala de tiempo diurna.

Entre las principales variaciones que presenta QUAL2K se encuentran:

- ✓ Programado en el lenguaje macro de Windows, Visual Basic con una interface que es Excell.
- ✓ En el modelo de segmentación los tramos comprenden elementos espaciados de forma desigual. Por ello, múltiples cargas y captaciones pueden ser incluidas en cualquier tramo.
- ✓ Modela materia orgánica particulada no viva (detritos).
- ✓ Representa el carbono orgánico de dos formas: una de oxidación rápida (DBO rápida) y otra de oxidación lenta (DBO lenta).
- ✓ Modela patógenos cuyo comportamiento es determinado en función de la temperatura, luz y sedimentación.

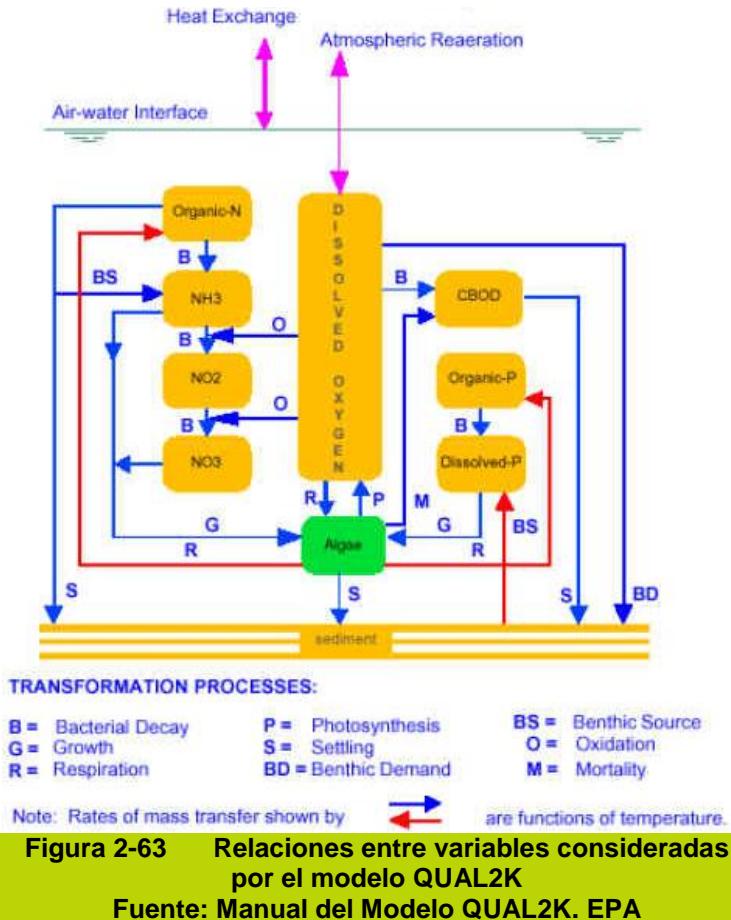
QUAL2K ha sido ampliamente usado como una herramienta de planificación en el aspecto de calidad de aguas de una corriente de agua, puede usarse para estudiar el impacto de vertidos contaminantes sobre la calidad de agua de un cauce, o identificar la magnitud y características de calidad de descargas puntuales de aguas contaminadas como parte de un programa de muestreo de campo. El modelo está diseñado para simular el comportamiento de varios parámetros de calidad del agua. El modelo evalúa el comportamiento de constituyentes no conservativos y conservativos. Los constituyentes no conservativos comprenden aquellos que teóricamente presentan rápidos cambios por procesos bioquímicos y los conservativos son compuestos de difícil degradación en el sistema. En la **Tabla 2-73** se presenta un resumen de los parámetros de entrada del modelo y en la **Figura 2-63** se muestran las relaciones entre los diferentes parámetros físico-químicos en el cuerpo de agua.

**Tabla 2-73      Datos de entrada del Modelo QUAL2K**

TIPOS DE PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Generales	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Título, Tipo de simulación, unidades, tiempo</li> <li>✓ Número de tramos</li> </ul>
Descripción de la corriente	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Nombre de cada tramo, longitud, identificación de la cabeza del sistema (Correspondiente al punto más agua arriba del sistema), longitud del elemento computacional (Longitud más pequeña en que son divididos los tramos)</li> </ul>
Variables Globales	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Identificación de parámetros a modelar</li> <li>✓ Localización geográfica del sistema</li> <li>✓ Coeficientes de evaporación</li> <li>✓ Factores de corrección de constituyentes básicos y no conservativos por temperatura</li> </ul>
Variables funcionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Caudal de la corriente</li> <li>✓ Parámetros hidráulicos (relación Velocidad vs Caudal, Nivel vs Caudal, rugosidad de Manning)</li> <li>✓ Flujo incremental (<math>\Delta Q/\Delta X</math>)</li> <li>✓ Calidad incremental (<math>\Delta C/\Delta X</math>, para cada parámetro)</li> <li>✓ Coeficientes o tasa de reacción para los parámetros a modelar</li> <li>✓ Calidad del agua en la cabeza del sistema</li> <li>✓ Calidad de agua de los puntos de entrada y salida al sistema</li> </ul>
Climatología	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Climatología (Radiación solar, cobertura de nubes, velocidad del viento, temperatura bulbo húmedo, temperatura bulbo seco)</li> </ul>
Tipos de parámetros	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Descripción</li> </ul>
Generales	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Título, Tipo de simulación, unidades, tiempo</li> <li>✓ Número de tramos</li> </ul>
Descripción de la corriente	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Nombre de cada tramo, longitud, identificación de la cabeza del sistema (Correspondiente al punto más agua arriba del sistema), longitud del elemento computacional (Longitud más pequeña en que son divididos los tramos)</li> </ul>

TIPOS DE PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Variables Globales	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Identificación de parámetros a modelar</li> <li>✓ Localización geográfica del sistema</li> <li>✓ Coeficientes de evaporación</li> <li>✓ Factores de corrección de constituyentes básicos y no conservativos por temperatura</li> </ul>

Fuente: Manual del Modelo. EPA.



#### ➤ Modelo hidráulico

El modelo hidráulico incluido en QUAL2K representa la parte del río que se va estudiar como una serie de tramos de diferentes longitudes con características hidráulicas similares. Los tramos son numerados en orden descendente iniciando desde la cabecera del río. A su vez, cada tramo puede ser subdividido en series de elementos igualmente espaciados, que corresponden a las unidades fundamentales de cómputo.

En cada elemento se lleva a cabo un balance de flujo de estado estable de la siguiente manera: (Figura 2-64).

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in, i} - Q_{ab, i}$$

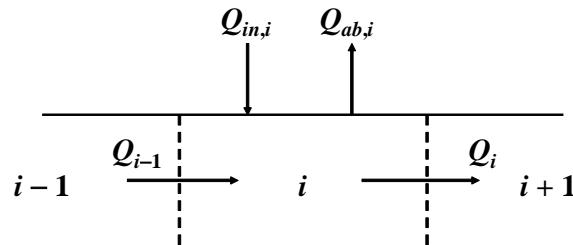
Donde,

$Q_i$  = es el caudal que sale del elemento  $i$  y entra al elemento  $i + 1$  [ $m^3/d$ ]

$Q_{i-1}$  = corresponde al caudal que ingresa desde el elemento anterior  $i - 1$  [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]

$Q_{in,i}$  = es el caudal total que ingresa al elemento desde fuentes puntuales (vertimientos) o no puntuales (escorrentía) [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]

$Q_{ab,i}$  = indica el caudal total que sale del elemento debido a captaciones puntuales (bocatomas) y no puntuales (desbordamientos) [ $\text{m}^3/\text{d}$ ].



**Figura 2-64 Balance de flujo en cada elemento**

Una vez el flujo de cada elemento es calculado, se hallan la profundidad y velocidad del canal.

QUAL2K idealiza el río como un canal trapezoidal (**Figura 2-65**) y bajo condiciones de flujo uniforme usa la ecuación de Manning para expresar la relación entre caudal y profundidad:

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n} \frac{A_c^{5/3}}{P^{2/3}}$$

Donde,

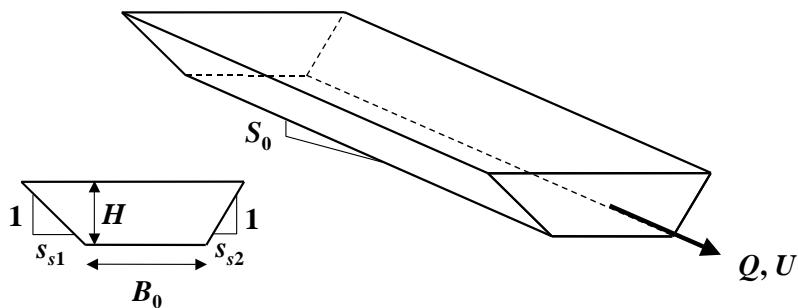
$Q$  = caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$S_0$  = pendiente de fondo [m/m]

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning

$A_c$  = área de la sección transversal [ $\text{m}^2$ ]

$P$  = perímetro mojado [m]



**Figura 2-65 Canal Trapezoidal**

El área de la sección transversal del canal se determina como:

$$A_c = [B_0 + 0.5(s_{s1} + s_{s2})H]H$$

Donde,

$A_c$  = Área de la sección transversal

$B_0$  = ancho del fondo [m]

$s_{s1}$  y  $s_{s2}$  = pendientes laterales [m/m]

$H$  = profundidad de la sección [m]

El perímetro mojado se calcula como:

$$P = B_o + H \sqrt{S_{S1}^2 + 1} + H \sqrt{S_{S2}^2 + 1}$$

La velocidad de flujo se determina por la ecuación de continuidad:

$$U = \frac{Q}{A_c}$$

El ancho promedio del elemento B [m], se calcula como:

$$B = \frac{A_c}{H}$$

El software QUAL2K realiza el balance de flujo de un cuerpo de agua, utilizando los caudales de los puntos frontera del tramo de estudio; en el presente análisis, sería aguas arriba del vertimiento del STAR1 de la las estación Castilla - Acacias y aguas abajo del vertimiento. Además de toda la información disponible de los aforos, de las características geomorfológicas del fondo del río y de los coeficientes de velocidad y profundidad.

Además de modelar las características físicas del cauce, también simula los procesos de transporte de los solutos. QUAL2K calcula el tiempo de viaje del contaminante a lo largo del segmento que se está estudiando. Para determinar el tiempo de viaje primero se debe conocer el tiempo de residencia del vertimiento en cada elemento.

$$\tau_k = \frac{V_k}{Q_k}$$

Donde,

$T_k$  = el tiempo de residencia de la sección  $k^{\text{th}}$  [d]

$V_k$  = corresponde al volumen de la sección  $k^{\text{th}}$  [ $\text{m}^3$ ]

La sumatoria de los tiempos de residencia indica el tiempo de viaje:

$$t_{t,i} = \sum_{k=1}^i \tau_k$$

#### ➤ **Modelo de Temperatura**

La temperatura controla las tasas de reacción de los determinantes ya que en condiciones naturales la cinética de la mayoría de reacciones incrementa con la temperatura (Chapra, 1997). El modelo efectúa un balance de calor entre dos elementos adyacentes considerando vertimientos, captaciones y transferencia de calor hacia o desde la atmósfera y los sedimentos (**Figura 2-66**). Para un elemento  $i$  la variación de la temperatura se calcula a partir de la ecuación 13:

$$\begin{aligned} \frac{dT_i}{dt} &= \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} T_i + \frac{E_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) \\ &+ \frac{W_{h,i}}{\rho_w c_{pw} V_i} \left( \frac{m^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right) + \frac{J_{h,i}}{\rho_w c_{pw} H_i} \left( \frac{m}{100 \text{ cm}} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w c_{pw} H_i} \left( \frac{m}{100 \text{ cm}} \right) \end{aligned}$$

Donde,

$T_i$  = temperatura en el tramo  $i$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t$  = tiempo [d]

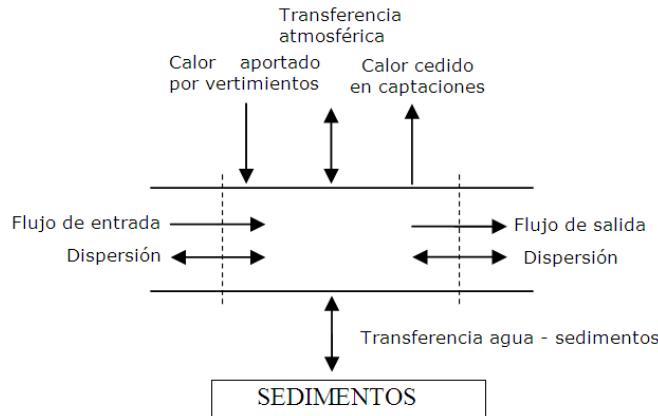
$E_i$  = coeficiente global de dispersión entre dos elementos  $i$  e  $i + 1$  [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]

$W_{h,i}$  = carga neta de calor aportada por fuentes puntuales y difusas en el elemento  $i$  [cal/d]

$\rho_w$  = densidad del agua [g/cm<sup>3</sup>]

 $C_{pw}$  = calor específico del agua [cal/(g °C)]

 $J_{h,i}$  = flujo neto de calor aire-agua [cal/(cm<sup>2</sup> d)]

 $J_{s,i}$  = flujo neto de calor sedimentos-agua [cal/(cm<sup>2</sup> d)].

**Figura 2-66 Balance de calor en cada elemento**

La carga neta de calor desde cada fuente identificada se calcula como se ilustra en la ecuación 14:

$$W_{h,i} = \rho C_p \left[ \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps,i,j} T_{psi,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i,j} T_{npsi,j} \right]$$

Donde,

 $T_{ps,i,j}$  = temperatura de la fuente puntual  $j$  de calor en el elemento  $i$  [°C]

 $T_{nps,i,j}$  = temperatura de la fuente difusa  $j$  en el elemento  $i$  [°C]

El flujo de calor en la superficie del agua es calculado como la combinación de procesos que corresponden a la transferencia neta de calor por radiación solar sobre la superficie del agua, transferencia neta entre la atmósfera y el agua, conducción y evaporación en la interface agua-aire. El modelo tiene en cuenta la radiación solar dependiendo de la localización geográfica de la fuente, que es afectada por las condiciones atmosféricas de nubosidad, reflexión y sombra.

#### ➤ Modelación de los determinantes

Como se indicó anteriormente, QUAL2K permite establecer la variación de los componentes de los cuerpos de agua mediante un modelo mecanístico que evalúa las interacciones entre un conjunto de determinantes (**Tabla 2-74**), dado un grupo específico de tasas de reacción.

**Tabla 2-74 Principales determinantes que modela QUAL2K**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDADES*
Conductividad	$s$	μmhos
Sólidos suspendidos inorgánicos	$m$	mgD/L
Oxígeno Disuelto	$o$	mgO <sub>2</sub> /L
Demanda bioquímica de oxígeno de reacción lenta BODs*	$c_s$	mg O <sub>2</sub> /L

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDADES*
Demanda bioquímica de oxígeno de reacción rápida BODf**	$c_s$	mg O <sub>2</sub> /L
Nitrógeno orgánico	$n_o$	µgN/L
Nitrógeno amoniacal	$n_a$	µgN/L
Nitratos	$n_n$	µgN/L
Fósforo orgánico	$p_o$	µgP/L
Fósforo inorgánico	$p$	µgP/L
Phytoplankton	$a_p$	µgA/L
Detritus	$m_o$	mgD/L
Patógenos	$x$	UFC/100 mL
Constituyentes genéricos***		Definido por usuario
Alcalinidad	$Alk$	mgCaCO <sub>3</sub> /L
Carbón inorgánico total	$c_T$	mol/L

\* Es la diferencia entre DQO – DBO<sub>5</sub>; \*\* Corresponde a la DBO<sub>5</sub>;\*\*\*

Este determinante es elegido por el usuario, puede escogerse como genérico la concentración de metales, cloruros, fenoles o hidrocarburos totales.

Para cada determinante el programa hace un balance de masa. Este balance se calcula teniendo en cuenta procesos de reaireación, sedimentación, demanda de oxígeno del sedimento, intercambio en el sedimento y flujo de carbono inorgánico en el sedimento (**Figura 2-71**). La ecuación de balance de masa para cada constituyente en un elemento se expresa como:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{Vi} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{Vi} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{Vi} + S_i \\ + \frac{E'_{hyp,i}}{Vi} (c_{2,i} - c_i)$$

Donde,

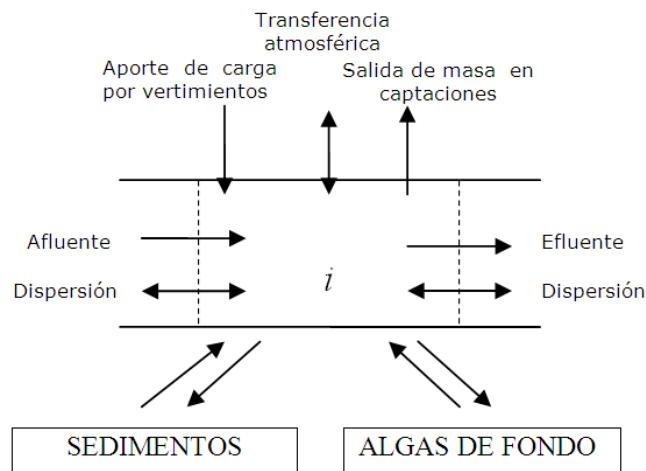
Wi = carga externa del componente que entra y sale en el elemento i [g/d, mg/d]

Si = fuentes y pérdidas del componente debidas a reacciones y mecanismos de transferencia de masa [g/m<sup>3</sup>/d, mg/m<sup>3</sup>/d].

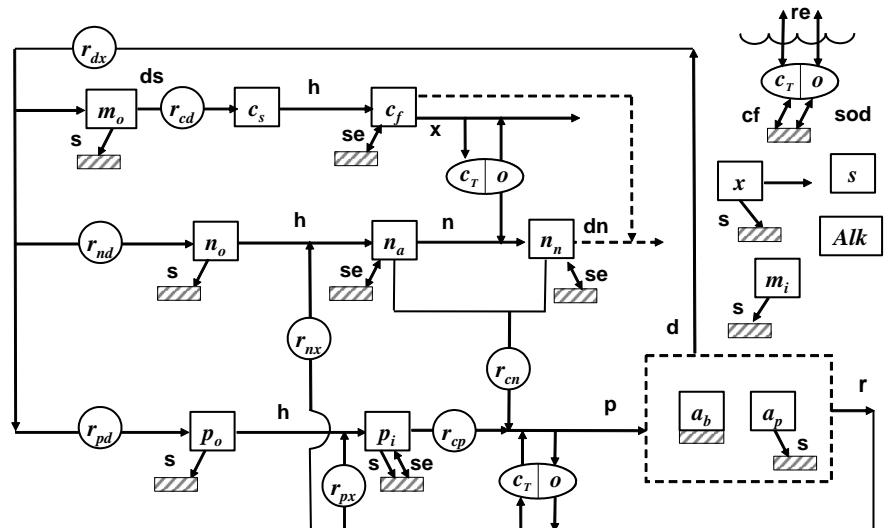
E'hyp,i = coeficiente global de intercambio de masa en el tramo i

ci = diferencia de concentración en la superficie del agua

c2,i = zona de flujo subsuperficial en los sedimentos


**Figura 2-67 Balance de masa en cada elemento**

La interacción entre los determinantes es establecida en el proceso cinético que incluye reacciones bioquímicas de disolución, hidrólisis, oxidación, nitrificación, desnitrificación, fotosíntesis, respiración, excreción y muerte (**Figura 2-68**).


**Figura 2-68 Modelo Cinético de los determinantes de Qual2k**

➤ Constantes de reacción de los parámetros de calidad

- ✓ Coeficiente de reaireación – K<sub>2</sub>

K<sub>2</sub> corresponde al coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno a la interfase líquido - gas. De acuerdo con la teoría de la renovación de la superficie, se establece que el grado de transferencia de oxígeno es proporcional a la diferencia de concentraciones existente entre, la concentración de saturación de la fase líquida a la temperatura y presión de la columna de agua, y la concentración actual de oxígeno disuelto. La constante de proporcionalidad corresponde al coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno, cuyas unidades son el inverso del tiempo, generalmente, 1/día.

Esta constante es fuertemente dependiente de la difusión turbulenta, de las propiedades fisicoquímicas de la corriente de agua, como la densidad, la temperatura, la capacidad calorífica, los esfuerzos de corte y de los fenómenos de advección que se den en el cuerpo de agua, así como de los efectos generados por la adsorción de algunos compuestos por parte de los sólidos suspendidos.

En forma general, para el coeficiente de transferencia de oxígeno de la fase gas a la fase líquida pueden utilizarse algunas expresiones conocidas propuestas por el modelo como la de O' Connors y Dobbinsm (1958), para flujo turbulento, bajas velocidades y condiciones anisotrópicas:

$$K_2(20\text{ }^{\circ}\text{C}) = (DmU)^{0.5} / H^{1.5}$$

Donde:

**K<sub>2</sub>:** Coeficiente de reaireación a 20 °C  
1/día

**H:** Profundidad media de la columna de agua o profundidad media del cuerpo de agua, pies

**U:** Velocidad promedio del cuerpo de agua  
pies/s

Siendo  $D_m$  el coeficiente de difusión molecular expresado ( $\text{pies}^2/\text{d}$ ), el cual es calculado por el modelo a través de la siguiente expresión:

$$P_m = 1.91 \times 10^3 (1.037)^{T-20}$$

Donde:

T: Temperatura promedio del cuerpo de agua, °C

#### 2.3.3.4 Constante de DBO - Kd

Esta constante se determina asumiendo que la cinética de descomposición de la materia orgánica total sigue el modelo de primer orden de Michaelis-Menten-Monod, mediante el cual la velocidad de degradación de la materia orgánica carbonácea es proporcional a la DBO carbonácea existente. La constante de proporcionalidad es precisamente la constante de la DBO ejercida por oxidación sobre el cuerpo de agua.

Para la determinación en el laboratorio de la constante de proporcionalidad, es necesario determinar la variación con el tiempo de la concentración de DBO y ajustar los datos de acuerdo con un modelo cinético de primer orden, utilizando el Método Integral o Diferencial. De esta manera, y al aplicar la cinética de Monod a la relación entre la  $\text{DBO}_5$  y la DBO última, el modelo aplica la siguiente expresión:

$$DBOt/DBO_{II} = 1 - e^{-tKd}$$

- ✓ Corrección de las constantes por temperatura

Debido a la alta influencia que ejerce la temperatura sobre el valor numérico de las constantes, es necesario realizar la corrección mediante el uso de la siguiente expresión:

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20}$$

En donde:

KT: Constante a la temperatura real.

día-1

Sin embargo, debido a que todas las constantes son calculadas por el modelo a partir de las constantes hidráulicas y las propiedades fisicoquímicas a la temperatura real del cuerpo de agua, no fue necesario efectuar esta corrección.

#### ➤ Características hidráulicas e hidrológicas del cuerpo de agua

La subcuenca del río Guayuriba está localizada en el departamento del Meta, en la vertiente oriental de la cordillera Oriental, con una extensión de 1.132,5km<sup>2</sup>. Los principales afluentes del río Guayuriba son los ríos Manzanares, Negrito y Sardinata, y las quebradas Vijagual, La Florida, Blanca, El Cascabel y El Engaño. El cauce principal de la microcuenca del río Guayuriba tiene una longitud de 118,1 km aproximadamente, en alturas que van desde los 3650 a los 175 msnm.

En el área de estudio, la red de drenaje se encuentra distribuida homogéneamente dentro del polígono del Bloque Cubarral campos Castilla y Chichimene, en donde las fuentes hídricas drenan en dirección: Oeste al sureste y corresponde a los caños que van hacia la cuenca del Río Pajure y finalmente al Metica; por otra parte los que drenan directamente al Metica y que son afluentes del Río Meta.

**Tabla 2-75 Ubicación del Río Guayuriba dentro del sistema regional de cuencas**

GRAN CUENCA	CUENCA	SUB- CUENCA 1	SUB - CUENCA 2	MICROCUENCAS
Río Orinoco	Río Meta	Río Metica	Río Guayuriba	Caños Pequeños
			Río Pajure	Caño Chichimene
				Río Acacias – Caño La Unión
				Río Orotoy
	Río Guamal	Río Guamal-PB	Río Humadea	Caños Pequeños
			Río Guamal-PM	Caño Grande
				Caño Cacayal
				Caño Blanco

El río tiene una gran capacidad de transporte de material de fondo y lateral, constituido por bloques espesos, cantos rodados, guijarros, gravas y arenas, dando lugar a grandes formaciones de depósitos aluviales sobre todo el recorrido del cauce de la zona plana, donde existen explotaciones de material de arrastre las cuales generan gran impacto en la morfología del cauce.

En la **Figura2-69** y **Figura2-70**, se muestran dos aspectos característicos del río en la zona de influencia del Bloque Cubarral campos Castilla y Chichimene: explotaciones de material de arrastre en el cauce (zona trenzado en la sabana) y cauce trenzado con terrazas bajas y altas.



**Figura 2-69 Río Guayuriba –  
Punto de vertimiento y explotación de  
material de arrastre**



**Figura 2-70 Río Guayuriba –  
Brazuelos e islotes en el cauce con  
terrazas bajas**

- **Características hidráulicas del cuerpo de agua**
- ✓ **Régimen hidrológico**

En la **Tabla 2-76** se muestra los valores mensuales multianuales de la lluvia en mm y la distribución porcentual mensual de la lluvia respecto al total anual (ver **Figura 2-71**).

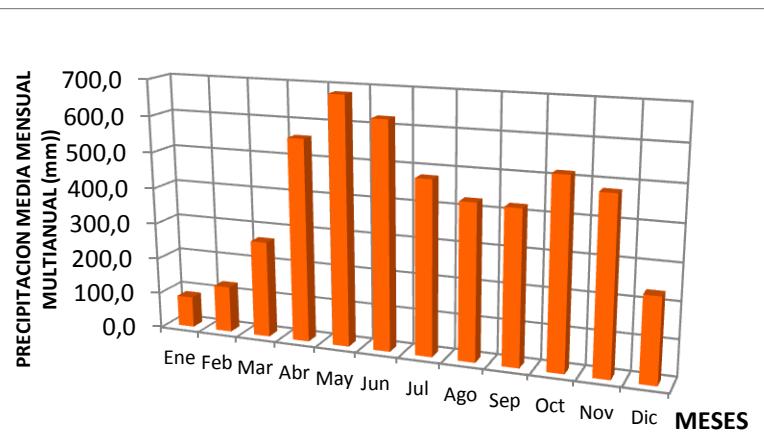
**Tabla 2-76 Precipitación pluviométrica – Estación Acacías**

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VR. ANUAL
%-Prec-mm	1,8	2,6	5,4	11,4	13,9	12,7	9,7	8,7	8,6	10,5	9,8	4,7	100,0
Prec-mm	86,2	128,5	267,3	560,2	682,8	625,9	479,3	428,3	423,5	517,5	480,7	233,3	<b>4.923,6</b>

Fuente: IDEAM. 2012.

El régimen pluviométrico de tipo monomodal, con un aumento progresivo o paulatino de la precipitación desde Enero hasta Mayo y un posterior descenso gradual desde junio hasta diciembre. Sin embargo es importante señalar que en Octubre se rompe ligeramente esta tendencia pues la pluviosidad en este mes no decrece con respecto al mes anterior, mes en el cual coinciden las masas húmedas de la Amazonía con el paso de la ZCIT hacia el sur, lo que incrementa un poco la precipitación en este período, por lo tanto, no se puede catalogar como régimen bimodal, ya que se trata de un mes o parte del mes de octubre, pero con porcentaje de lluvia un poco superior al 10 %.

Se identifica una época bien definida de lluvias intensas entre los meses de abril y noviembre; y otra de muy baja pluviosidad entre diciembre a marzo (época seca).



**Figura 2-71 Histograma de la Precipitación Total Mensual – Estación Acacias**  
**Fuente:** Estación Acacías. 2012

✓ Análisis de caudales

La información hidrológica se basa en la estación de Puente Carretera, la cual se considera aplicable al sitio de vertimiento en el Río Guayuriba, debido a que entre el sitio donde se ubicada la estación (puente principal de la vía Villavicencio – Acacias) y el sitio de vertimiento, no existe un solo afluente de consideración (solo cañitos muy pequeños e intermitentes, con áreas drenaje inferiores al kilómetro cuadrado de área de drenaje, a excepción de la quebrada Sardinata, la cual llega por la margen derecha, 3600 m aguas abajo del puente y donde se ubica la estación.)

En la **Tabla 2-77** se presenta un resumen de las características generales de la única estación hidrológica existente en el río Guayuriba en la zona de Sabana. Existen otras estaciones en la zona cordillerana, una de ellas llamada Casetejas instalada muy cerca a Puente Quetame y donde el río recibe el nombre de Río Negro, debido a la llegada de una quebrada denominada Quebrada Negra, la cual le aporta el sedimento de color negruzco por la elevada concentración de lutitas disueltas, está quebrada es afluente por la margen izquierda en un tramo donde el río marca el límite municipal entre Choachí y Fómeque. Aguas arriba de la desembocadura de esta quebrada, tiene otra estación hidrológica instalada y el río recibe el nombre de Río Blanco, debido a la claridad que presentan sus aguas en el área de su nacimiento, en el páramo de Chingaza.

**Tabla 2-77 Información general Estación Hidrológica**

DATOS ESTACIÓN HIDROLOGICA PTE. CARRETERA	
Tipo de estación:	LM – Limnigráfica
Nombre:	Puente Carretera
Código:	35027140
Fecha de Instalación:	Abril 15 de 1968
Fecha de suspensión:	Suspendida entre 1993 a 2006
Municipio:	Villavicencio
Departamento:	Meta
Corriente:	Río Guayuriba
Latitud:	4°04' N
Longitud:	73°45' W
Elevación:	575 msnm

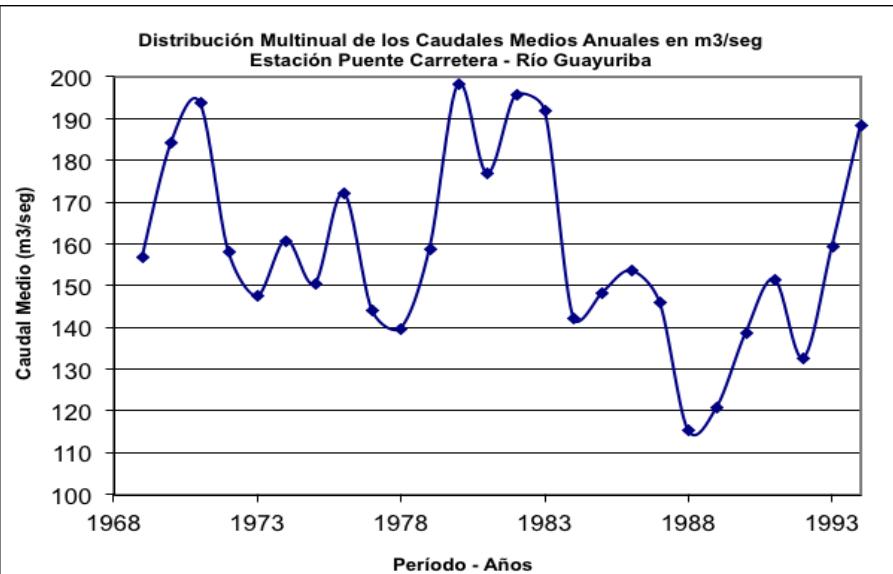
**DATOS ESTACIÓN HIDROLOGICA PTE. CARRETERA**

Período de Observación:	1969 a 1994 para Qmed, Qmax, Qmin
Estado Actual:	Activa a la fecha.

Fuente: IDEAM-2010

- Caudales medios

De acuerdo con los registros históricos en el río Guayuriba el caudal medio multianual para el período de 1969 a 1994 es de 158,0 m<sup>3</sup>/s. Para éste período (registros entre 1969 a 1994), existe una gran uniformidad en los valores anuales, en donde los caudales medios están dentro del rango de los 100 a 200 m<sup>3</sup>/s. Se aprecia la existencia de uno ciclos de cinco a seis años y tratando de completar la serie hasta el 2012, se puede predecir que estamos al inicio de un ciclo de aguas altas, tal y como se observa en la **Figura 2-72**.



**Figura 2-72 Caudales promedios históricos – Estación Carretera**

El modelo DURACAU, permitió determinar el caudal mínimo en cada año de la serie de caudales medios diarios, en el caso del río Guayuriba – estación Puente Carretera, para el período 1969 a 1994; luego permitió establecer series de caudales medios diarios días consecutivos para 1 a 15 días, es decir, define quince series. Esto lo consigue el software de la siguiente manera: busca el valor más pequeño de caudal diario de cada año, de esta manera establece una serie de un caudal mínimo para cada año entre 1969 a 1994 (26 años y 26 datos). Luego para dos días consecutivos, el software toma los caudales del día anterior y posterior (antes y después) del día que se estableció como el más pequeño de la primera serie y los promedia, determinando el caudal promedio de dos días consecutivos y toma el valor más bajo y de esta manera establece el caudal medio de dos días consecutivos y de esta manera una nueva serie de 26 datos (26 años 1969 a 1994). De igual forma continua la interacción para tres días consecutivos.

De la información generada por el modelo se pudo establecer que el caudal mínimo para un día en todo el período de 1969 a 1994, corresponde a 19,20 m<sup>3</sup>/s, el cual se presentó en el año de 1988 y específicamente el día 25. Es de anotar que entre 1987 y 1988, se presentó el fenómeno Niño más fuerte del siglo XX y generó una sequía muy grande en todo el territorio de Colombia.

Posteriormente, durante los días 26 y 27 de marzo, se volvió a presentar el mismo caudal: 19,20 m<sup>3</sup>/s, es decir, durante dos y tres días consecutivos, se registró en el río Guayuriba, el mismo caudal mínimo. A partir del cuarto día se aumentó el caudal a 19,30 m<sup>3</sup>/s y así sucesivamente hasta quince días consecutivos cuando el caudal fue de 21,04 m<sup>3</sup>/s. En la **Tabla 2-78**, se presentan los caudales mínimos para 1 y para 15 días consecutivos y el número de días consecutivos de cada año, en que se presentó el caudal más pequeño.

**Tabla 2-78 Caudales Medios Días Consecutivos 1 y 15 - Río Guayuriba - Estación Puente Carretera**

FECHA Y DÍAS	PERÍODO	QMIN-HISTORICO	QMIN-15 DÍAS	NO. DE DÍAS CON ESTE Q.
Marzo-25-26-27	1988	19,20	21,04	3
20 de Enero	1990	23,60	25,01	1
24 de Marzo	1978	24,40	27,45	1
Febrero 4-5-6-	1977	24,70	26,56	3
Febrero 20-21	1992	26,40	27,63	2
20 de Marzo	1970	28,00	35,79	1
19 de Marzo	1969	29,70	37,21	1
04 de Abril	1979	30,40	34,40	1
<b>Promedio</b>		<b>25,80</b>	<b>29,39</b>	<b>1,63</b>

Del análisis se estableció que bajo condiciones climáticas e hidrológicas de verano, es altamente probable, que cualquier caudal mínimo, registrado en la estación hidrológica del río Guayuriba, no se mantenga por más de 24 horas y éste se incremente al día siguiente.

- o Caudales máximos y mínimos

Se tomaron los caudales máximos y mínimos instantáneos anuales de la estación Puente Carretera - Río Guayuriba, para realizar el análisis de frecuencia. Para tal efecto se utilizó el modelo hidrológico estadístico HYFA (Hydrological Frequency Analysis), el cual permitió estimar los caudales máximos y mínimos para diferentes períodos de retorno. En la **Tabla 2-79**, se muestran los estadígrafos y los caudales máximos estimados para el Río Guayuriba.

**Tabla 2-79 Análisis de frecuencia – estadígrafos y caudales máximos Río Guayuriba – estación Puente Carretera – Periodo 1969 a 1994**

PARÁMETRO ESTADÍSTICO		CAUDAL MÁXIMO (m <sup>3</sup> /s)	
NOMBRE	VALOR	TR - AÑOS	VALOR
Número de datos	26	2	1.213,5
Período	1969-1994	5	1.481,7
Valor Medio	1.211,7	10	1.620,9
Desviación Estándar	320,2	20	1.735,4
Coeficiente de Variación	0,264	25	1.768,7
Coeficiente de Sesgo	-0,026	50	1.863,7
Coeficiente de Curtosis	2,36	100	1.948,9

De acuerdo a los valores estadísticos obtenidos de la serie histórica o empírica para la estación Puente Carretera – río Guayuriba, se procedió a ajustarla a una distribución teórica del tipo Person

Tipo III. De igual forma se procede con los caudales mínimos de la estación Puente Carretera, cuyos resultados se presentan en la **Tabla 2-80**.

**Tabla 2-80 Análisis de frecuencia – estadígrafos y caudales mínimos Río Guayuriba – estación Puente Carretera – Periodo 1969 a 1994**

PARÁMETRO ESTADÍSTICO		CAUDAL MÍNIMO (m <sup>3</sup> /s)	
NOMBRE	VALOR	TR - AÑOS	VALOR
Número de datos	26	2	41.12
Período	1969-1994	5	32.87
Valor Medio	34.4	10	26.73
Desviación Estándar	9.34	20	24.12
Coeficiente de Variación	0.272	25	22.20
Coeficiente de Sesgo	0.972	50	20.69
Coeficiente de Curtosis	4.55	100	19.07

Una vez realizado el análisis de frecuencia, se estimó un caudal de 19,07 m<sup>3</sup>/s para 100 años de período de retorno, es decir, existe una diferencia de 130 L/s entre el caudal considerado dentro del modelo para una situación más extrema de verano y el caudal que se espera en promedio cada 100 años, lo cual garantiza que los valores tomados son efectivamente los más precisos para un momento de verano o sequía extrema en la cuenca del río Guayuriba. Esta diferencia tan baja entre los caudales establecidos, se debe a la gran uniformidad que existe en los caudales mínimos históricos que se presentan cada año en la cuenca del río Guayuriba, muy seguramente a una permanencia en el suministro de agua desde algunos sectores como el mismo páramo de Chingaza o en la parte media de la cuenca, donde a pesar de todo, aún en los meses más secos, se registran lluvias especialmente en la parte media baja (piedemonte) de la cuenca.

Para efectos de la modelación se tomó el caudal mínimo de retorno de 10 años el cual fue estimado en **26,73m<sup>3</sup>/s**. Este valor es permitió evaluar los resultados del modelo para una condición conservadora, la cual se espera en la época de sequía donde la capacidad de dilución del cuerpo de agua es la más baja. De esta forma, las condiciones del vertimiento que se estimen para el periodo seco podrían aplicarse para la totalidad del año.

- ✓ Análisis de aforos de caudales sobre el cuerpo de agua

Para poder establecer algunos parámetros hidráulicos solicitados por el modelo se realizaron dos campañas de aforo: la primera se ejecutó los días del 09 al 15 de diciembre de 2011 y la segunda durante la segunda semana de febrero de 2012 (del 14 al 20).

Durante las dos primeras semanas del mes de diciembre de 2011, se realizó una visita de campo, la cual contemplaba realizar aforos en el río Guayuriba – sector del vertimiento (margen derecha). En esa temporada el río presentaba caudales muy altos. En la **Tabla 2-81**, se presentan los caudales que presentó el río y registrados en la estación Puente Carretera – río Guayuriba, para los días entre el 01 al 20 de diciembre de 2011.

**Tabla 2-81 Caudales registrados - Diciembre de 2011 -**  
**Río Guayuriba - Estación Puente Carretera**

Día	Q - m <sup>3</sup> /s	Día	Q - m <sup>3</sup> /s
1	240,0	11	164,0
2	196,0	12	142,0

Día	Q - m <sup>3</sup> /s	Día	Q - m <sup>3</sup> /s
3	185,0	13	140,0
4	199,0	14	140,0
5	170,0	15	126,0
6	197,0	16	150,0
7	308,0	17	150,0
8	182,0	18	317,0
9	164,0	19	197,0
10	169,0	20	164,0

Los caudales muy altos que se presentaron en el río que dificultaron las actividades propuestas de aforo. En la **Figura 2-24**, se puede apreciar el estado del río Guayuriba en el brazo central el 10 de diciembre de 2011 al momento de los aforos, donde se puede ver el tamaño de la creciente del río y la imposibilidad logística para hacer los aforos.

Las condiciones hidrológicas en la parte central del río dificultaron realizar el aforo de la totalidad de los brazos. El día 10 de diciembre de 2011 se registraron 169,0 m<sup>3</sup>/s en la estación hidrológica de Puente Carretera y el aforo realizado ese mismo día en el brazo derecho fue de 20,54 m<sup>3</sup>/s, es decir, por el brazo derecho pasaban aproximadamente el 12 % del caudal total del río, lo que corrobora que por la parte central se mueven entre el 85 al 90 % del caudal total del río y por lo tanto las condiciones hidráulicas (de velocidad y profundidad fundamentalmente), impidieron tomar únicamente mediciones en el brazo derecho del vertimiento.



**Figura 2-73 Estado del río Guayuriba en el brazo central – diciembre 10 de 2011 – frente al punto de Vertimiento**

En la **Tabla 2-82**, **Tabla 2-83** y **Tabla 2-84** se presentan los resultados de los aforos realizados en Diciembre de 2011.

**Tabla 2-82 Aforo del brazo derecho del Río Guayuriba – frente al vertimiento**

SECCION 1		CALCULO DEL CAUDAL					
DISTANCIA	PROFUNDIDAD	PUNTO DE AFORO	PROFUNDIDAD MEDIA VERTICAL	VELOCIDAD MEDIA	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL	SUMATORIA
			m	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	
		Orilla Der					
35,50	0,00	Sup.	0,00	0,005	0,000	0,000	-
33,00	-0,28	Sup.	0,14	0,246	0,350	0,086	85,96
30,00	-0,63	Sup.	0,46	0,607	1,365	0,829	828,68
27,00	-0,83	Sup.	0,73	0,935	2,190	2,047	2.047,32
24,00	-0,88	Sup.	0,86	1,164	2,565	2,985	2.985,15
21,00	-0,89	Sup.	0,89	1,188	2,655	3,154	3.153,87
18,00	-0,95	Sup.	0,92	1,188	2,760	3,279	3.278,60
15,00	-0,98	Sup.	0,97	0,594	2,895	1,719	1.719,49
12,00	-0,96	Sup.	0,97	0,505	2,910	1,469	1.468,91
9,00	-0,85	Sup.	0,91	0,925	2,715	2,512	2.511,95
6,00	-0,64	Sup.	0,75	0,732	2,235	1,637	1.636,94
3,00	-0,40	Sup.	0,52	0,528	1,560	0,823	822,99
0,00	0,00	Orilla Izq	0,20	0,005	0,600	0,003	2,80
		<b>TOTAL</b>	<b>0,69</b>	<b>0,828</b>	<b>24,800</b>	<b>20,54</b>	<b>20.542,65</b>

Nota: Aforo realizado en todo el brazo derecho del río y correspondiente al volumen total de agua que se mueve por este sector del río y sumado a él, el agua del vertimiento)

**Tabla 2-83 Aforo del brazuelo del Vertimiento – Diciembre 10 de 2011**

SECCION		CALCULO DEL CAUDAL					
DISTANCIA	PROFUNDIDAD	PUNTO DE AFORO	PROFUNDIDAD MEDIA VERTICAL	VELOCIDAD MEDIA	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL	SUMATORIA
			m	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	
		Orilla Der					
16,2	0,00	Sup.	0,00	0,005	0,000	0,000	-
15	-0,11	Sup.	0,06	0,132	0,066	0,009	8,73
14	-0,10	Sup.	0,11	0,277	0,105	0,029	29,08
13	-0,18	Sup.	0,14	0,303	0,140	0,042	42,48
12	-0,10	Sup.	0,14	0,325	0,140	0,046	45,52
11	-0,10	Sup.	0,10	0,407	0,100	0,041	40,71
10	-0,11	Sup.	0,11	0,477	0,105	0,050	50,08
9	-0,12	Sup.	0,12	0,544	0,115	0,063	62,61
8	-0,10	Sup.	0,11	0,564	0,110	0,062	62,01
7	-0,15	Sup.	0,13	0,853	0,125	0,107	106,61
6	-0,17	Sup.	0,16	0,594	0,160	0,095	95,03
5	-0,29	Sup.	0,23	0,505	0,230	0,116	116,10
4	-0,38	Sup.	0,34	0,925	0,335	0,310	309,95

SECCION		CALCULO DEL CAUDAL						
DISTANCIA	PROFUNDIDAD	PUNTO DE AFORO	PROFUNDIDAD MEDIA VERTICAL	VELOCIDAD MEDIA	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL	SUMATORIA	
m	m		m	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	L/s	
3	-0,40	Sup.	0,39	0,732	0,390	0,286	285,64	
2	-0,38	Sup.	0,39	0,528	0,390	0,206	205,75	
1	-0,26	Sup.	0,32	0,005	0,320	0,001	1,49	
0	0,00	Orilla Izq	0,13	0,000	0,130	0,000	-	
		<b>TOTAL</b>	<b>0,25</b>	<b>0,494</b>	<b>2,96</b>	<b>1,46</b>	<b>1.461,78</b>	

Nota: Aforo correspondiente al caudal que sale del vertimiento.

**Tabla 2-84 Aforo del brazuelo derecho frente a Casa de Bombas – Antes del Vertimiento**

SECCION		CALCULO DEL CAUDAL						
DISTANCIA	PROFUNDIDAD	PUNTO DE AFORO	PROFUNDIDAD MEDIA VERTICAL	VELOCIDAD MEDIA	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL	SUMATORIA	
m	m		m	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	L/s	
		Orilla Der						
27,50	-0,20	Sup.	0,10	0,005	-2,750	-0,013	-12,83	
27,00	-0,48	Sup.	0,34	0,282	0,170	0,048	47,90	
24,00	-0,75	Sup.	0,62	0,940	1,845	1,734	1.733,69	
21,00	-0,78	Sup.	0,77	1,282	2,295	2,942	2.941,94	
18,00	-0,67	Sup.	0,73	1,330	2,175	2,893	2.892,95	
15,00	-0,58	Sup.	0,63	1,414	1,875	2,652	2.652,08	
12,00	-0,60	Sup.	0,59	0,705	1,770	1,248	1.247,51	
9,00	-0,56	Sup.	0,58	0,666	1,740	1,159	1.159,28	
6,00	-0,70	Sup.	0,63	1,494	1,890	2,824	2.823,60	
4,00	-0,48	Sup.	0,59	1,277	1,180	1,507	1.506,94	
2,00	-0,27	Sup.	0,38	0,810	0,750	0,607	607,15	
0,00	0,00	Orilla Izq	0,14	0,005	0,270	0,001	1,26	
		<b>TOTAL</b>	<b>0,51</b>	<b>1,332</b>	<b>13,210</b>	<b>17,60</b>	<b>17.601,45</b>	

Nota: Aforo correspondiente al caudal que pasaba antes del vertimiento por solo el brazo derecho.

De igual forma se realizó una visita al vertimiento del río Guayuriba el día 15 de febrero de 2012, cuando se consideraba período de verano o de aguas bajas, sin embargo, el brazo derecho no se pudo aforar, debido a que este estaba seco. En la **Figura 2-74**, se muestra el estado del brazo derecho, donde había agua, pero era el agua que se apoza junto al talud derecho y procedente de la infiltración desde el brazo central del río, es decir, agua que escurre por entre las barras o islotes y llega por pendiente hacia la orilla derecha.



**Figura2-74 Brazo Derecho del Vertimiento Seco - Río Guayuriba – Febrero 12 de 2012**

En Febrero de 2012 solo se pudo hacer un aforo en la temporada de verano y correspondiente al caudal que sale de vertimiento, cuyo caudal medido fue de 1507,64 l/s.

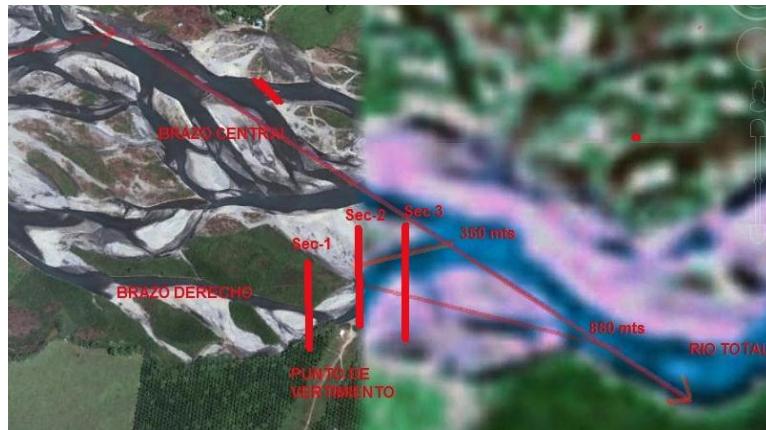
- ✓ Nivelación Topográfica

Durante la visita del mes de febrero de 2012, se realizó la nivelación topográfica del río Guayuriba, donde se tomaron tres secciones transversales en el tramo del brazo derecho y donde se encuentra el vertimiento. Las tres secciones se tomaron de la siguiente manera (ver **Figura 2-26**).

- o Una sección transversal denominada principal y que toma el talud derecho, pasa por el punto donde afloran las aguas del vertimiento y llega hasta la orilla derecha del brazo central del río Guayuriba y por donde pasaba en ese momento todo el flujo o caudal del río, ya que los brazos de la margen derecha e izquierda del río se encontraban totalmente secos.
- o Una sección localizada aguas abajo, la cual toma el playón de material granular que se forma junto a la orilla derecha del río y en la orilla izquierda de este brazuelo derecho, pasa el caudal que sale del vertimiento, es decir, en este momento solo corría por allí el agua del vertimiento, ya que el brazo derecho estaba seco.
- o La otra sección se toma aguas arriba del vertimiento, tomando el talud donde está la casa de bombas y el lecho del brazo derecho, hasta llegar a la orilla derecha del brazo central del río.

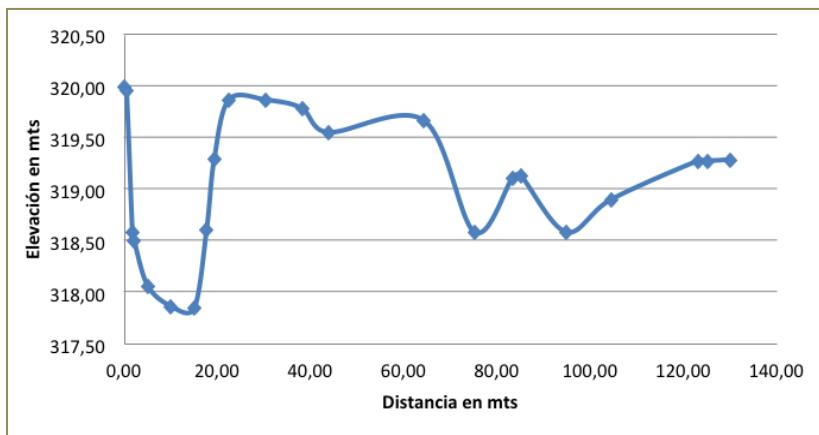
La nivelación permitió tomar las cotas de los taludes de las orillas derecha e izquierda de todos los brazuelos, como también el nivel de agua de cada uno de ellos, a fin de estimar la pendiente longitudinal tanto de los taludes como del lecho de cada uno de los brazuelos. Estas pendientes son fundamentales para ser usadas en el modelo de calidad de agua. Ya se plantearon

En la **Figura 2-76** a la **Figura 2-78**, se observan las secciones de aforo medidas, aguas arriba del punto de vertimiento, en el punto de vertimiento en el centro del brazo y en un punto aguas abajo del sitio de vertimiento. Así mismo se presentan los resultados de profundidad y velocidad promedio, área de las sección transversal y caudal.

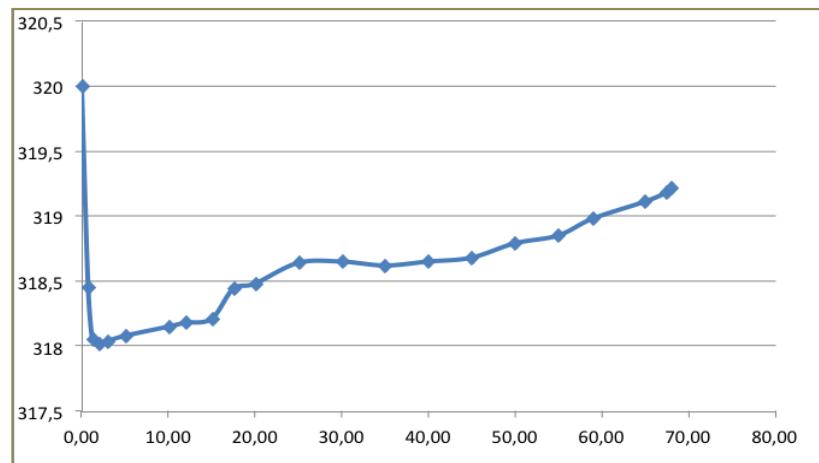


**Figura 2-75 Localización de los aforos realizados sobre el Río Guayuriba**

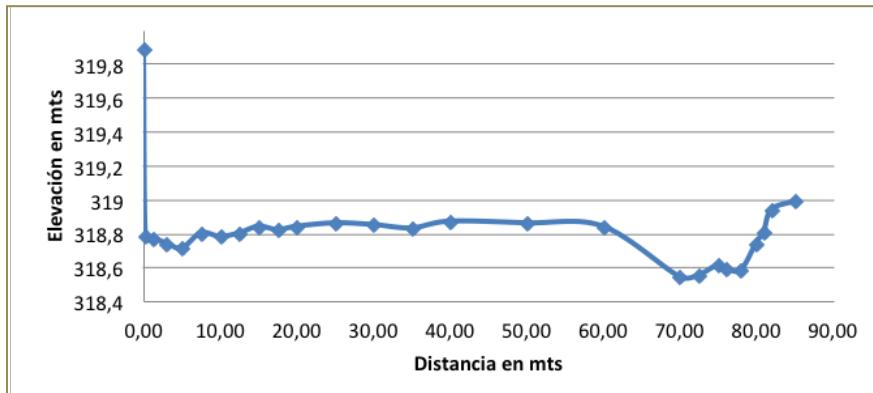
Fuente: Adaptado por el autor de Google. 2006.



**Figura 2-76 Sección principal - Frente al Vertimiento – Río Guayuriba**



**Figura 2-77 Río Guayuriba – Sección Principal - Vertimiento**


**Figura 2-78 Río Guayuriba – Sección Transversal Aguas Abajo**

En la **Tabla 2-85** se presenta el resumen de los aforos, donde se observar que la geometría, las velocidades y los caudales de los distintos brazos son variables, debido a la dinámica de la corriente.

**Tabla 2-85 Resumen de los resultados de aforo sobre el río Guayuriba**

FECHA	SECCIÓN	Q AFORADO	HMED	VMED	BMED
		m <sup>3</sup> /s	m	m/s	m
DICIEMBRE 13-2011	Brazo Derecho antes de vertimiento	20,54	0,69	0,83	25,5
	Brazo vertimiento (Agua natural + vertimiento)	17,6	0,51	1,33	27,5
	Vertimiento	1,46	0,25	0,49	16,2
FEBRERO 15-2012	Vertimiento	1,51	0,41	0,61	7,2
Febrero 20 - 2011	Brazo Derecho antes de vertimiento		0,44	0,86	12,3

*Fuente: El estudio. 2012.*

#### ➤ Parámetros morfológicos

Con base en los resultados de aforo, se obtuvieron los parámetros básicos, los cuales a su vez fueron empleados para estimar las relaciones entre parámetros que solicita el modelo y que caracterizan el cuerpo de agua **Tabla 2-86**.

**Tabla 2-86 Características hidráulicas básicas del cuerpo de agua medidas por aforo**

N	CORRIENTE	ANCHO(M)	PROFUNDIDAD H (M)	CAUDAL MEDIDO Q (M <sup>3</sup> /S) +	VELOCIDAD U (M/S)
1	Brazo derecho, Dic-12	35,87	0,69	20,54	0,83
2	Brazo derecho + vert Dic-12	25,95	0,51	17,60	1,33
3	Brazo Derecho, Feb-12	12,32	0,44	4,66	0,86

+ Caudal promedio aforado, tomado únicamente para estimar los parámetros hidráulicos solicitados por el modelo QUAL2K.

*Fuente: Aforos sobre el río Guayuriba, sector de vertimiento. Diciembre de 2011.*

Con base en los resultados de aforo, se obtuvieron los parámetros morfológicos de la corriente, los cuales a su vez fueron empleados para estimar las relaciones entre parámetros que solicita el modelo y que caracterizan el cuerpo de agua. Los parámetros solicitados por el modelo comprenden las relaciones entre Velocidad vs Caudal y Niveles vs Caudal. El modelo QUAL2K emplea las siguientes expresiones para relacionar la velocidad media del flujo y la profundidad promedio, con respecto a los caudales:

$$U = aQ^b; H = cQ^d \quad ; \quad B = eQ^f$$

Donde:

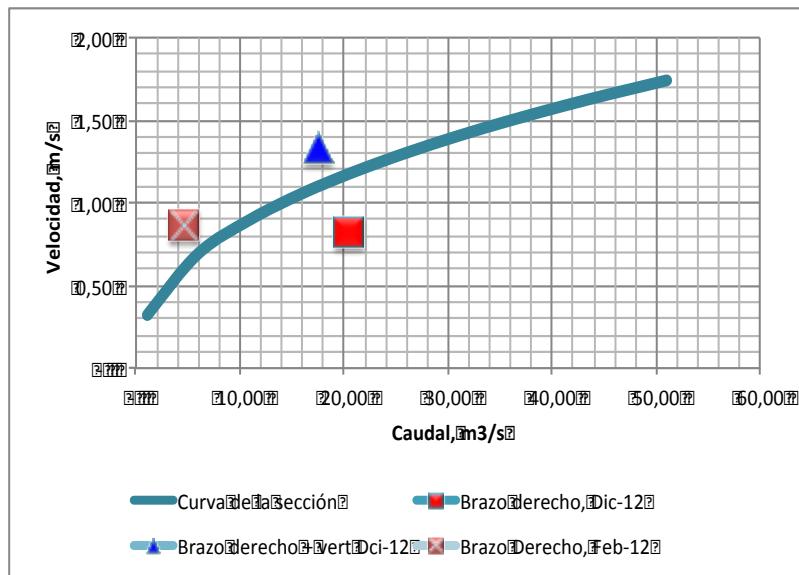
- U** : Velocidad promedio del cuerpo de agua, m/s  
**H** : Profundidad promedio del cuerpo de agua, m  
**B** : Ancho promedio del cuerpo de agua, m  
**a, b, c, d, e, f** : Constantes empíricas hidráulicos propios de la corriente, los cuales son indicativos de la morfología de la corriente.

Los valores de b y d, típicamente varían en los rangos 0,4-0,6 y 0,3-0,5 con valores típicos de 0,43 y 0,45 respectivamente (Barnwell, 1989). Los parámetros cumplen con los requisitos de que  $a \times c \times e = 1$  y  $b+d+f = 1$ . Conocidos b y d, los parámetros a y c fueron estimados a partir de los resultados de aforo y las expresiones ya mencionadas. Los resultados se presentan en la **Tabla 2-87**

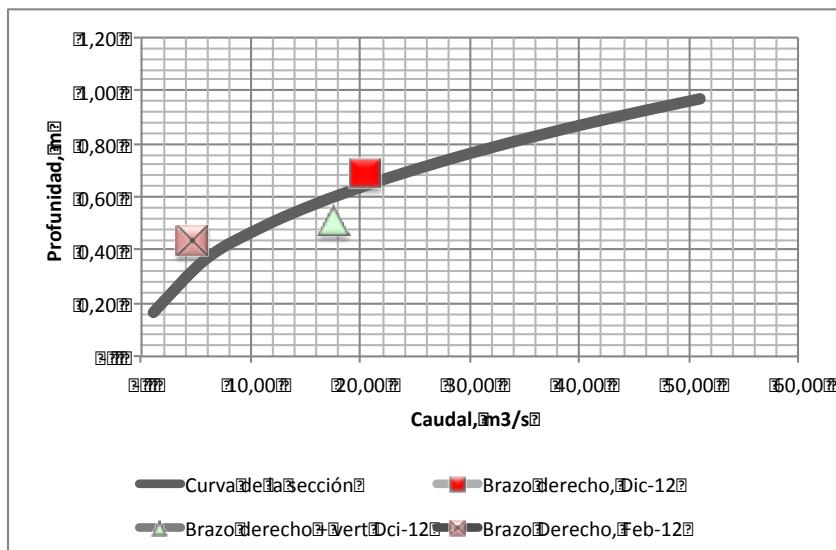
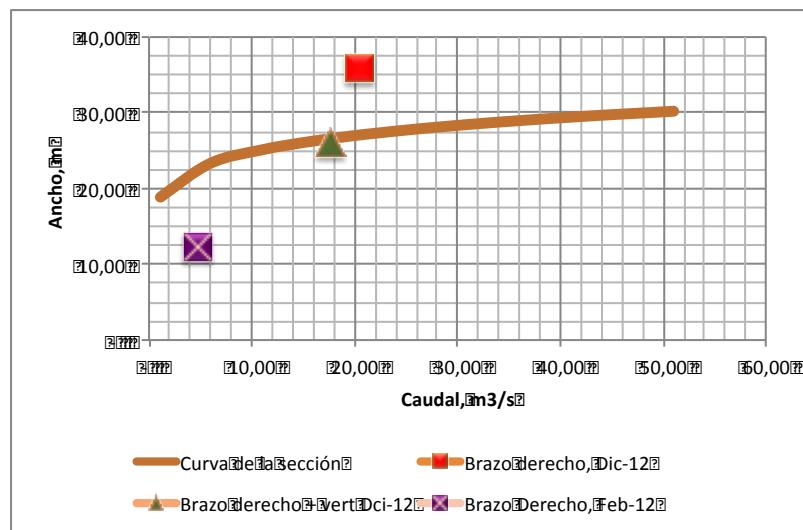
**Tabla 2-87 Parámetros morfológicos de la corriente en el punto de vertimiento**

N	CORRIENTE	A	B	C	D	E	F
1	Brazo derecho, Dic-12	0,23	0,43	0,18	0,45	24,96	0,12
2	Brazo derecho + vert Dci-12	0,39	0,43	0,14	0,45	18,39	0,12
3	Brazo Derecho, Feb-12	0,44	0,43	0,22	0,45	10,24	0,12
	Promedio:	<b>0,32</b>	<b>0,43</b>	<b>0,17</b>	<b>0,45</b>	<b>18,84</b>	<b>0,12</b>

En la **Figura 2-79**, **Figura 2-80**y**Figura 2-81**se presentan las curvas hidráulicas del río Guayuriba en el sitio de vertimiento empleadas para la modelación.



**Figura 2-79 Curva típica de la sección – Velocidad Vs Caudal**


**Figura 2-80 Curva típica de la sección – Profundidad Vs Caudal**

**Figura 2-81 Curva típica de la sección – Ancho Vs Caudal**

➤ **Zona de longitud de mezcla**

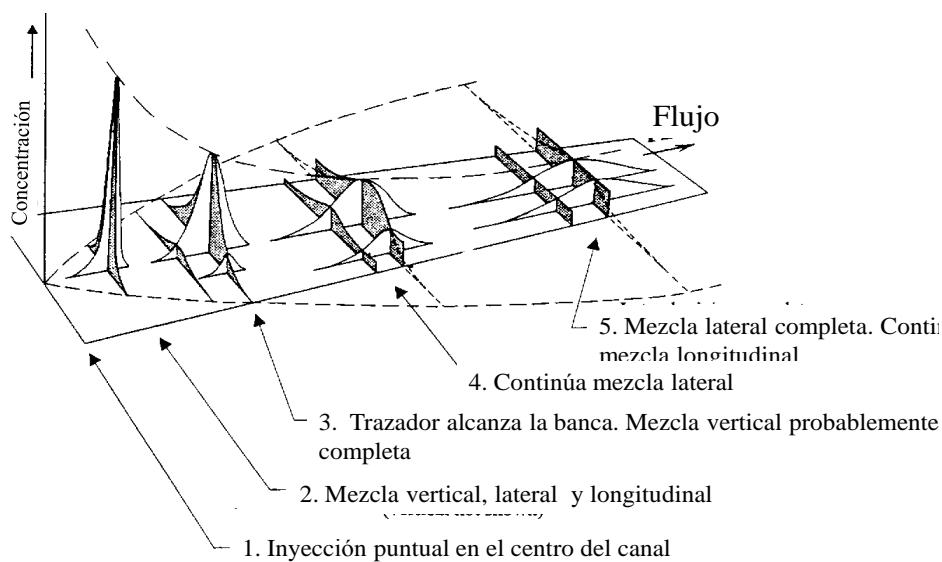
✓ **Introducción**

En este numeral se presentan el cálculo de Zona de Mezcla, basados en el documento “Environmental Quality Standards in the EC-Water Framework Directive: Consequences for Water Pollution Control for Point Sources” escrito por Gerhard H. Jirka, Tobias Bleninger, Richard Burrows y Torben Larsen en el año 2004 para la European Water Management (EWA).

El objetivo principal de la EWA era la de determinar el sector de un cuerpo de agua sobre no se podrían aplicar las normas de calidad en los cuerpos de agua, debido a que el agua residual aún estaba en proceso de mezcla. De esta manera el estudio se hizo como base para definir reglas más claras sobre el tema de vertimientos industriales en cuerpos de agua.

✓ Conceptos básicos

Cuando el contaminante se vierte a un cuerpo de agua en un punto y en forma continua, este no se distribuye inmediatamente en toda la masa, sino que éste tarda un tiempo dependiendo del gradiente de velocidad o de las condiciones de mezcla del cuerpo de agua receptor. En la **Figura 2-82** se muestra el comportamiento que tendría la concentración de la pluma de vertimiento en dirección transversal al cuerpo de agua (transporte por difusión), observándose que existe un punto, aguas abajo del vertimiento donde la concentración de la pluma sería igual en una sección transversal; dicho punto correspondería a la longitud de mezcla. Este principio es el que se utiliza para la valoración de la zona de mezcla con el uso de trazadores.

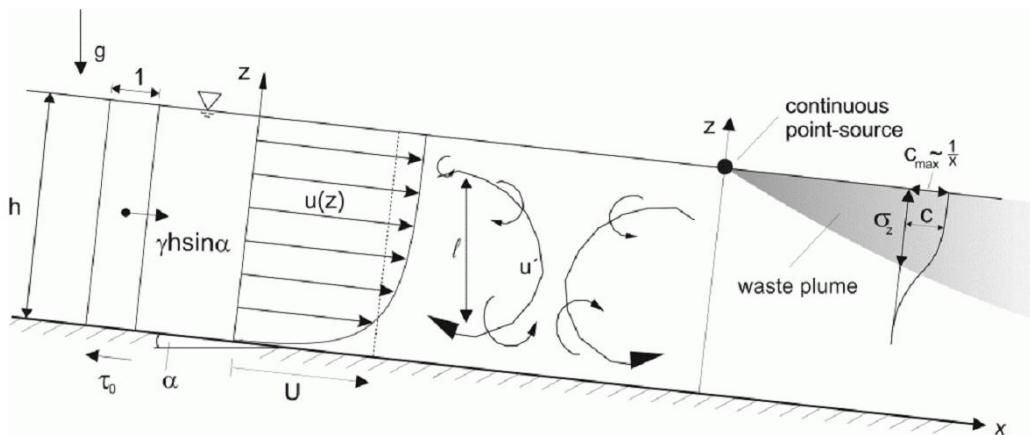


**Figura 2-82 Comportamiento del vertimiento en la longitud de mezcla**

Para el caso del vertimiento, el agua residual vertida forma una pluma que se distribuye en tres direcciones, como son el fondo ( $z$ ), transversalmente ( $y$ ) y en la dirección de flujo ( $x$ ). En la **Figura 2-83** se presenta un corte longitudinal (dirección) de un cuerpo de agua con flujo turbulento y asumiendo que la descarga se hace en un punto ubicado a nivel superficial.

Hidráulicamente se han definido los coeficientes de difusión en las diferentes direcciones de dispersión de la pluma contaminante en el agua. Estos coeficientes son:

$$\begin{array}{ll} D_z & = a.v.h \quad \text{Coeficiente de difusión vertical} \\ D_y & = b.v.h \quad \text{Coeficiente de difusión horizontal} \end{array}$$

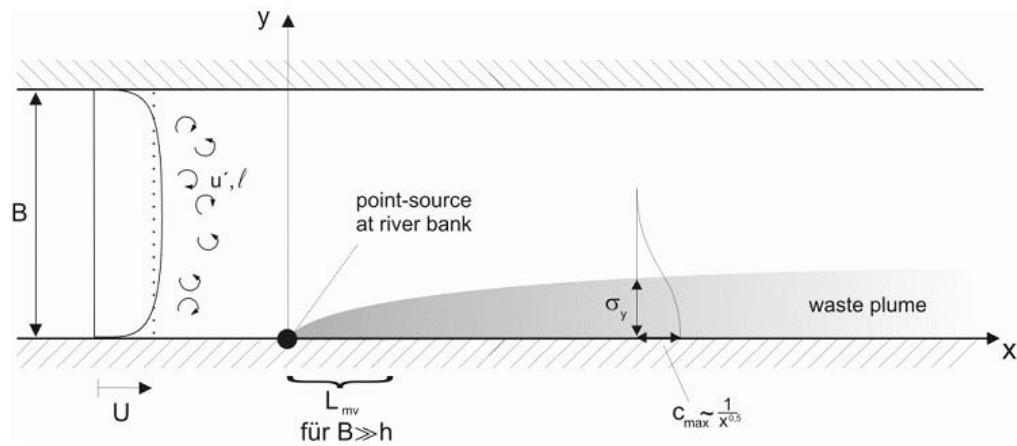


**Figura 2-83 Perfil longitudinal de un Cuerpo de Agua con Flujo Turbulento**  
 Fuente: Environmental Quality Standards in the EC-Water Framework Directive.EWA. 2004

Donde:

- a: Parámetro que varía de  $0,07 \pm 50\%$  (Rutherford, 1994)
- b: Parámetro que varía de  $0,5 \pm 50\%$  (Fischer, 1979)<sup>4</sup>
- v: Velocidad de fricción igual a  $(ghS)^{1/2}$ , donde "g" es la constante de gravedad, "h" es la profundidad media del cuerpo de agua y "S" la pendiente promedio del fondo.

Si el punto de vertimiento se ubica lateralmente y en forma continua, la pluma presentará diferentes concentraciones en las tres direcciones con una distribución aproximadamente gausiana, con valores de concentración máxima en las márgenes del cuerpo de agua (Ver Figura 2-84) La concentración se hace menor con la distancia "x" y su valor máximo es inversamente proporcional con " $x^{1/2}$ ".



**Figura 2-84 Esquema en planta de un vertimiento lateral continuo**  
 Fuente: Environmental Quality Standards in the EC-Water Framework Directive.EWA. 2004.

La distancia longitudinal (Lm) a la cual se logra la mezcla completa, normalmente se define como el punto en el cual se logra un 90% de mezcla del contaminante en el agua (Fischer et al., 1979). De esta manera la expresión de cálculo es la siguiente:

$$Lmz = 0,4 Uh^2/Dz$$

Esta ecuación expresa la dispersión de la pluma en la dirección vertical "z", donde:

- U : Velocidad promedio del flujo en la dirección "x", m/s  
 h : Profundidad media del cuerpo de agua, m  
 Dz : Coeficiente de difusión vertical, m<sup>2</sup>/s.

Por su parte para la difusión transversal de la pluma contaminante (en la dirección "y") la longitud en la cual se logra la mezcla completa (Lmh) se puede estimar de la siguiente manera:

$$Lmy = 0,4 UB^2/Dy$$

Donde:

- B : Ancho promedio del cuerpo de agua, m  
 Dy : Coeficiente de difusión horizontal, m<sup>2</sup>/s.

✓ Calculo de la zona de Mezcla

Con base en las expresiones anteriores, se estimó la longitud por difusión vertical (Lmz) y horizontal (Lmy) de mezcla del río Guayuriba para los parámetros hidráulicos obtenidos por aforados, los obtenidos con trazadores y los estimados para los escenarios de caudal promedio y mínimo (Ver **Tabla 2-88**).

De esta forma se observó que la longitud de mezcla promedio donde ser puede garantizar la mezcla completa se estima en 2,0 Km. Normativamente esta longitud de mezcla corresponden a las zona de influencia directa del vertimiento, donde se pueden obtener concentraciones que podrían superar los objetivos de calidad del cuerpo de agua debido a que aún no se ha logrado la mezcla completa entre el vertimiento y el cuerpo natural.

**Tabla 2-88 Cálculo de la longitud de mezcla**

N	ESCENARIO	CORRIENTE	B(M)	H (M)	Q MEDIDO (M <sup>3</sup> /S)	U (M/S)	DY M <sup>2</sup> /S	DZ M <sup>2</sup> /S	LMY M	LMZ M
1	Aforos	Brazo derecho, Dic-12	25,5	0,970	20,5	0,83	0,09	0,013	2.279,9	23,6
2		Brazo derecho + vert Dic-12	27,5	0,5	17,6	1,33	0,03	0,005	12.168,9	26,6
3		Brazo Derecho, Feb-12	12,3	0,4	4,7	0,86	0,03	0,004	1.797,1	16,5
5	Caudal mínimo	Caudal total	20,2	0,76	19,20	1,26	0,07	0,009	3.121,5	31,6
6	Caudal promedio	Caudal total	23,0	1,24	57,7	2,02	0,14	0,019	3.104,4	64,8
		Promedio:				1,19	0,07	0,010	4.512,0	30,6
		Empleado en la modelación (m):								2.000

Fuente: Cálculos del estudio. 2012.

Morfológicamente, se tiene que a 2.0 Km aguas abajo del vertimiento las trenzas que forma el río darían lugar para que se logre la mezcla completa con todo el caudal que posee el río

- ✓ Calidad del agua del cuerpo receptor

Actualmente, la estación Acacias vierte sus aguas de producción previamente tratadas al río Guayuriba. Para efectos de la modelación se analizaron y procesaron los datos de calidad del cuerpo de agua, aguas arriba del punto de vertimiento, que se han generaron dentro del programa de caracterización del campo, para el periodo 2009 a 2011, con muestras tomadas y analizadas por el ICP.

En la **Tabla 2-89** a **Tabla 2-95** se presenta un resumen de los datos y los parámetros con datos tomados 600, 100 y 250 m aguas arriba y 600 y 1.200 m aguas abajo del punto actual del vertimiento. En estas tablas incluyen la variación de cada parámetro por Kilómetro, con el fin de observar si se está generando un aumento o reducción a causa de las condiciones naturales y el vertimiento.

**Tabla 2-89 Caudal – R. Guayuriba – sector de vertimiento**

FECHA	CAUDAL MEDIDO M <sup>3</sup> /S					
	600 m Aarr	100 m Aarr	250 m Aab	600 m Aab	1.200 Aab	Tasa Und/Km
12-mar-2009		33,85				
10-jul-2009						-
5-nov-2009						-
4-mar-2010		45,26	46,14	46,14		(1,26)
26-may-2010						-
26-agosto-2010						-
25-noviembre-2010						-
17-febrero-2011	50,36				52,33	(1,09)
15-junio-2011						-
14-septiembre-2011				3,47		-
<b>MÁXIMO</b>	<b>50,36</b>	<b>45,26</b>	<b>46,14</b>	<b>46,14</b>	<b>52,33</b>	
<b>MÍNIMO</b>	<b>50,36</b>	<b>33,85</b>	<b>46,14</b>	<b>3,47</b>	<b>52,33</b>	
<b>PROMEDIO</b>	<b>50,36</b>	<b>39,55</b>	<b>46,14</b>	<b>24,80</b>	<b>52,33</b>	<b>(0,29)</b>

Fuente: Monitoreos ambientales del año 2009 a 2011. ECP.

**Tabla 2-90 Calidad del agua – R. Guayuriba – pH, Temperatura y OD**

Fecha	pH Unidades					Temperatura °C					OD mgOD <sub>2</sub> /L						
	600m Aarr	100m Aarr	250m Aab	600m Aab	Variación Und/Km	600m Aarr	100m Aarr	250m Aab	600m Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m Aarr	100m Aarr	250m Aab	600m Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km
12-mar-2009	7,98	7,43	7,02	6,02	0,468	29,800	29,000	29,000	29,000	29,000	0,43	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,448
10-jul-2009	7,80	7,77	7,70	7,04	0,048	27,700	26,500	26,500	26,500	26,500	0,71	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,71
5-nov-2009	7,99	7,02	7,00	7,00	0,041	28,900	29,700	29,700	29,700	29,700	1,14	5,800	5,800	5,800	5,800	5,800	1,578
4-mar-2010	9,42	7,93	6,58	6,00	0,418	28,500	28,600	29,900	29,900	29,900	2,00	5,800	5,800	5,800	5,800	5,800	1,43
26-mayo-2010	7,18	9,93	0,058	0,948	1,500	2,100	1,800	2,000	2,000	2,00	1,42	5,700	5,500	5,000	5,100	5,800	0,862
26-agosto-2010	7,84	7,76	7,73	7,00	0,165	26,200	25,800	26,200	26,200	26,200	0,00	5,000	5,000	5,000	5,600	5,600	0,578
25-noviembre-2010	7,98	9,73	9,78	9,78	0,018	28,900	28,200	28,200	28,200	28,200	0,00	5,500	5,000	5,000	5,100	5,100	0,578
17-febrero-2011	7,93	8,42	4,58	4,78	0,082	29,700	28,800	27,000	27,800	27,700	2,18	5,700	5,800	5,200	5,800	5,300	0,26
15-junio-2011	8,62	9,50	9,62	9,62	0,148	24,800	26,500	28,600	28,600	28,600	5,43	7,000	7,000	7,000	7,200	7,200	0,718
14-septiembre-2011	7,13	7,85	9,93	9,93	0,141	24,100	25,700	22,500	22,500	22,500	2,98	5,700	5,500	5,500	6,400	6,400	0,438
11-diciembre-2011	6,60	8,58	6,88	6,88	0,031	26,000	26,000	26,000	26,000	26,000	0,00	4,00	4,00	200	3,300	3,300	0,148
Máximo	7,98	9,73	0,058	0,948	0,00	29,700	28,900	26,000	29,900	27,700	0,702	5,700	5,700	5,700	5,300	5,300	0,305
Minimo	7,93	7,13	0,058	0,082	0,00	29,700	21,500	18,000	20,700	27,700	0,702	5,700	5,000	5,000	1,05	3,00	0,305
Promedio	7,98	7,61	7,42	7,57	0,083	26,120	29,700	26,740	26,510	26,910	0,24	5,700	5,950	5,700	5,550	5,300	0,518

**Tabla 2-91 Calidad del agua – R. Guayuriba – Conductividad, DBO<sub>5</sub> y G&A**

Fecha	Conductividad u/cm						DBO <sub>5</sub> mg/D <sub>2</sub> /L						G&A mg/L					
	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km
12-mar-2009	87,02	80,02	162,86	162,86			1,81	1,81	1,81	1,81	1,81		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
10-jul-2009	11,03	14,03	4,29	4,29			1,81	1,81	1,81	1,81	1,81		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
5-nov-2009	15,02	16,02	4,29	4,29			1,81	1,81	1,81	1,81	1,81		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
4-mar-2010	20,02	22,02	44,03	44,03			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
26-mayo-2010	13,02	13,02	17,02	5,71			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
26-agosto-2010	150,02	147,02	44,02	5,57			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
25-nov-2010	53,02	57,02	60,02	10,00			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
17-feb-2011	51,02	71,02	82,02	98,02	61,02	(13,87)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
15-jun-2011	06,02	09,02	13,02	10,00			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
14-sep-2011	26,02	30,02	31,02	7,14			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
Máximo	51,002	22,002	24,002	61,002			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,542	1,13	1,882	1,193	1,962	
Minimo	51,002	06,002	09,002	13,002	61,002		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		1,542	2,382	1,882	2,948	1,962	
Promedio	51,002	49,402	51,712	72,322	61,002	24,39	NAZ	NAZ	NAZ	NAZ	NAZ		1,542	2,762	1,882	0,074	1,962	NAZ

Fuente: Monitoreos ambientales del año 2009 a 2011. ECP.

**Tabla 2-92 Calidad del agua – R. Guayuriba – HC, SST y CL**

Fecha	HC Unidad						SST mg/L						Cl mg/L					
	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km
12-mar-2009	1,07	1,07	1,07	1,07			1,41	1,41	1,41	1,41	1,41		0,62	2,92	2,92	46,14	46,14	
10-jul-2009	1,07	1,07	1,07	1,07			2,97	2,97	2,97	2,97	2,97		2,03	2,03	2,03	3,17	3,17	
5-nov-2009	1,07	1,07	1,07	1,07			36,09	36,09	36,09	36,09	36,09		4,38	7,71	7,71	3,71	3,71	0,8
4-mar-2010	1,07	1,07	1,07	1,07			82,08	82,08	82,08	82,08	82,08		2,98	8,92	8,92	7,22	7,22	11,9
26-mayo-2010	1,07	1,07	1,07	1,07			12,02	12,02	12,02	12,02	12,02		2,15	14,31	14,31	2,15	2,15	1,15
26-agosto-2010	1,07	1,07	1,07	1,07			24,08	24,08	24,08	24,08	24,08		75,03	72,91	72,91	6,62	6,62	82
25-nov-2010	1,07	1,07	1,07	1,07			25,09	25,09	25,09	25,09	25,09		70,02	70,02	70,02	7,78	7,78	3,33
17-feb-2011	1,07	1,07	1,07	1,07			106,02	106,02	106,02	106,02	106,02		88,62	146,02	146,02	82,11	82,11	4,71
15-jun-2011	1,07	1,07	1,07	1,07			161,02	161,02	161,02	161,02	161,02		338,03	146,02	146,02	2,15	2,15	0,4
14-sep-2011	1,00	1,00	1,00	1,00			62,08	62,08	62,08	62,08	62,08		24,03	452,08	452,08	2,86	2,86	0,7
11-dic-2011	1,00	1,00	1,00	1,00			155,08	155,08	155,08	155,08	155,08		279,63	210,01	210,01	1,15	1,15	0,3
Máximo	51,002	22,002	24,002	61,002			106,02	297,05	161,02	452,08	452,08		942	1,60	1,70	2,90	2,90	492
Minimo	51,002	06,002	09,002	13,002	61,002		106,02	161,02	161,02	452,08	452,08		942	0,01	1,15	2,90	2,90	492
Promedio	1,07	1,07	1,07	1,07			106,02	107,90	134,31	136,04	136,04		25,25	3,28	3,28	0,37	492	4,61

Fuente: Monitoreos ambientales del año 2009 a 2011. ECP.

**Tabla 2-93 Calidad del agua – R. Guayuriba – Cd, Cr y Pb**

Fecha	Cd μg/L						CrTotal μg/L						PbTotal μg/L					
	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m <sup>2</sup> Aarr	100m <sup>2</sup> Aarr	250m <sup>2</sup> Aab	600m <sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km
12-mar-2009	0,045	0,045	0,050	0,02			0,53	1,41	1,41	1,41	1,41		0,71	2,50	2,50	2,56	2,56	
10-jul-2009	395	400	400	0,01			23,71	9,93	9,93	9,93	9,93		39,90	30,44	30,44	3,51	3,51	
5-nov-2009	0,069	0,050	0,026	0,026			2,16	2,34	2,34	2,34	2,34		2,87	2,61	2,61	0,37	0,37	
4-mar-2010	1,10	1,09	0,09	0,018			8,30	7,99	7,99	7,99	7,99		4,43	9,52	8,22	9,41	9,41	16,6
26-mayo-2010	2,95	3,12	3,12	3,43			NS	NS	NS	NS	NS		24,60	25,90	25,90	29,90	29,90	
26-agosto-2010	2,39	2,18	1,88	0,78			NS	NS	NS	NS	NS		14,50	14,50	14,50	14,40	14,40	
25-nov-2010	2,35	2,35	1,88	0,08			4,81	7,37	5,68	5,68	5,68		1,24	10,20	12,00	9,19	9,19	1,44
17-feb-2011	1,07	0,78	0,99	0,152	0,018	3,79	1,93	1,53	2,31	2,31	2,31		9,37	3,36	2,68	4,42	8,35	6,16
15-jun-2011	2,19	2,88	5,00	0,41			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		20,30	25,70	40,00	28,14	28,14	
14-sep-2011	1,25	1,12	1,12	0,018			4,88	4,12	4,55	4,55	4,55		4,72	7,61	6,42	6,77	6,77	2,03
11-dic-2011	4,49	1,18	2,78	0,248			38,60	31,30	38,50	38,50	38,50		1,49	70,70	62,70	74,70	74,70	5,71
Máximo	1,17	1,39	1,31	0,50	1,52		7,93	23,71	7,37	9,93	9,93		5,32	37,90	25,90	40,00	35,52	
Minimo	1,17	0,41	0,75	0,02	0,15		3,72	9,93	9,93	9,93	9,93		5,32	37,92	7,12	68,82	50,50	35,52
Promedio	1,17	1,17	1,19	0,40	0,15	0,01	32,92	5,79	8,03	8,24	8,24		5,32	37,92	3,36	3,63	4,96	2,13

Fuente: Monitoreos ambientales del año 2009 a 2011. ECP.

**Tabla 2-94 Calidad del agua – R. Guayuriba – Ni, Zn y Ba**

Fecha	Niquel μg/L						Zn μg/L						Bario μg/L					
600m<sup>2</sup> Aarr	100m<sup>2</sup> Aarr	250m<sup>2</sup> Aab	600m<sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m<sup>2</sup> Aarr	100m<sup>2</sup> Aarr	250m<sup>2</sup> Aab	600m<sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	600m<sup>2</sup> Aarr	100m<sup>2</sup> Aarr	250m<sup>2</sup> Aab	600m<sup>2</sup> Aab	1.200 Aab	Variación Und/Km	
<tbl\_info cols="

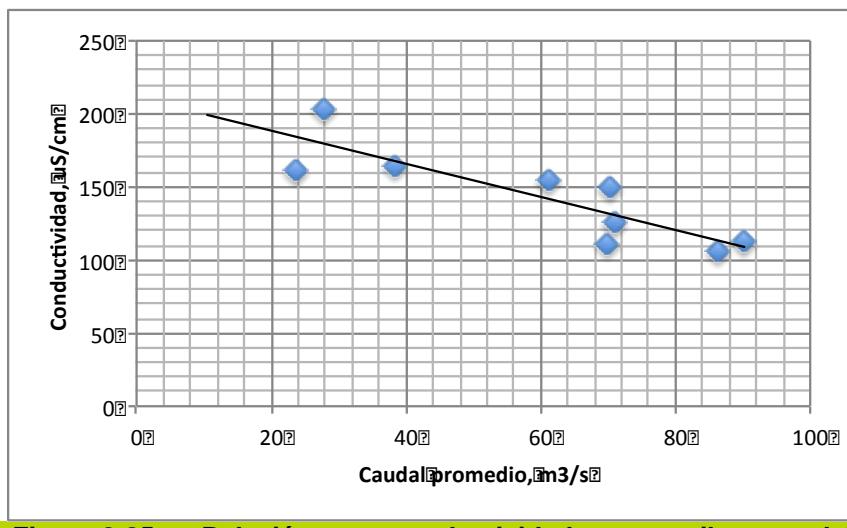
**Tabla 2-95 Calidad del agua – R. Guayuriba – Ar, Hg y Coliformes totales**

Fecha	Arsénico µg/L						Hg µg/L						CFT UFC/100mL						
	600m <sup>arriba</sup> Aarr	100m <sup>arriba</sup> Arr	250m <sup>arriba</sup> Lab	600m <sup>arriba</sup> Lab	1.200 Lab	Tasa Und/Km	600m <sup>arriba</sup> Aarr	100m <sup>arriba</sup> Arr	250m <sup>arriba</sup> Lab	600m <sup>arriba</sup> Lab	1.200 Lab	Tasa Und/Km	600m <sup>arriba</sup> Aarr	100m <sup>arriba</sup> Arr	250m <sup>arriba</sup> Lab	600m <sup>arriba</sup> Lab	1.200 Lab	Tasa Und/Km	
12-mar-2009	0,57		1,25		0,97		<0,060		<0,060		INAES		1,40E+02		1,50E+03		1,50E+03		-1,94E+03
10-jul-2009	8,72		3,81		7,018		<0,123		<0,123		INAES		3,60E+04		3,80E+04		3,80E+04		-2,86E+03
5-nov-2009	1,34		1,26		1,118		<0,123		<0,123		INAES		1,50E+03		3,00E+03		3,00E+03		-2,14E+03
4-mar-2010	3,53	1,73	3,71		0,261		<0,123	<0,123	<0,123		INAES		2,20E+04	2,30E+04	2,60E+04		2,60E+04		-5,71E+03
26-mayo-2010	6,94	6,22	7,26				<0,123	<0,123	<0,123		INAES		9,00E+03	1,30E+04	4,60E+04		4,60E+04		-5,29E+04
26-agosto-2010	3,26	3,28	3,07				<0,133	<0,133	<0,133		INAES		1,10E+05	1,40E+05	1,90E+05		1,90E+05		-1,14E+05
25-novi-2010	1,87	2,23	1,97		0,141		<0,133	<0,133	<0,133		INAES		3,50E+04	5,20E+04	2,30E+04		2,30E+04		1,71E+04
17-feb-2011	2,33	1,29	1,16	1,60	2,12	0,088	<0,128	<0,128	<0,128	<0,128	INAES		5,20E+04	3,30E+04	4,60E+04	9,60E+04	6,10E+04		-2,09E+04
15-jun-2011	3,76	5,28	5,95		3,13		<0,423	<0,423	<0,423		INAES		4,00E+03	4,00E+03	2,00E+04		2,00E+04		-2,29E+04
14-sep-2011	2,49	2,27	2,36		0,198		<0,423	<0,423	<0,423		INAES		2,20E+03	1,10E+04	2,40E+03		2,40E+03		-2,86E+02
11-dic-2011	12,10	11,40	15,20		0,443		<0,423	<0,423	<0,423		INAES		9,60E+04	2,90E+04	7,70E+03		7,70E+03		1,26E+05
Maximo	33,85	11,72	16,22	26,26	12,12								152.0000	110.0000	140.0000	110.0000	151.0000		
Minimo	33,85	5,70	1,69	2,50	1,22								152.0000	154.4000	150.0000	150.0000	151.0000		
Promedio	33,85	3,83	5,17	5,32	1,12	0,17	INAES	INAES	INAES	INAES	INAES		152.0000	25.2842	151.2865	159.2783	151.0000	151.325	

Fuente: Monitoreos ambientales del año 2009 a 2011. ECP.

En relación a la calidad del río, aguas arriba y abajo del vertimiento (1,8 Km de longitud), se puede observar lo siguiente:

- o El caudal mínimo medido durante el programa de monitoreo se detectó en el mes de Marzo con un valor de 33,85 (año 2009). Este mes por lo general corresponde a período seco.
- o Se observa que el caudal se aumenta aproximadamente en una tasa promedio de 1,17 m<sup>3</sup>/Km lo cual se debe a los aportes de escorrentía y principalmente a la desembocadura de la Q. Sardinata y el aporte del vertimiento. Este valor fue medido en los meses de Febrero y Marzo correspondiente a los meses secos, por lo cual fue considerado en el modelo (valor solicitado por el Modelo).
- o En cuanto al pH la tendencia general es hacia la reducción, siendo el valor promedio aguas arriba de 7,59 Unidades y aguas debajo de 7,43 Unidades.
- o La concentración de OD aguas arriba históricamente ha permanecido por encima de 5,5 mg/L siendo el objetivo de calidad de 2,5 mg/L Aguas abajo del vertimiento el valor histórico ha estado por encima de 5.0 mg/L, lo cual se considera apropiado. Históricamente se han registrados eventos de reducción e incremento (ambos) en el tramo de estudio, lo cual puede estar asociado a las cargas orgánicas aportadas al río y su capacidad de asimilación (la cual puede variar a lo largo del año).
- o La conductividad histórica aguas arriba del vertimiento ha variado entre 106 y 220 uS/cm; esta concentración muestra un aporte aguas arriba del vertimiento. Si comparamos los valores medidos mensualmente e históricamente con el caudal promedio histórico del río se observa que su valor se reduce a medida que el caudal es menor, lo que indica que su valor tiene relación con la capacidad de dilución del cuerpo receptor (ver Figura 2-85). Espacialmente de esta forma, el valor tiende a aumentar en el tramo de estudio, asociado principalmente con el vertimiento existente.
- o La materia orgánica presente en el río es baja, con valores menores a 2.0 mg/L tanto aguas arriba y aguas abajo del punto del vertimiento. De esta forma no se observa un efecto notorio del vertimiento ni variación importante con la distancia. Igual comportamiento se observa en cuanto a G&A e Hidrocarburos cuyo valor histórico ha estado por debajo de 2,0 mg/L (ambos) tanto aguas arriba como aguas abajo del punto de vertimiento.



**Figura 2-85 Relación entre conductividad aguas arriba y caudal promedio multianual – R. Guayuriba**

- Los sólidos suspendidos totales han presentado a lo largo de los muestreos una alta variabilidad ya que estos se ven afectados en gran medida por las condiciones naturales, asociados a los procesos de erosión que sufre el río en su cuenca, los aportes de escorrentía superficial y en menor proporción por los vertimientos. A lo largo del tiempo, es común la variación entre incrementos y reducciones y no existe una sola tendencia del cuerpo de agua, lo cual es muy común de acuerdo con la dinámica de la hidráulica del cuerpo natural.
- En cuanto a metales pesados, se han medido presencia de ellos, tales como Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Ba y Ar, aunque en concentraciones bastante bajas. El Hg medido es no detectable. El metal pesado que se encuentra en mayor proporción es el Bario el cual presenta tendencia al incremento con la distancia en el tramo de estudio. En los demás metales la variación con la distancia se considera baja.
- El río presenta una concentración alta de coliformes totales antes del vertimiento superior a 30.000 UFC/ml, siendo el objetivo de calidad de CORMACARENA 5.000 UFC/ml lo cual muestra una contaminación por patógenos importante, que supera ampliamente el objetivo de calidad de CORMACARENA. Esta contaminación seguramente asociada a actividades ganaderas o vertimientos de aguas residuales domésticas y/o municipales. La tendencia es a incrementarse con la distancia en el tramo de estudio, lo cual se debe a la presencia del vertimiento.
- El fenol también fue valorado para los mismos días de los demás parámetros físicos químicos, tanto aguas arriba como abajo del punto de vertimiento, observándose que estos presentan valores no detectables en todos los casos. Los valores reportados por el laboratorio ICP se muestran en la **Tabla 2-96**

El cuerpo de agua, en el punto de vertimiento hacia arriba, presenta una calidad que se ubica dentro de los objetivos de calidad establecidos por CORMACARENA para el río Guayuriba, excepto las Grasas y Aceites y los coliformes totales. De esta forma, en el estudio actual se realizarán las simulaciones de caudal, de tal forma que se establezcan los máximos caudales que se pueden verter de tal forma que se continúe conservando dichos objetivos de calidad.

**Tabla 2-96 Valores de fenoles medidos en el río Guayuriba**

COMPUESTO	VALOR MEDIDO
FENOL	<0.17
2-CLOROFENOL	<0.22
2-METILFENOL	<0.16
3-METILFENOL+4-METILFENOL	<0.17
2-NITROFENOL	<0.22
2,4-DIMETILFENOL	<0.28
2,4-DICLOROFENOL	<0.16
2,6-DICLOROFENOL	<0.28
4-CLORO-3-METILFENOL	<0.28
2,3,5-TRICLOROFENOL	<0.34
2,4,6-TRICLOROFENOL	<0.33
2,4,5-TRICLOROFENOL	<0.35
2,3,4-TRICLOROFENOL	<0.34
2,3,6-TRICLOROFENOL	<0.34
2,4-DINITROFENOL	<3.24
4-NITROFENOL	<0.47
2,3,4,6-TETRACLOROFENOL	<0.41
2,3,5,6-TETRACLOROFENOL	<0.42
2,3,4,5-TETRACLOROFENOL	<0.41
2-METIL-4,6-DINITROFENOL	NS
3,4,5-TRICLOROFENOL	NS
2-METIL-4,6-DINITROFENOL+3,4,5-TRICLOROFENOL	<0.99
PENTACLOROFENOL	<0.58
DINOSEB	<0.56

Fuente: Monitoreos ambientales del año 2009 a 2011. ECP.

➤ **Modelación matemática**

- ✓ Características del vertimiento
  - Caudal de vertimiento

El vertimiento a realizar corresponde a las aguas residuales industriales (aguas de producción) de la Estación Acacias, que cumple con los parámetros de calidad establecidos en el Decreto 1594/84, antes de su vertimiento.

Para efectos de análisis se hizo el ejercicio de modelación, con el fin de definir los caudales máximos a verter sobre el cuerpo de agua de acuerdo con su capacidad de asimilación y dilución. Por lo anterior, se hizo un análisis para diversos tipos de caudales de vertimiento: 0.0 hasta 1.500 l/s para las épocas seca y húmeda.

- o Calidad de vertimiento

Para determinar la calidad de los vertimientos a emplear en la modelación se analizaron los registros estadísticos existentes para el período 2009 a 2011 (**Tabla 2-97**). Estos datos fueron tenidos en cuenta para evaluar el estado actual del cuerpo de agua, calibrar el modelo y establecer la calidad esperada para los caudales futuros.

Para establecer la calidad futura, se tomó el parámetro en su condición más desfavorable, con el fin de ser conservadores en el análisis. Para el caso de los metales pesados se observó que estos se encuentran en muy baja proporción, siendo el Bario el más abundante por lo cual se modeló con este como el más representativo.

Dentro del vertimiento se observa que la Temperatura y los fenoles que se esperan en el vertimiento futuro se encuentran dentro de límite establecido por la norma de vertimiento (Decreto 1594/84), con valores inferiores a 40 oC y 0.2 mg/L respectivamente

**Tabla 2-97 Calidad histórica del vertimiento**

Fecha	pH Unidad	Temperatura °c	OD mgD <sub>2</sub> /L	Conductividad uS/cm	DBO <sub>5</sub> mgD <sub>2</sub> /L	G&A mg/L	HC Unidad	SST mg/L	Cl mg/L	Fenoles mg/L	CFT UFC/100mL
12-mar-2009	7,38	24,00	2,30	41,02	1,81	1,07	<1,07	5,52	70,02	<0,029	2,00E+01
10-jul-2009	7,40	21,00	1,00	64,02	2,6	7,602	3,04	4,42	147,02	0,28	1,21E+05
5-nov-2009	7,50	34,10	1,60	57,02	2,2	8,802	<1,07	3,62	126,02	0,31	1,00E+03
4-mar-2010	7,29	23,90	1,90	74,02	2,00	7,702	1,28	2,78	40,02	<0,030	3,80E+02
26-may-2010	6,53	27,40	2,26	50,02	2,00	2,25	1,40	5,52	125,02	<0,10	4,10E+03
26-agosto-2010	7,48	20,60	2,70	58,02	2,00	9,902	<1,07	4,42	134,02	<0,10	5,00E+02
25-noviembre-2010	7,53	24,50	2,90	51,02	2,9	2,052	<1,07	5,02	175,02	<0,10	8,30E+03
17-febrero-2011	7,39	22,55	2,70	73,02	2,00	2,22	<1,07	3,82	28,02	<0,10	1,05E+04
15-junio-2011	7,65	29,70	1,50	95,02	3,1	1,62	<1,07	5,02	26,02	<0,10	5,00E+04
14-septiembre-2011	7,42	29,00	2,00	50,02	2,52	2,892	1,03	5,02	105,02	<0,10	7,60E+03
<b>Maximo</b>	<b>7,65</b>	<b>34,50</b>	<b>2,26</b>	<b>74,00</b>	<b>3,06</b>	<b>7,602</b>	<b>0,042</b>	<b>3,52</b>	<b>175,002</b>	<b>0,31</b>	<b>1,21E+05</b>
<b>Mínimo</b>	<b>6,53</b>	<b>27,40</b>	<b>1,00</b>	<b>59,00</b>	<b>1,81</b>	<b>1,07</b>	<b>0,072</b>	<b>4,02</b>	<b>105,002</b>	<b>0,029</b>	<b>2,00E+01</b>
<b>Promedio</b>	<b>7,36</b>	<b>21,68</b>	<b>1,19</b>	<b>58,00</b>	<b>2,31</b>	<b>9,95</b>	<b>1,32</b>	<b>3,98</b>	<b>37,602</b>	<b>0,125</b>	<b>2,03E+04</b>
<b>Valor para modelación:</b>		<b>34,50</b>	<b>1,00</b>	<b>58,00</b>	<b>2,06</b>	<b>7,70</b>	<b>0,042</b>	<b>3,52</b>	<b>175,00</b>	<b>0,12</b>	<b>20.340,00</b>

Fuente: Datos históricos de monitoreo. Vertimiento sobre el río Guayuriba 2009 a 2011.

**Tabla 2-98 Calidad de los metales pesados en el vertimiento**

FECHA	CD μG/L	CR TOTAL μG/L	PB TOTAL μG/L	NÍQUEL μG/L	ZN μG/L	BARIO μG/L	ARSÉNICO μG/L	HG μG/L
12-mar-2009	<0,026	0,12	<0,28	1,46	<3,15	1.307	0,49	<0,060
10-jul-2009	<0,026	85,99	<2,84	5,04	6,93	1.478	<1,36	<0,123
5-noviembre-2009	0,04	<0,115	0,58	0,67	4,95	1.330	0,08	0,27
4-mar-2010	<0,026	<0,115	<0,284	0,79	3,91	1.208	0,16	<0,123
26-mayo-2010	<0,026	SD	<0,284	0,76	<3,145	1.355	0,46	<0,123
26-agosto-2010	<0,026	SD	<0,284	1,44	<3,145	1.107	0,59	<0,133
25-noviembre-2010	<0,026	3,22	<0,284	0,68	2,83	1.497	0,84	<0,133
17-febrero-2011	0,03	0,20	0,44	1,19	3,56	1.399	0,68	<0,128
15-junio-2011	0,02	SD	0,70	0,80	<15,2	1.362	0,54	<0,423
14-septiembre-2011	0,03	0,286	0,32	0,75	<15,2	1.422	1,30	<0,423
<b>MÁXIMO</b>	<b>0,04</b>	<b>85,99</b>	<b>0,70</b>	<b>5,04</b>	<b>6,93</b>	<b>1.497</b>	<b>1,30</b>	<b>0,27</b>
<b>MÍNIMO</b>	<b>&lt; 0,016</b>	<b>&lt; 0,115</b>	<b>&lt; 0,28</b>	<b>0,67</b>	<b>&lt;3,145</b>	<b>1.107</b>	<b>0,08</b>	<b>&lt; 0,60</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>&lt; 0,027</b>	<b>&lt; 12,9</b>	<b>&lt; 0,63</b>	<b>1,36</b>	<b>&lt; 6,0</b>	<b>1.347</b>	<b>0,57</b>	<b>&lt; 0,194</b>

Fuente: Datos históricos de monitoreo. Vertimiento sobre el río Guayuriba 2009 a 2011.

### ➤ Parámetros Meteorológicos

El modelo QUAL2K requiere de parámetros meteorológicos ya que estos afectan las tasas de reacción de los contaminantes y el ciclo de los elementos biogeoquímicos, entre otros.

- o Radicación solar

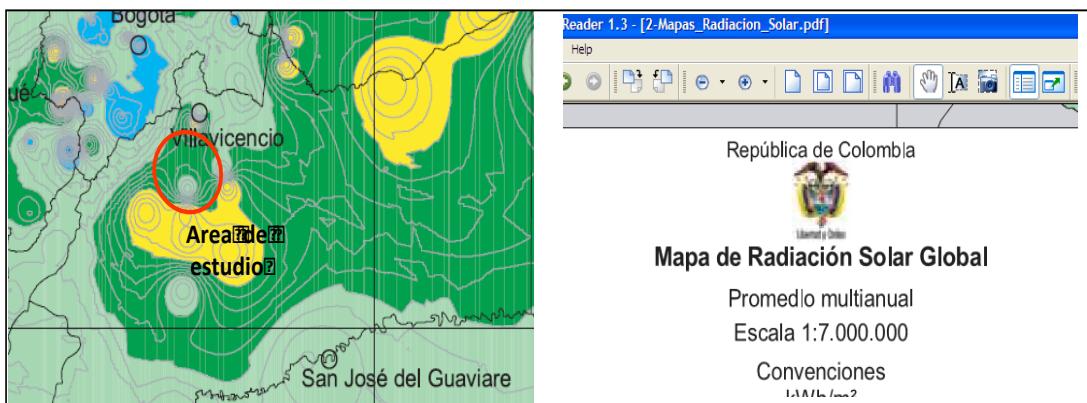
La radiación solar o energía solar al nivel de superficie, requerida para la modelación fue estimada por procedimientos hidrológicos, ya que este parámetro no es medido directamente en las estaciones meteorológicas del área de estudio. Para tal efecto fue considerada la siguiente expresión:

$$Rc = Ra (0.3 + 0.5 n/N)$$

Donde:

- Rc: Radiación solar a nivel de superficie de la tierra, luego de atravesar la tropósfera (Langley/min)  
 Ra: Radiación solar en el límite superior de la troposfera (Langley/min)  
 n: Número de horas de brillo solar  
 N: Número de horas del día con luz solar

Sin embargo el valor de Rc puede ser calculado con base en el Atlas de Radiación Solar elaborado por el Ministerio de Minas e IDEAM para Colombia en el año 2005. Para el caso específico del área de estudio, de acuerdo con el Atlas la radiación solar se estima en 4,5 KWh/m<sup>2</sup>-d, lo que equivale a 11 Langley/min (**Figura 2-86**). Este valor fue empleado para la modelación.



**Figura 2-86 Radiación solar en el área de estudio. Kw/m<sup>2</sup>-d**

- o Nubosidad

La nubosidad es un parámetro climático asociado a la precipitación y se expresa en octavos de cielo cubierto por nubes, para lo cual se emplea como medida la Octa o unidad de medida y su interpretación se realiza de acuerdo a la clasificación establecida por la Organización Meteorológica Mundial en una clasificación o categorías tal y como se muestran en la **Tabla 2-99**.

**Tabla 2-99 Parámetros para la interpretación de la nubosidad OMM**

OCTAS	DEFINICIÓN	CATEGORÍA
0	Despejado	Buen tiempo
1	1/8 de cielo cubierto o menos, pero no cero	Buen tiempo

OCTAS	DEFINICIÓN	CATEGORÍA
2	2/8 de cielo cubierto	Buen tiempo
3	3/8 de cielo cubierto	Parcialmente nuboso
4	4/8 de cielo cubierto	Parcialmente nuboso
5	5/8 de cielo cubierto	Parcialmente nuboso
6	6/8 de cielo cubierto	Nuboso
7	7/8 de cielo cubierto o más, pero no 8/8	Nuboso

En la **Tabla 2-100** se precisan los valores medios de nubosidad para la zona de estudio. Se identifica un valor medio anual de 5.0 Octas para la zona cercana al piedemonte e inicio de la sabana (inmediaciones a Villavicencio y Acacias), lo que indica que el cielo permanece parcialmente cubierto de nubes en el transcurso del año. Si consideramos al valor 7 como máximo y 0 al mínimo, el valor promedio de 5.0 para todas las estaciones, es un indicativo de constante nubosidad en la zona y explica la elevada pluviometría allí registrada.

**Tabla 2-100 Valores medios mensuales de nubosidad en Octas**

ESTACIÓN	VALORES MEDIOS MENSUALES DE NUBOSIDAD (Octas)												VR ANUAL
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
LA LIBERTAD	4	4	4	5	5	5	5	4	4	4	4	3	4
BARBASCAL	5	5	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5
PTO LLERAS	4	5	5	6	5	6	6	5	5	5	5	4	5
LA HOLANDA	4	4	5	6	5	6	6	6	5	5	5	4	5
UNILLANOS	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5
APTO VANGUARDIA	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
BASE AEREA APIAY	5	5	6	6	6	5	6	6	5	5	5	5	5
PROMEDIO	4.4	4.7	5.3	5.7	5.4	5.6	5.7	5.4	5.0	5.0	5.0	4.4	5.0

Ya que la nubosidad tiene relación con la radiación efectiva y la temperatura del agua, para efectos de la modelación se emplearon valores entre 2 a 5 Octas durante el ejercicio de calibración, para obtener el valor que más se ajustará a las condiciones del área de estudio.

- o Velocidad del Viento

El viento es el movimiento natural del aire. Se determina por la dirección o punto del horizonte desde donde sopla, y por su velocidad de la cual depende su mayor o menor fuerza. Colombia, por encontrarse geográficamente ubicada entre el trópico de cáncer y el de capricornio, está sometida a los vientos alisios que soplan del noreste en el hemisferio Norte y del sureste en el hemisferio sur. Por la compleja orografía Colombiana se generan sistemas de circulación denominados montaña-valle y valle-montaña, los cuales se producen cuando las pendientes de las montañas se calientan por radiación solar y la temperatura del suelo se hace más elevada que la del aire; así, se establece una corriente que sube por las montañas o colinas en días soleados. En la noche se produce un proceso inverso, el aire desciende de las montañas a los valles”.

De acuerdo con la rosa de los vientos generada para el sector norte del Campo Castilla, son los vientos alisios, los cuales presentan una dirección predominante del viento en la región es Noreste (NE) con una frecuencia de 37% al año y con velocidades entre 0,0 y 1,0 m/s. Desde el Norte y el Este se registra una frecuencia importante en la dirección del 20 y 10% respectivamente. Las

velocidades más elevadas corresponden a vientos procedentes del Noreste (NE) y Suroeste (SW) con velocidades entre 1,0 y 1,1 m/s respectivamente.

En general la velocidad del viento en la zona no supera los 1,1 m/s, por lo cual y de acuerdo a la escala Beaufort para la fuerza del viento, está variable en la zona es clasificada como calma, caracterizada porque el aire asciende verticalmente. Es de resaltar como característica de los llanos orientales que los vientos locales se manifiestan por corrientes de aire ascendentes provocadas por fuertes calentamientos en época de sequía.

#### ➤ Resultados de la modelación

El modelo matemático QUAL2k ha sido empleado para modelar otros ríos a nivel nacional. Para el caso del área de estudio fue utilizado para modelar el vertimiento de aguas residuales industriales y domésticas tratadas que se generan en las estaciones Castilla y Acacias bajo dos escenarios de simulación:

Condiciones actuales en caudal y calidad del río y el vertimiento, utilizando información de los fisicoquímicos y los aforos de las mediciones realizadas el 17 de Febrero de 2011 (Época Seca).

Caudal máximo de vertimiento (3.7 m<sup>3</sup>/s) y caudal mínimo en el río Guayuriba (26.73 m<sup>3</sup>/s). El caudal del cuerpo de agua utilizado en este escenario es el obtenido en el análisis de los aforos mínimos realizados en la estación climatológica Puente Carretera durante el periodo 1969 y 1994, este caudal tiene un tiempo de retorno de 10 años. En cuanto a la información de calidad, se ingresaron los datos fisicoquímicos del escenario 1.

Cabe anotar que el Bario, los Fenoles y las Grasas y Aceites también fueron incluidos en la modelación como constituyentes, dada su importancia por la fuente de producción de las aguas residuales tratadas

#### ➤ Resultados de la modelación Escenario 1

En las **Tabla 2-101** a **Tabla 2-103**, se presenta el resumen de los resultados de la modelación; se observa la calidad de los distintos parámetros con la distancia (abscisas de 1.8 a 0.0 Km desde aguas arriba del vertimiento) para la época de sequía (17 de febrero de 2011). La sección del río Guayuriba fue segmentada en 18 tramos, cada uno de ellos, con dos elementos de igual longitud. Cabe anotar que el vertimiento de las estaciones Castilla y Acacias, se ubicó al inicio del tramo número 7.

**Tabla 2-101 Resultados hidráulica**

REACH	DOWNSTREAM	HYDRAULICS	E', M3/S	H, M	BTOP, M	AC, M <sup>2</sup>	U, MPS	SLOPE
Label	Distance	Q, m <sup>3</sup> /s						
Mainstem headwater	1.80	50.36	0.00	0.49	120.00	54.15	0.93	0.004000
Cabecera	1.75	50.36	25.18	0.49	120.00	54.15	0.93	0.004000
Cabecera	1.70	50.36	25.18	0.49	120.00	54.15	0.93	0.004000
	1.65	50.36	25.18	0.48	120.90	54.31	0.93	0.004000
	1.60	50.36	25.18	0.48	120.90	54.31	0.93	0.004000
	1.55	50.36	25.18	0.48	121.81	54.48	0.92	0.004000
	1.50	50.36	25.18	0.48	121.81	54.48	0.92	0.004000
	1.45	50.36	25.18	0.48	122.72	54.64	0.92	0.004000
	1.40	50.36	25.18	0.48	122.72	54.64	0.92	0.004000

REACH	DOWNSTREAM	HYDRAULICS	E', M3/S	H, M	BTOP, M	AC, M^2	U, MPS	SLOPE
Label	Distance	Q, m3/s						
	1.35	50.36	25.18	0.48	123.63	54.80	0.92	0.004000
	1.30	50.36	25.18	0.48	123.63	54.80	0.92	0.004000
	1.25	50.36	25.18	0.47	124.54	54.96	0.92	0.004000
	1.20	50.36	25.18	0.47	124.54	54.96	0.92	0.004000
	1.15	51.21	25.60	0.47	125.62	55.71	0.92	0.004000
	1.10	51.21	25.60	0.47	125.62	55.71	0.92	0.004000
	1.05	51.21	25.60	0.47	126.53	55.87	0.92	0.004000
	1.00	51.21	25.60	0.47	126.53	55.87	0.92	0.004000
	0.95	51.21	25.60	0.47	127.45	56.03	0.91	0.004000
	0.90	51.21	25.60	0.47	127.45	56.03	0.91	0.004000
	0.85	51.21	25.60	0.47	128.36	56.19	0.91	0.004000
	0.80	51.21	25.60	0.47	128.36	56.19	0.91	0.004000
	0.75	51.21	25.60	0.47	129.28	56.35	0.91	0.004000
	0.70	51.21	25.60	0.47	129.28	56.35	0.91	0.004000
	0.65	51.21	25.60	0.46	130.20	56.51	0.91	0.004000
	0.60	51.21	25.60	0.46	130.20	56.51	0.91	0.004000
	0.55	51.21	25.60	0.46	131.12	56.67	0.90	0.004000
	0.50	51.21	25.60	0.46	131.12	56.67	0.90	0.004000
	0.45	51.21	25.60	0.46	132.04	56.83	0.90	0.004000
	0.40	51.21	25.60	0.46	132.04	56.83	0.90	0.004000
	0.35	51.21	25.60	0.46	132.96	56.98	0.90	0.004000
	0.30	51.21	25.60	0.46	132.96	56.98	0.90	0.004000
	0.25	51.21	25.60	0.45	133.88	57.14	0.90	0.004000
	0.20	51.21	25.60	0.45	133.88	57.14	0.90	0.004000
	0.15	51.21	25.60	0.45	134.80	57.30	0.89	0.004000
	0.10	51.21	25.60	0.45	134.80	57.30	0.89	0.004000
Final Modelo	0.05	51.21	25.60	0.45	135.73	57.46	0.89	0.004000
Final Modelo	0.00	51.21	25.60	0.45	135.73	57.46	0.89	0.004000

Fuente: Archivo de salida. QUAL2K. Cálculos del estudio. 2012.

**Tabla 2-102 Resultados Temperatura**

REACH	DISTANCE	TEMP(C)	TEMP(C)	TEMP(C)
LABEL	X(KM)	AVERAGE	MINIMUM	MAXIMUM
Mainstem headwater	1.80	29.70	29.70	29.70
Cabecera	1.78	29.69	29.69	29.71
Cabecera	1.73	29.69	29.68	29.72
	1.68	29.68	29.66	29.73
	1.63	29.67	29.65	29.74
	1.58	29.67	29.64	29.75
	1.53	29.66	29.62	29.75

REACH	DISTANCE	TEMP(C)	TEMP(C)	TEMP(C)
LABEL	X(KM)	AVERAGE	MINIMUM	MAXIMUM
	1.48	29.65	29.61	29.76
	1.43	29.65	29.60	29.77
	1.38	29.64	29.59	29.78
	1.33	29.63	29.57	29.79
	1.28	29.63	29.56	29.80
	1.23	29.62	29.55	29.81
	1.18	29.66	29.59	29.86
	1.13	29.66	29.57	29.87
	1.08	29.65	29.56	29.88
	1.03	29.64	29.55	29.89
	0.98	29.64	29.53	29.90
	0.93	29.63	29.52	29.91
	0.88	29.62	29.51	29.92
	0.83	29.62	29.50	29.93
	0.78	29.61	29.48	29.94
	0.73	29.60	29.47	29.95
	0.68	29.60	29.46	29.96
	0.63	29.59	29.44	29.96
	0.58	29.58	29.43	29.97
	0.53	29.57	29.42	29.98
	0.48	29.57	29.40	29.99
	0.43	29.56	29.39	30.00
	0.38	29.55	29.38	30.01
	0.33	29.55	29.36	30.02
	0.28	29.54	29.35	30.03
	0.23	29.53	29.34	30.04
	0.18	29.53	29.32	30.05
	0.13	29.52	29.31	30.06
Final Modelo	0.08	29.51	29.30	30.07
Final Modelo	0.03	29.50	29.28	30.08
Terminus	0.00	29.50	29.28	30.08

Fuente: Archivo de salida. QUAL2K. Cálculos del estudio. 2012.

**Tabla 2-103 Resultados Fisicoquímicos**

x(km)	cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO(mgO2/L)	CBODs (mgO2/L)	CBODf (mgO2/L)	No(ugN/L)	NH4(ugN/L)	NO3(ugN/L)
1.80	151.00	106.00	5.70	13.00	2.00	510.00	490.00	240.00
1.78	151.00	105.97	6.71	12.94	2.05	507.79	487.66	244.47
1.73	151.00	105.94	6.71	12.88	2.11	505.59	485.32	248.91
1.68	151.00	105.92	6.71	12.83	2.16	503.39	483.00	253.34
1.63	151.00	105.89	6.72	12.77	2.22	501.20	480.68	257.75

x(km)	cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO(mgO2/L)	CBODs (mgO2/L)	CBODf (mgO2/L)	No(ugN/L)	NH4(ugN/L)	NO3(ugN/L)
1.58	151.00	105.86	6.72	12.71	2.27	499.02	478.37	262.15
1.53	151.00	105.83	6.72	12.65	2.32	496.84	476.08	266.52
1.48	151.00	105.80	6.72	12.60	2.38	494.67	473.79	270.88
1.43	151.00	105.77	6.73	12.54	2.43	492.52	471.51	275.23
1.38	151.00	105.74	6.73	12.48	2.48	490.36	469.23	279.55
1.33	151.00	105.71	6.73	12.42	2.53	488.22	466.97	283.86
1.28	151.00	105.68	6.74	12.37	2.58	486.08	464.71	288.16
1.23	151.00	105.65	6.74	12.31	2.64	483.95	462.47	292.43
1.18	157.99	103.94	6.68	12.30	2.68	473.85	452.63	291.75
1.13	157.99	103.91	6.68	12.25	2.73	471.77	450.46	295.90
1.08	157.99	103.88	6.69	12.19	2.78	469.70	448.29	300.03
1.03	157.99	103.85	6.69	12.14	2.83	467.64	446.13	304.14
0.98	157.99	103.83	6.70	12.08	2.88	465.59	443.98	308.24
0.93	157.99	103.80	6.70	12.03	2.93	463.54	441.84	312.33
0.88	157.99	103.77	6.71	11.97	2.98	461.50	439.70	316.40
0.83	157.99	103.74	6.71	11.92	3.03	459.47	437.57	320.44
0.78	157.99	103.71	6.71	11.86	3.08	457.44	435.45	324.48
0.73	157.99	103.68	6.72	11.81	3.13	455.42	433.34	328.50
0.68	157.99	103.65	6.72	11.75	3.18	453.41	431.24	332.51
0.63	157.99	103.62	6.73	11.70	3.23	451.40	429.14	336.49
0.58	157.99	103.59	6.73	11.64	3.28	449.40	427.06	340.46
0.53	157.99	103.56	6.73	11.59	3.32	447.41	424.98	344.42
0.48	157.99	103.53	6.74	11.54	3.37	445.43	422.90	348.36
0.43	157.99	103.50	6.74	11.48	3.42	443.45	420.84	352.28
0.38	157.99	103.47	6.75	11.43	3.47	441.48	418.79	356.19
0.33	157.99	103.44	6.75	11.38	3.52	439.52	416.74	360.08
0.28	157.99	103.41	6.75	11.33	3.56	437.56	414.70	363.95
0.23	157.99	103.38	6.76	11.27	3.61	435.61	412.67	367.81
0.18	157.99	103.35	6.76	11.22	3.66	433.67	410.65	371.65
0.13	157.99	103.32	6.76	11.17	3.70	431.73	408.63	375.48
0.08	157.99	103.29	6.77	11.12	3.75	429.80	406.62	379.29
0.03	157.99	103.26	6.77	11.07	3.80	427.88	404.63	383.08
0.00	157.99	103.26	6.77	11.07	3.80	427.88	404.63	383.08

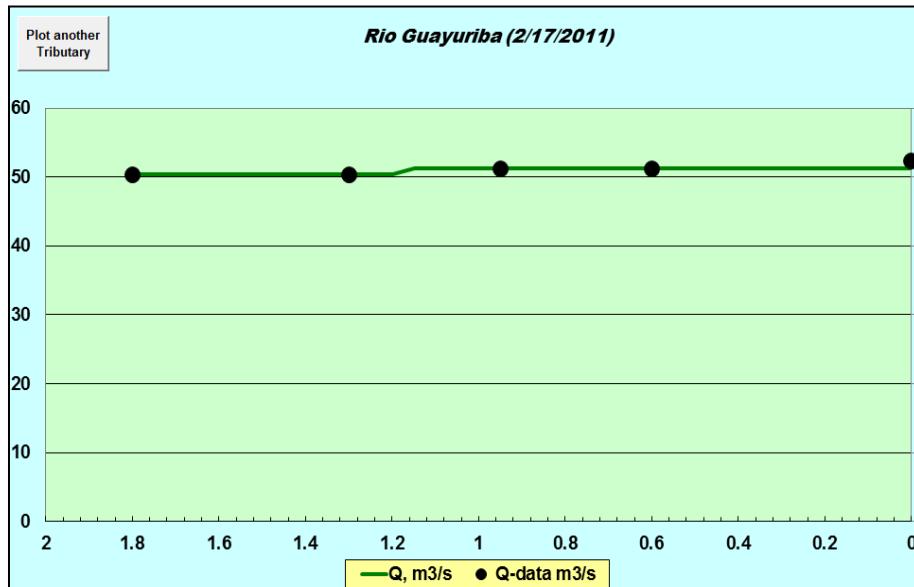
REACH LABEL	X(KM)	PO (UGP/L)	INORG P (UGP/L)	PATHOGEN	ALK	CONSTITUENT			pH
						i	ii	iii	
Mainstem headwa	1.80	36.00	9.90	52000.00	27.20	0.17	39.10	2.71	6.79
Cabecera	1.78	35.78	10.11	51748.89	27.18	0.17	39.10	2.71	7.18
Cabecera	1.73	35.56	10.32	51500.28	27.15	0.17	39.10	2.71	7.19
	1.68	35.34	10.53	51252.53	27.13	0.17	39.10	2.71	7.20

REACH LABEL	X(KM)	PO (UGP/L)	INORG P (UGP/L)	PATHOGE N	ALK	CONSTITUENT			pH
						i	ii	iii	
	1.63	35.12	10.73	51007.26	27.10	0.17	39.10	2.71	7.21
	1.58	34.90	10.94	50762.86	27.08	0.17	39.10	2.71	7.22
	1.53	34.69	11.15	50520.90	27.05	0.17	39.10	2.71	7.23
	1.48	34.47	11.35	50279.83	27.03	0.17	39.10	2.71	7.24
	1.43	34.26	11.55	50041.19	27.00	0.17	39.10	2.71	7.25
	1.38	34.05	11.75	49803.44	26.98	0.17	39.10	2.71	7.26
	1.33	33.84	11.95	49568.10	26.95	0.17	39.10	2.71	7.27
	1.28	33.62	12.15	49333.65	26.93	0.17	39.10	2.71	7.28
	1.23	33.42	12.35	49101.58	26.91	0.17	39.10	2.71	7.28
	1.18	32.66	12.34	48234.65	27.56	0.17	61.62	2.70	7.30
	1.13	32.45	12.53	48009.27	27.53	0.17	61.62	2.70	7.31
	1.08	32.25	12.72	47784.80	27.51	0.17	61.62	2.70	7.31
	1.03	32.05	12.91	47562.61	27.49	0.17	61.62	2.70	7.32
	0.98	31.85	13.10	47341.34	27.46	0.17	61.62	2.70	7.33
	0.93	31.65	13.29	47122.31	27.44	0.17	61.62	2.70	7.34
	0.88	31.45	13.47	46904.15	27.42	0.17	61.62	2.70	7.35
	0.83	31.26	13.66	46688.21	27.40	0.17	61.62	2.70	7.35
	0.78	31.06	13.84	46473.19	27.37	0.17	61.62	2.70	7.36
	0.73	30.87	14.03	46260.38	27.35	0.17	61.62	2.70	7.37
	0.68	30.67	14.21	46048.49	27.33	0.17	61.62	2.70	7.38
	0.63	30.48	14.39	45838.77	27.31	0.17	61.62	2.70	7.38
	0.58	30.29	14.57	45630.04	27.28	0.17	61.62	2.70	7.39
	0.53	30.10	14.75	45423.46	27.26	0.17	61.62	2.70	7.40
	0.48	29.91	14.93	45217.81	27.24	0.17	61.62	2.70	7.40
	0.43	29.72	15.10	45014.27	27.22	0.17	61.62	2.70	7.41
	0.38	29.53	15.28	44811.65	27.19	0.17	61.62	2.70	7.41
	0.33	29.34	15.45	44611.13	27.17	0.17	61.62	2.70	7.42
	0.28	29.16	15.63	44411.53	27.15	0.17	61.62	2.70	7.43
	0.23	28.97	15.80	44213.99	27.13	0.17	61.62	2.70	7.43
	0.18	28.79	15.97	44017.37	27.11	0.17	61.62	2.70	7.44
	0.13	28.61	16.14	43822.78	27.09	0.17	61.62	2.70	7.44
Final Modelo	0.08	28.42	16.31	43629.11	27.06	0.17	61.62	2.70	7.45
Final Modelo	0.03	28.24	16.48	43437.44	27.04	0.17	61.62	2.70	7.45
Terminus	0.00	28.24	16.48	43437.44	27.04	0.17	61.62	2.70	7.45

✓ Caudal

El caudal tiene que ver con el volumen de agua que se transporta por un cauce natural o artificial, por unidad de tiempo; su variación por efecto de un vertimiento, podría tener relación con la disponibilidad del recurso, la dinámica de la corriente, los procesos erosivos y de inundación en la cuenca.

De acuerdo a la **Tabla 2-101** y la **Figura 2-87**, se puede observar, que aguas abajo del punto de vertimiento, el modelo espera un mayor caudal en el cuerpo de agua ( $51.21\text{m}^3/\text{s}$ ), valor que se mantiene constante hasta el final del segmento. Esta diferencia en los valores de flujo era esperada teniendo en cuenta que los datos de caudal que se ingresaron al modelo corresponden a puntos que suman caudal, sin embargo, posiblemente debido a efluentes puntuales, bocatomas y/o procesos de infiltración de aguas subterráneas, hubo salidas de caudal que no fueron incluidas en la modelación y por ello se produjo este desajuste.

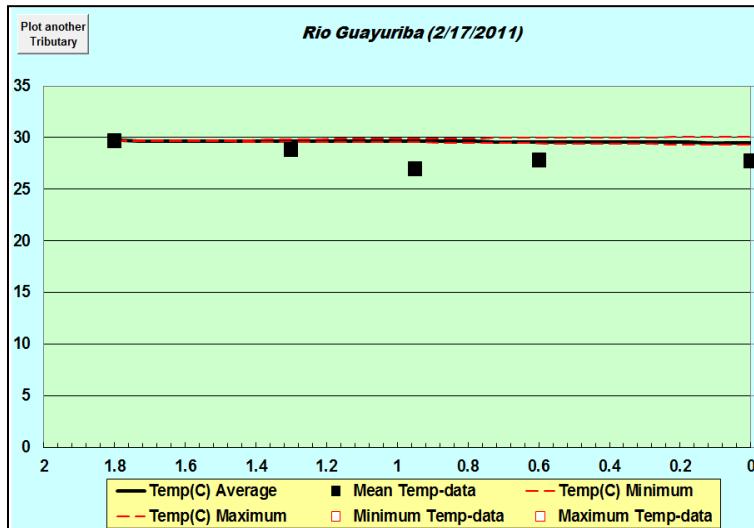


**Figura 2-87 Caudal - R. Guayuriba**  
**Fuente:** Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

- ✓ Temperatura

La temperatura de un cuerpo hídrico, es un parámetro que tiene relación, principalmente, con una condición ambiental del medio, que al ser alterada por un vertimiento, podría afectar la vida acuática natural del cuerpo de agua.

Como puede observarse en la **Figura 2-88** las condiciones de la descarga del STAP de las Estaciones Castilla-Acacias, no afectaron el delta de temperatura entre los puntos de monitoreo sobre el río Guayuriba, aguas arriba y aguas abajo del vertimiento; esto pudo generarse a que el segmento de estudio presenta condiciones geomorfológicas que influyen en la reaireación, permitiendo, una disminución en la temperatura a través de la distancia ( $29.7^\circ\text{C}$  a  $29.5^\circ\text{C}$ ).

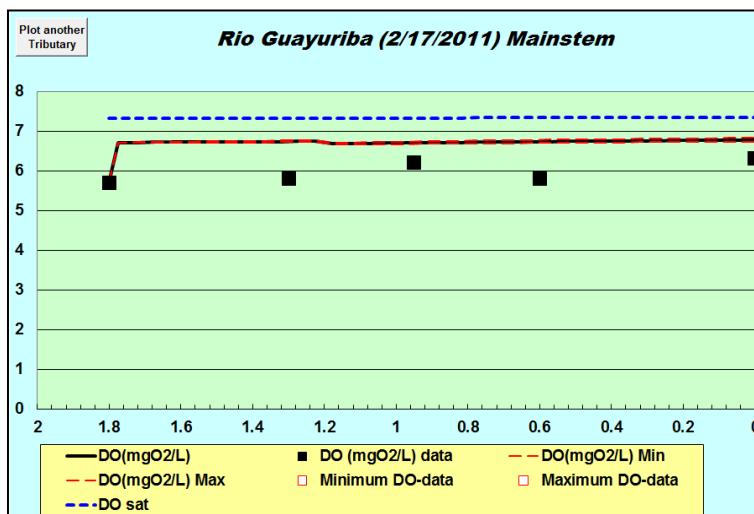

**Figura 2-88 Temperatura – R. Guayuriba.**

Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

✓ Oxígeno disuelto (OD)

El parámetro de oxígeno disuelto (**Figura 2-89**), tiene relación con la cantidad de gas oxígeno que puede estar presente en la masa de agua y es de gran importancia, pues es considerado como un buen indicador de la calidad de agua y de sus ecosistemas bióticos en ríos y quebradas. El efecto de un vertimiento, por lo general corresponde a una reducción del OD, asociado al aporte de materia orgánica que demanda el oxígeno para su degradación.

En los resultados de la simulación, se puede apreciar, que el modelo estima un incremento de la concentración del oxígeno disuelto, entre los valores reportados aguas arriba y aguas abajo del vertimiento, por lo cual se puede inferir, que la descarga del STAP, no genera ningún efecto adverso sobre la capacidad de reaireación del río y como resultado, los valores de oxígeno son superiores al objetivo de calidad (4mg/L) en un rango entre 5.7 a 6.77mg/L.

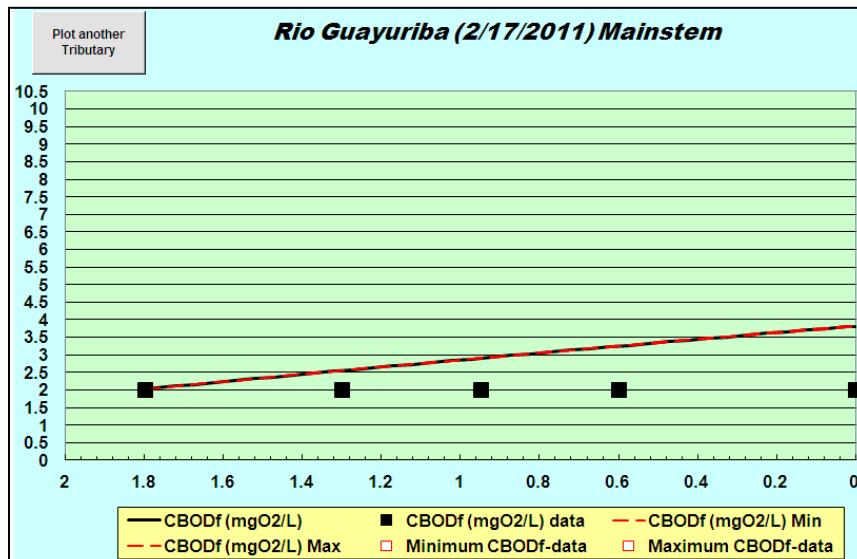

**Figura 2-89 Oxígeno Disuelto – R. Guayuriba**

Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

- ✓ Demanda bioquímica rápida (CDOBfast)

La DBO<sub>5</sub>, es un parámetro que se utiliza para medir en forma indirecta la concentración de la materia orgánica en un cuerpo de agua y representa la cantidad de oxígeno que demandan los microorganismos para lograr su degradación biológica. Cuando los vertimientos aportan materia orgánica en altas concentraciones, los niveles de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, tienden a reducirse y afectar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Caso contrario, si el aporte es bajo, el efecto incluso puede ser positivo ya que provee un mejor ambiente para el desarrollo de las especies presentes en el medio acuático.

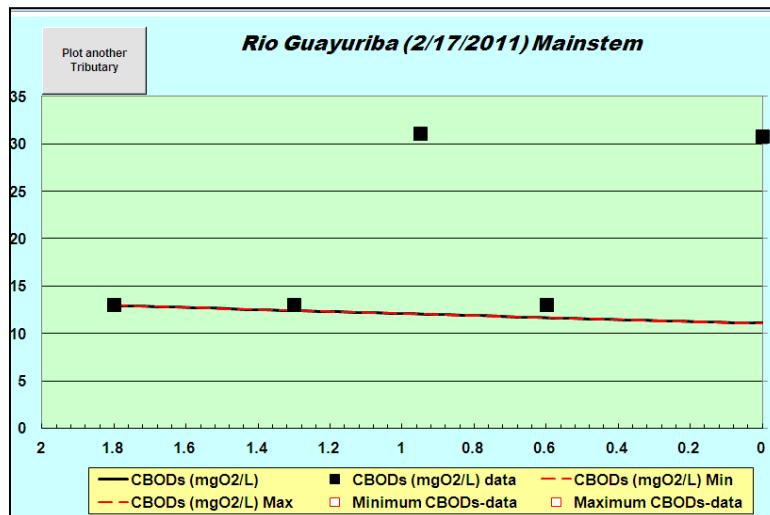
El modelo espera que desde aguas arriba del vertimiento, se presente un incremento en la concentración de este determinante, condición que se mantiene hasta el final del segmento de estudio. Al comparar las concentraciones de DBO<sub>5</sub> obtenidas en la simulación con los objetivos de calidad de CORMACARENA, es evidente el incumplimiento desde el punto aguas arriba del vertimiento de las estaciones Castilla-Acacias. Cabe anotar que hay incongruencias con respecto a los niveles de DBO<sub>5</sub> reportados en el histórico de calidad fisicoquímica del cuerpo de agua, los cuales indican, valores iguales a las mínima concentración cuantificable (<1.81 y <2.00mgO<sub>2</sub>/L).



**Figura 2-90 DBOfast – R. Guayuriba**  
**Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012**

- ✓ Demanda bioquímica lenta (CDO Bslow) (Equivalente a DQO)

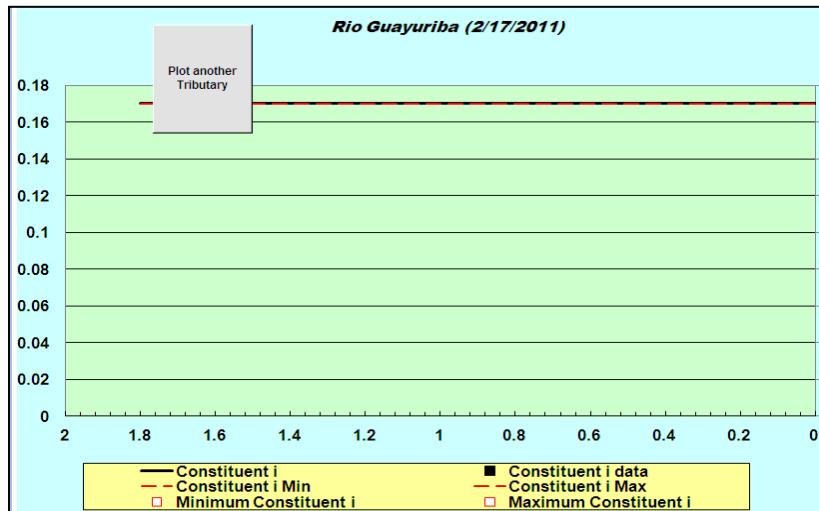
Contrario a la DBO rápida, la Demanda Química de Oxígeno representada en el modelo por la CDO Bslow presentó disminución en su concentración desde el punto aguas arriba del vertimiento hasta el final del segmento de estudio.



**Figura 2-91 DQO Río Guayuriba**  
 Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

✓ Fenoles

Los fenoles son contaminantes asociados a los hidrocarburos que en concentraciones altas se consideran tóxicos para los organismos vivos. En el agua de la descarga del STAP de las estaciones Castilla-Acacias, la concentración de fenoles, durante la mayoría de monitoreos, ha sido igual a la mínima concentración cuantificable del método utilizado en el laboratorio.



**Figura 2-92 Fenoles – R. Guayuriba**  
 Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

Por su parte la norma de vertimiento (Decreto 1594/84) establece un valor de 0,2 mg/L en el vertimiento como concentración máxima. El Decreto 1594/84 (Artículo 38 y 39) también establece un valor de 0,002 mg/L sobre un cuerpo de agua como objetivo de calidad para que no se limite su uso.

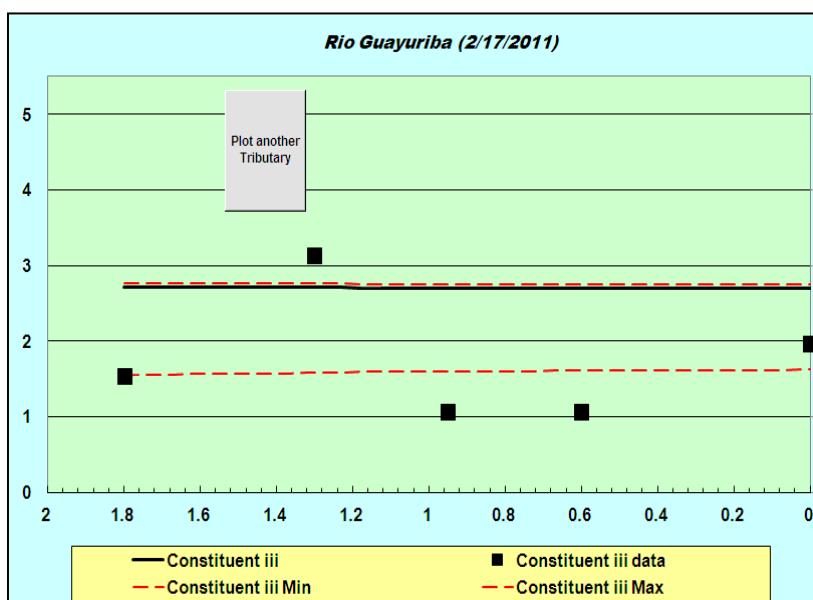
De acuerdo con los resultados de la modelación, a lo largo del segmento, el modelo estima que las concentraciones del fenol, se mantienen en 0.00017mg/L, por lo cual, se puede inferir que el vertimiento de las estaciones Castilla-Acacias, no altera la calidad del cuerpo de agua en cuanto a

los niveles de fenoles, de forma tal, que no se presenta incumplimiento con los objetivos de calidad de la normatividad ambiental.

- ✓ Grasas y aceites (G&A)

Las G&A, son contaminantes de baja degradabilidad que por lo general, afectan la vida acuática y en concentraciones altas impiden el ingreso de luz y la fotosíntesis de organismos acuáticos. De esta manera el Decreto 1594/84 y el objetivo de calidad de CORMACARENA, exigen que los vertimientos no provoquen película visible sobre los cuerpos de agua naturales. Así mismo, este decreto, establece remociones superiores al 80% en el sistema de tratamiento. HORTON (1965) clasifica como excelente un agua natural con ausencia de G&A y la considera de buena calidad con un valor de 5.0 mg/L. Al revisar los resultados del histórico de análisis se reportan concentraciones muy bajas, por lo cual se sugiere ausencia de película visible en el río Guayuriba.

Para la época de sequía, se registró un valor de 2.2 mg/L de G&A en el vertimiento y de 1.54 mg/L en el río Guayuriba aguas arriba del vertimiento. Sin embargo, según el modelo para esta fecha, se observó un incremento en los niveles de G&A en el segmento estudiado, por lo cual es necesario continuar con el monitoreo del cuerpo de agua y el vertimiento del río Guayuriba para validar tales resultados bajo nuevas corridas del modelo Q2K.



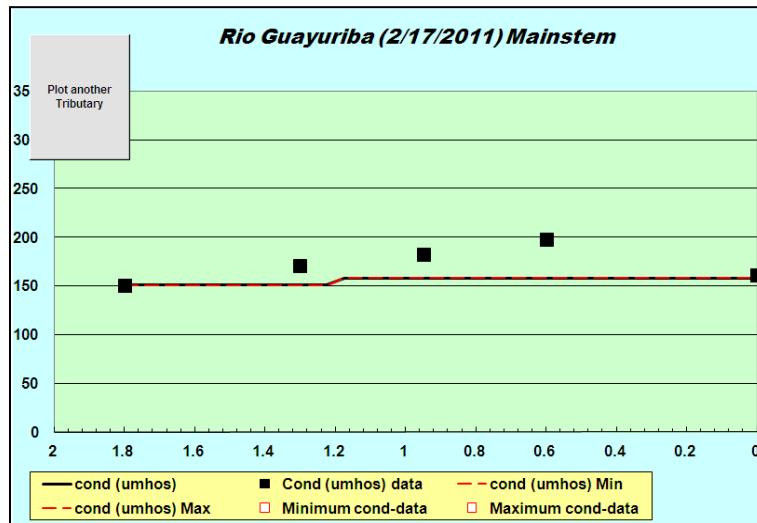
**Figura 2-93 G&A – R. Guayuriba.**  
 Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

- ✓ Conductividad

La conductividad es un parámetro que mide en forma indirecta la presencia de sales totales en el agua; tiene relación con la concentración del OD en los cuerpos de agua y como consecuencia con el equilibrio en la vida acuática. Igualmente tiene relación con las condiciones ambientales en las cuales se desarrollan los organismos acuáticos en el cuerpo de agua. Según Romero 1998, el agua con valores de conductividad entre 100 y 200 $\mu$ S/cm, se clasifica dentro de un grado de mineralización débil, lo cual es consecuente con el valor reportado en el río Guayuriba para la época de sequía, que fue simulado bajo Qual2K.

De acuerdo a la modelación, se observó que el vertimiento generaría un leve incremento sobre el cuerpo de agua, entre el punto aguas arriba del vertimiento y aguas abajo del mismo con valore de

151 y 157.9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente, lo cual no se considera perjudicial para los ecosistemas acuáticos.

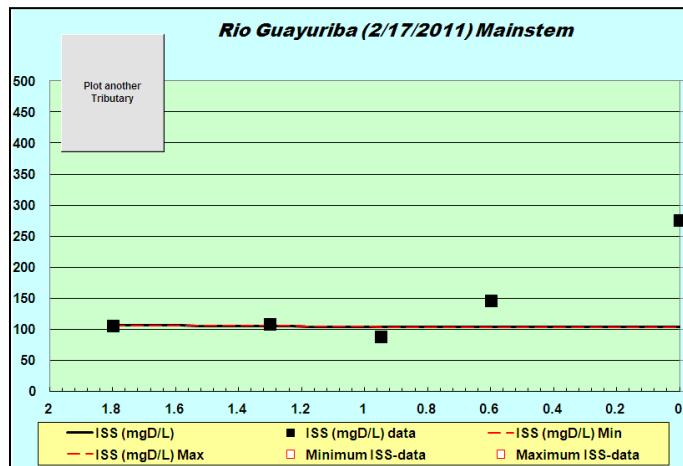


**Figura 2-94 Conductividad – R. Guayuriba.**  
**Fuente:** Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

✓ Sólidos Suspensidos Totales

Los sólidos suspendidos comprenden la fracción de los sólidos totales que puede ser removida por sedimentación. La presencia de sólidos en el agua tiene importancia ya que puede aportar turbiedad e interferir con el paso de luz y como consecuencia, con los procesos fotosintéticos que se desarrollan en el agua.

Los SST en el río Guayuriba, presentaron una alta variabilidad de acuerdo al histórico de caracterizaciones fisicoquímicas. Por su parte el vertimiento ha tenido valores inferiores a 6,4 mg/L, los cuales no se consideran que generen un efecto negativo significativo sobre el río. Como se ilustra en la Figura 2-95, el modelo estima, una leve disminución de los sólidos suspendidos aguas abajo del vertimiento, por lo cual se evidencia que el incremento reportado en la fecha de monitoreo modelada, no fue causa de la descarga sino de una característica propia de este tipo de cauces.

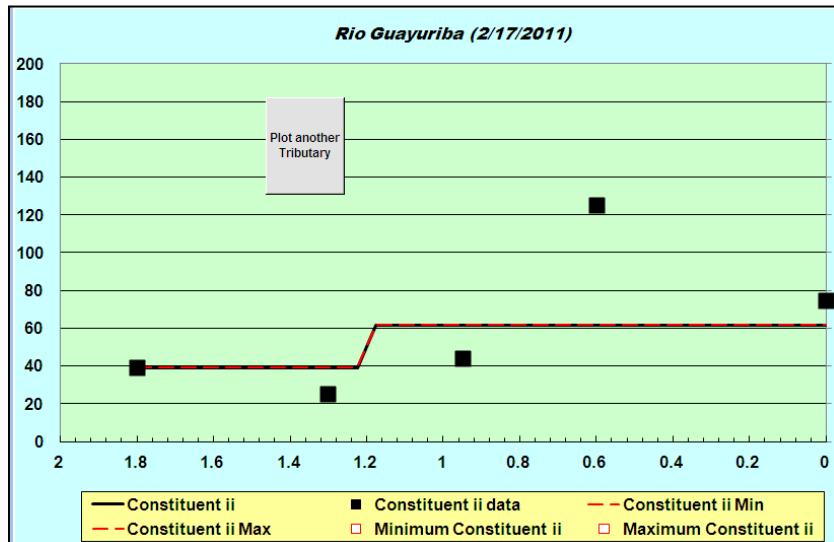


**Figura 2-95 SST – R. Guayuriba**

**Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012**

- ✓ Bario

Para evaluar el efecto de los metales pesados del vertimiento sobre el cuerpo de agua receptor, se seleccionó el Bario, el cual está presente en mayor concentración que los demás metales. El Decreto 1594/84, en sus artículos 38 y 39 (Consumo Humano y Actividades Agrícolas y Domésticas) establece un valor máximo de 1 mg/L para un cuerpo hídrico.



**Figura 2-96 Bario-R. Guayuriba**  
**Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012**

Bajo el escenario de simulación, el Bario presentó concentraciones de 39.10 µg/L aguas arriba del vertimiento y 61.60 µg/L en los tramos aguas abajo de la descarga de las estaciones Castilla-Acacias. Tales valores son inferiores al límite máximo establecido en el decreto 1594/84, permitiendo la destinación del recurso para consumo humano y actividades agrícolas y domésticas

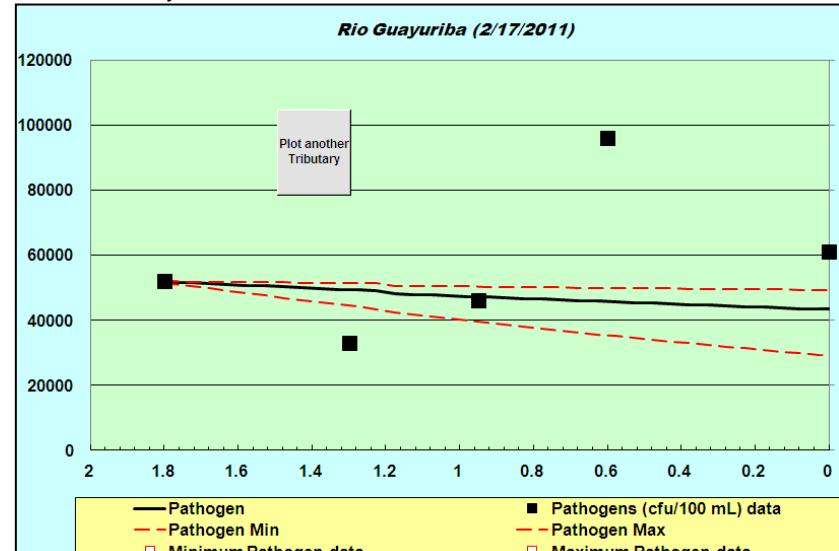
Sin embargo, debido a que los metales pesados son conservativos, acumulativos y corresponden a sustancias tóxicas que no están presentes en el cuerpo de agua, aguas arriba del vertimiento, es recomendable que los sistemas de tratamiento que se implementen estén orientados a cumplir con la remoción de metales pesados de tal forma que las concentraciones en la descarga sean inferiores a los valores establecidos por el Artículo 74 del Decreto 1594/84.

- ✓ Coliformes Totales

Los coliformes son un indicador de contaminación por presencia de patógenos en el agua; este parámetro tiene su origen en las heces animales y antrópicas de la zona. Es importante ya que su presencia limita la utilización del agua natural para uso humano (consumo, doméstico o recreativo) y puede generar riesgos para la salud.

Según las mediciones realizadas en el río Guayuriba, los coliformes totales aguas arriba del vertimiento están en promedio en 30.000 UFC/100 ml, siendo el objetivo de calidad de CORMACARENA de 5.000 NMP/100 ml. Los resultados de la modelación estiman que la cantidad de coliformes disminuye de 52000 UFC/100 ml a 43437 UFC/100 ml, cambio que contrasta con los datos de las caracterizaciones de calidad, en donde los niveles de coliformes aumentan. Sin embargo, es claro que el efecto del vertimiento es bajo, ya que los coliformes totales son muy altos en el río antes de recibir la descarga de la estación de Ecopetrol S.A. De todas formas, es

importante controlar este parámetro con el fin de contribuir al saneamiento del río propuesto por CORMACARENA en los objetivos de calidad.

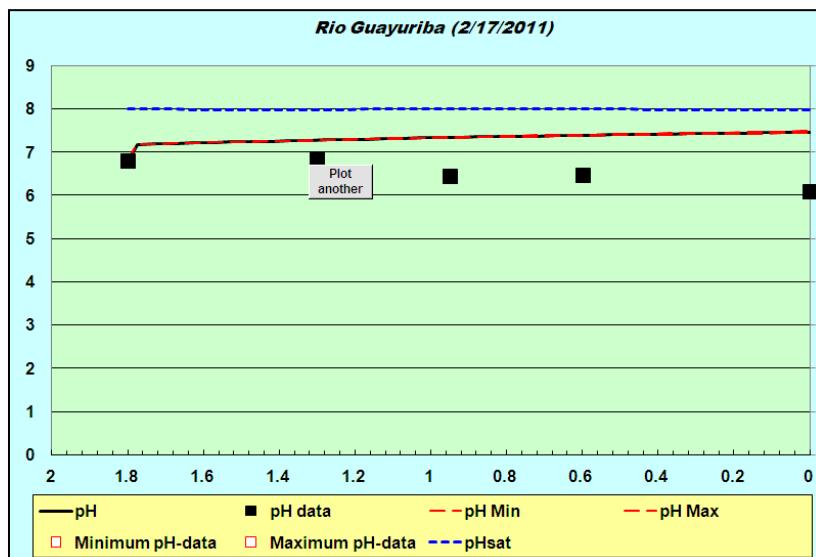


**Figura 2-97 Coliformes totales - R. Guayuriba**

Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

✓ pH

La mayoría de las aguas naturales y en especial, aquellas que poseen valores altos de alcalinidad total, resisten mejor a los cambios drásticos de pH, y por consiguiente, son propicias para el desarrollo de la biota acuática. Según los objetivos de calidad de CORMACARENA, el pH del cuerpo de agua debe oscilar entre 4.5 y 9.0 Unidades. Los resultados de la modelación estiman que el pH varía entre 6.79 unidades aguas arriba del vertimiento y 7.45 unidades aguas abajo del vertimiento, de tal forma que se cumple con el rango de límites permisibles que establece la normatividad ambiental



**Figura 2-98 pH - R. Guayuriba**

Fuente: Archivo de salida del Modelo QUAL2K. 2012

➤ **Resultados de la modelación Escenario 2**

Las Tabla 2-104 a Tabla 2-106 se muestran las salidas del modelo de calidad de agua que simuló bajo las condiciones de caudales máximo de vertimiento (3.7 m<sup>3</sup>/s) y mínimo en el río, con tiempo de retorno de 10 años (26.73 m<sup>3</sup>/s). Bajo el modelo, la DBO5 incumple con el objetivo de calidad establecido por CORMACARENA al igual que los coliformes totales, los cuales también presentan valores superiores a los determinados en el decreto 1594/84, desde las secciones aguas arriba del vertimiento. Cabe anotar que la descarga de las estaciones Castilla – Acacias no aporta altas concentraciones en DBO5 ya que este determinante se encuentra en la mayoría de monitoreos en una concentración igual a la mínima cuantificable del método.

**Tabla 2-104 Resultados Hidráulica**

REACH	DOWNSTREAM	HYDRAULICS	E', M3/S	H, M	BTOP, M	AC, M^2	U, MPS	SLOPE
LABEL	DISTANCE	Q, M3/S						
Mainstem headwater	1.80	26.73	0.00	0.33	114.69	36.36	0.74	0.004000
Cabecera	1.75	26.73	13.37	0.33	114.69	36.36	0.74	0.004000
Cabecera	1.70	26.73	13.37	0.33	114.69	36.36	0.74	0.004000
	1.65	26.73	13.37	0.33	115.63	36.48	0.73	0.004000
	1.60	26.73	13.37	0.33	115.63	36.48	0.73	0.004000
	1.55	26.73	13.37	0.33	116.56	36.60	0.73	0.004000
	1.50	26.73	13.37	0.33	116.56	36.60	0.73	0.004000
	1.45	26.73	13.37	0.33	117.50	36.72	0.73	0.004000
	1.40	26.73	13.37	0.33	117.50	36.72	0.73	0.004000
	1.35	26.73	13.37	0.33	118.44	36.83	0.73	0.004000
	1.30	26.73	13.37	0.33	118.44	36.83	0.73	0.004000
	1.25	26.73	13.37	0.33	119.38	36.95	0.72	0.004000
	1.20	26.73	13.37	0.33	119.38	36.95	0.72	0.004000
	1.15	30.43	15.22	0.35	121.22	40.19	0.76	0.004000
	1.10	30.43	15.22	0.35	121.22	40.19	0.76	0.004000
	1.05	30.43	15.22	0.35	122.15	40.31	0.75	0.004000
	1.00	30.43	15.22	0.35	122.15	40.31	0.75	0.004000
	0.95	30.43	15.22	0.35	123.09	40.43	0.75	0.004000
	0.90	30.43	15.22	0.35	123.09	40.43	0.75	0.004000
	0.85	30.43	15.22	0.34	124.03	40.56	0.75	0.004000
	0.80	30.43	15.22	0.34	124.03	40.56	0.75	0.004000
	0.75	30.43	15.22	0.34	124.97	40.68	0.75	0.004000
	0.70	30.43	15.22	0.34	124.97	40.68	0.75	0.004000
	0.65	30.43	15.22	0.34	125.90	40.80	0.75	0.004000
	0.60	30.43	15.22	0.34	125.90	40.80	0.75	0.004000
	0.55	30.43	15.22	0.34	126.84	40.92	0.74	0.004000
	0.50	30.43	15.22	0.34	126.84	40.92	0.74	0.004000
	0.45	30.43	15.22	0.34	127.78	41.04	0.74	0.004000
	0.40	30.43	15.22	0.34	127.78	41.04	0.74	0.004000

REACH	DOWNSTREAM	HYDRAULICS	E', M3/S	H, M	BTOP, M	AC, M^2	U, MPS	SLOPE
LABEL	DISTANCE	Q, M3/S						
	0.35	30.43	15.22	0.34	128.73	41.16	0.74	0.004000
	0.30	30.43	15.22	0.34	128.73	41.16	0.74	0.004000
	0.25	30.43	15.22	0.33	129.67	41.28	0.74	0.004000
	0.20	30.43	15.22	0.33	129.67	41.28	0.74	0.004000
	0.15	30.43	15.22	0.33	130.61	41.40	0.73	0.004000
	0.10	30.43	15.22	0.33	130.61	41.40	0.73	0.004000
Final Modelo	0.05	30.43	15.22	0.33	131.55	41.52	0.73	0.004000
Final Modelo	0.00	30.43	15.22	0.33	131.55	41.52	0.73	0.004000

**Tabla 2-105 Resultados temperatura**

REACH	DISTANCE	TEMP(C)	TEMP(C)	TEMP(C)
LABEL	X(KM)	AVERAGE	MINIMUM	MAXIMUM
Mainstem headwater	1.80	29.70	29.70	29.70
Cabecera	1.78	29.69	29.68	29.72
Cabecera	1.73	29.68	29.66	29.73
	1.68	29.66	29.63	29.75
	1.63	29.65	29.61	29.76
	1.58	29.64	29.59	29.78
	1.53	29.63	29.56	29.80
	1.48	29.62	29.54	29.81
	1.43	29.61	29.52	29.83
	1.38	29.59	29.50	29.85
	1.33	29.58	29.47	29.86
	1.28	29.57	29.45	29.88
	1.23	29.56	29.43	29.89
	1.18	29.92	29.79	30.24
	1.13	29.91	29.77	30.25
	1.08	29.89	29.75	30.27
	1.03	29.88	29.73	30.28
	0.98	29.87	29.71	30.29
	0.93	29.86	29.69	30.31
	0.88	29.85	29.67	30.32
	0.83	29.84	29.64	30.34
	0.78	29.83	29.62	30.35
	0.73	29.81	29.60	30.36
	0.68	29.80	29.58	30.38
	0.63	29.79	29.56	30.39
	0.58	29.78	29.54	30.41
	0.53	29.77	29.52	30.42

REACH	DISTANCE	TEMP(C)	TEMP(C)	TEMP(C)
	0.48	29.76	29.49	30.44
	0.43	29.75	29.47	30.45
	0.38	29.73	29.45	30.46
	0.33	29.72	29.43	30.48
	0.28	29.71	29.41	30.49
	0.23	29.70	29.38	30.51
	0.18	29.69	29.36	30.52
	0.13	29.68	29.34	30.53
Final Modelo	0.08	29.66	29.32	30.55
Final Modelo	0.03	29.65	29.30	30.56
Terminus	0.00	29.65	29.30	30.56

**Tabla 2-106 Resultados fisicoquímicos**

REACH LABEL	X(KM)	COND (UMHOS)	ISS (MGD/L)	DO(MGO2/L)	CBODS (MGO2/L)	CBODF (MGO2/L)	NO(UGN/L)	NH4(UGN/L)
Mainstem headwa	1.80	151.00	106.00	5.70	13.00	2.00	510.00	490.00
Cabecera	1.78	151.00	105.95	6.70	12.93	2.07	507.20	486.99
Cabecera	1.73	151.00	105.90	6.70	12.85	2.14	504.41	484.00
	1.68	151.00	105.85	6.70	12.78	2.20	501.63	481.03
	1.63	151.00	105.80	6.70	12.71	2.27	498.87	478.07
	1.58	151.00	105.74	6.70	12.63	2.34	496.12	475.13
	1.53	151.00	105.69	6.70	12.56	2.41	493.39	472.21
	1.48	151.00	105.64	6.69	12.49	2.47	490.66	469.31
	1.43	151.00	105.59	6.69	12.42	2.54	487.96	466.42
	1.38	151.00	105.54	6.69	12.35	2.60	485.26	463.55
	1.33	151.00	105.48	6.69	12.28	2.67	482.57	460.69
	1.28	151.00	105.43	6.69	12.21	2.73	479.90	457.85
	1.23	151.00	105.38	6.69	12.14	2.80	477.24	455.03
	1.18	202.31	92.99	6.23	12.44	2.76	416.95	397.39
	1.13	202.31	92.95	6.25	12.37	2.83	414.70	395.09
	1.08	202.31	92.91	6.27	12.30	2.89	412.46	392.79
	1.03	202.31	92.86	6.30	12.23	2.95	410.23	390.51
	0.98	202.31	92.82	6.32	12.16	3.02	408.01	388.22
	0.93	202.31	92.78	6.33	12.10	3.08	405.80	385.95
	0.88	202.31	92.74	6.35	12.03	3.14	403.60	383.68
	0.83	202.31	92.70	6.37	11.96	3.20	401.41	381.42
	0.78	202.31	92.65	6.39	11.89	3.26	399.23	379.17
	0.73	202.31	92.61	6.40	11.83	3.32	397.06	376.93
	0.68	202.31	92.57	6.42	11.76	3.38	394.90	374.70
	0.63	202.31	92.52	6.43	11.69	3.44	392.76	372.47
	0.58	202.31	92.48	6.45	11.63	3.50	390.62	370.25

REACH LABEL	X(KM)	COND (UMHOS)	ISS (MGD/L)	DO(MGO2/L)	CBODS (MGO2/L)	CBODF (MGO2/L)	NO(UGN/L)	NH4(UGN/L)
	0.53	202.31	92.44	6.46	11.56	3.56	388.49	368.05
	0.48	202.31	92.39	6.48	11.50	3.62	386.37	365.85
	0.43	202.31	92.35	6.49	11.43	3.68	384.26	363.66
	0.38	202.31	92.31	6.50	11.37	3.74	382.17	361.48
	0.33	202.31	92.26	6.51	11.30	3.79	380.08	359.31
	0.28	202.31	92.22	6.53	11.24	3.85	378.00	357.15
	0.23	202.31	92.18	6.54	11.18	3.91	375.94	355.00
	0.18	202.31	92.13	6.55	11.11	3.96	373.88	352.86
	0.13	202.31	92.09	6.56	11.05	4.02	371.83	350.73
Final Modelo	0.08	202.31	92.04	6.57	10.99	4.08	369.79	348.61
Final Modelo	0.03	202.31	92.00	6.58	10.92	4.13	367.77	346.50
Terminus	0.00	202.31	92.00	6.58	10.92	4.13	367.77	346.50

REACH LABEL	X(KM)	NO3 (UGN/L)	PO (UGP/L)	INORG P (UGP/L)	PATHOGEN	ALK	CONSTITUENT			PH
							i	ii	iii	
Mainstem headwa	1.80	240.00	36.00	9.90	52000.00	27.20	0.17	39.10	1.54	6.79
Cabecera	1.78	245.60	35.72	10.16	51602.26	27.17	0.17	39.10	1.54	7.18
Cabecera	1.73	251.16	35.43	10.43	51211.10	27.14	0.17	39.10	1.54	7.19
	1.68	256.69	35.15	10.69	50823.95	27.11	0.17	39.10	1.54	7.20
	1.63	262.19	34.87	10.94	50443.21	27.07	0.17	39.10	1.54	7.21
	1.58	267.66	34.60	11.20	50066.41	27.04	0.17	39.10	1.54	7.22
	1.53	273.08	34.32	11.45	49695.86	27.01	0.17	39.10	1.54	7.22
	1.48	278.49	34.05	11.70	49329.17	26.98	0.17	39.10	1.54	7.23
	1.43	283.85	33.78	11.95	48968.56	26.95	0.17	39.10	1.54	7.24
	1.38	289.20	33.51	12.20	48611.74	26.92	0.17	39.10	1.54	7.25
	1.33	294.50	33.24	12.45	48260.84	26.89	0.17	39.10	1.54	7.26
	1.28	299.78	32.98	12.69	47913.65	26.86	0.17	39.10	1.54	7.27
	1.23	305.02	32.71	12.93	47572.21	26.83	0.17	39.10	1.54	7.27
	1.18	272.29	28.51	11.56	42765.20	31.76	0.17	204.45	1.62	7.31
	1.13	276.62	28.29	11.77	42470.69	31.74	0.17	204.45	1.62	7.32
	1.08	280.95	28.07	11.97	42179.29	31.72	0.17	204.45	1.62	7.33
	1.03	285.24	27.85	12.17	41892.63	31.69	0.17	204.45	1.62	7.34
	0.98	289.53	27.63	12.37	41609.00	31.67	0.17	204.45	1.62	7.35
	0.93	293.78	27.42	12.57	41329.98	31.64	0.17	204.45	1.62	7.36
	0.88	298.03	27.21	12.77	41053.84	31.62	0.17	204.45	1.62	7.37
	0.83	302.25	26.99	12.96	40782.18	31.59	0.17	204.45	1.62	7.37
	0.78	306.45	26.78	13.15	40513.42	31.57	0.17	204.45	1.62	7.38
	0.73	310.63	26.57	13.35	40249.02	31.55	0.17	204.45	1.62	7.39
	0.68	314.79	26.36	13.54	39987.44	31.52	0.17	204.45	1.62	7.40

REACH LABEL	X(KM)	NO3 (UGN/L)	PO (UGP/L)	INORG P (UGP/L)	PATHOG EN	ALK	CONSTITUENT			PH
							i	ii	iii	
	0.63	318.92	26.16	13.72	39730.09	31.50	0.17	204.45	1.62	7.41
	0.58	323.04	25.95	13.91	39475.57	31.48	0.17	204.45	1.62	7.41
	0.53	327.14	25.75	14.10	39225.16	31.45	0.17	204.45	1.62	7.42
	0.48	331.22	25.55	14.28	38977.43	31.43	0.17	204.45	1.62	7.43
	0.43	335.27	25.34	14.46	38733.69	31.41	0.17	204.45	1.62	7.43
	0.38	339.30	25.15	14.64	38492.55	31.38	0.17	204.45	1.62	7.44
	0.33	343.31	24.95	14.82	38255.29	31.36	0.17	204.45	1.62	7.45
	0.28	347.30	24.75	15.00	38020.56	31.34	0.17	204.45	1.62	7.45
	0.23	351.27	24.56	15.18	37789.59	31.32	0.17	204.45	1.62	7.46
	0.18	355.22	24.36	15.35	37561.08	31.29	0.17	204.45	1.62	7.47
	0.13	359.14	24.17	15.53	37336.21	31.27	0.17	204.45	1.62	7.47
Final Modelo	0.08	363.04	23.98	15.70	37113.75	31.25	0.17	204.45	1.62	7.48
Final Modelo	0.03	366.92	23.79	15.87	36894.80	31.23	0.17	204.45	1.62	7.48
Terminus	0.00	366.92	23.79	15.87	36894.80	31.23	0.17	204.45	1.62	7.48

Además de los resultados de la modelación como criterios para la elección del punto de vertimiento se consideraron los siguientes:

- ✓ Se cuenta con una estación de medición de caudales
- ✓ Existía una línea que le permite centralizar el uso del suelo en el sector para vertimiento. Permite reducir la ocupación de suelo, frente a un trazado por un nuevo sector.
- ✓ Facilitar la vigilancia y el mantenimiento y supervisión de las dos líneas.
- ✓ En la medida en que los puntos estén mas próximos, permite reducir la longitud de mezcla del vertimiento y consecuentemente el área de influencia directa del vertimiento.
- ✓ Permite que los monitoreos realizados históricamente puedan ser comparados con los monitoreos que se realicen a futuro, en la medida en que la proximidad de los puntos hace que la longitud de mezcla se similar para uno y dos puntos de vertimiento.

#### Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos con la modelación se puede concluir lo siguiente:

- o La capacidad de amortiguación y dilución del río Guayuriba están influenciadas por la carga contaminante que aportan los vertimientos.
- o La condición más desfavorable para el cuerpo de agua receptor es la temporada de estiaje, dado que la disminución del caudal en el río Guayuriba limita sus procesos de dilución, siendo el caudal mínimo mensual  $26,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual se puede esperar en un tiempo de retorno de 10 años.
- o La longitud de mezcla para el río Guayuriba se estimó en 2 Km.
- o La modelación y los cálculos se realizaron para el caudal mínimo, estimado para el mes de febrero, por lo que para el resto de los meses la capacidad de amortiguación del cuerpo receptor sería mayor, ya que la relación de caudales (Qrío/Qvertido) sería mayor.

- o De acuerdo con la modelación, los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto, Grasas y Aceites, fenoles, pH, conductividad, metales pesados y DQO, bajo el máximo caudal de vertimiento de las estaciones Castilla – Acacias ( $3.7\text{m}^3/\text{s}$ ) y mínimo en el cuerpo de agua ( $26.7\text{ m}^3/\text{s}$ ), no producen cambios en la destinación del recurso hídrico para ninguno de los usos establecidos en el Decreto 1594/84, siendo viable bajo el modelo, la descarga de 2 millones de barriles/día en el río Guayuriba.
- o El río Guayuriba presenta incumplimiento en Coliformes Totales bajo los dos escenarios de simulación (Condición Actual y Condición Extrema) desde la secciones monitoreadas aguas arriba del vertimiento de las estaciones Castilla y Acacias. Es importante que se tomen las medidas de saneamiento necesarias para alcanzar como mínimo los niveles permitidos de patógenos en el río, pero tales estrategias de mejoramiento del recurso hídrico deben realizarse de forma conjunta con los usuarios del mismo.
- o Históricamente la concentración promedio de fenol ha sido inferior a 0,1 mg/L en el vertimiento; sin embargo durante el periodo 2009 a 2011 se han registrado 2 eventos en los cuales el valor del fenol ha estado por encima de los 1.0 mg/L. De todas formas, es importante tomar en consideración que durante este periodo el caudal mínimo del río fue de  $33\text{ m}^3/\text{s}$  y el promedio de  $43\text{ m}^3/\text{s}$ , por lo cual no se puede afirmar que la capacidad de asimilación haya sido superada.
- o Otro parámetro importante que aporta el vertimiento corresponde a Grasas y Aceites, tomando en cuenta que el objetivo de calidad fijado por CORMACARENA para el río Guayuriba es Ausente. De todas formas en el cuerpo de agua se han registrado valores hasta de 3.0 mg/L aguas arriba del vertimiento; aunque la mayoría de la veces se ha registrado valores inferiores a 1,07 mg/L.
- o Para que se puedan realizar los vertimientos futuros de  $3,7\text{ m}^3/\text{s}$  ( $2'000.000\text{ BPD}$ ) sobre el río Guayuriba, es necesario que se sigan cumpliendo los objetivos de calidad establecidos tanto en el decreto 1594/84 como en el auto de CORMACARENA.
- o Ya que la capacidad de asimilación también depende del caudal del río, es recomendable que el vertimiento se realice preferiblemente empleando el brazo principal. De esta manera se reduce la longitud de mezcla y por lo tanto el área de influencia directa del vertimiento. Lo anterior permite minimizar los impactos ambientales asociados a los cambios en la calidad físico-química e hidrobiológica del cuerpo receptor en la zona de mezcla, así como reducir las molestias sobre la comunidad por el impacto visual de vertimiento.
- o Durante el desarrollo del proyecto, es recomendable realizar monitoreos sobre cuerpo de agua receptor, aguas arriba y aguas abajo del sitio o el sector seleccionados para el vertimiento, de tal forma que se evalúen por los menos, los parámetros considerados en la modelación. Igualmente es recomendable valorar el vertimiento, de tal forma que éstos no superen los valores establecidos en el Decreto 1594/84. Los monitoreos aguas abajo se deben realizar después de la zona de mezcla para evaluar el efecto de vertimiento sobre la totalidad del cuerpo de agua. Los monitoreos ubicados dentro de la zona de mezcla se pueden emplear como referencia para evaluar también el impacto en la zona de influencia; sin embargo, se debe tener en cuenta en dicho sector aún no se logra la mezcla completa, por lo que los resultados podrían arrojar valores superiores a los objetivos de calidad.
- o Es recomendable validar la zona de mezcla en campo, para periodos seco y de lluvias, el método de medición más recomendable es a través de los Ensayos con Trazadores dado el caudal y el comportamiento dinámico del río Guayuriba, utilizando como marcador conservativo, la Rodamina WT.

### 2.3.3.5 Alternativas de trazado

El trazado de la nueva línea de vertimiento, se realizará por un derecho de vía paralelo al de la línea existente y al costado izquierdo de la misma.

Dicha línea asumirá los caudales provenientes de los sistemas de tratamiento de las estaciones Castilla1, Castilla 2, Castilla 3, Acacias y Chichimene. Para el recibo de estos efluentes es necesario acondicionar una línea que permitirá transferir 300.000 BWPD desde la Estación Castilla 2 a las piscinas de estabilización de la Estación Acacias para su posterior vertimiento en el Río Guayuriba. Adicionalmente, será necesario construir una línea de transferencia de 36" desde la Estación Castilla 3 hacia la Estación Acacias.

El vertimiento se realizará por medio de una segunda flauta cercana a la flauta actual. La profundidad y la distancia al lecho del río serán similares a las correspondientes a la flauta existente.

### 2.3.3.6 Métodos constructivos instalaciones de apoyo y prueba hidrostática

La construcción de la línea de flujo para el transporte del crudo desde la plataforma hasta la estación de recibo más cercana, cobijará las siguientes actividades:

#### ➤ Constitución de servidumbres

El trazado de la línea de flujo utilizará un derecho de vía paralelo al de la línea existente. En algunos casos este nuevo derecho de vía se superpondrá con servidumbres ya adquiridas lo cual facilitará la construcción de la misma en dicho aspecto. En el caso para el cual se requiera la constitución de nuevas servidumbres, se solicitará permiso formal en primera instancia (oficio con recibido) al dueño del predio, explicándole la necesidad de realizar una visita al predio de interés.

En la visita al predio se debe elaborar una relación de la infraestructura existente en el terreno y sus alrededores; así como de las áreas de bosques, cultivos, rastrojos, pastos, aljibes, pozos profundos, nacimientos, entre otros recursos, que puedan existir, con su respectivo registro fotográfico. Al respecto se levantará un acta inicial de inventario firmada por el propietario; en la que se esté de acuerdo por parte del propietario en lo que se encontró.

En esta acta inicial o en una nueva acta, se consignarán los acuerdos por avalúos de servidumbre, así como las características del proyecto a desarrollar. Esta acta estará acompañada de una exposición verbal al propietario de lo que en ella se consigna, especificando con claridad las actividades y demás aspectos relacionados con el proyecto.

#### ➤ Replanteo topográfico de la línea

Esta actividad se refiere a las operaciones de localización y replanteo de las obras para control planimétrico y altimétrico de la misma, con base en las coordenadas y cotas de los planos.

Para esta actividad se utilizan procedimientos tradicionales de topografía, con estación total y distanciómetros, a partir de los mojones de referencia establecidos previamente.

#### ➤ Movilización de equipos, materiales y personal

Los equipos de construcción y la tubería se movilizarán aprovechando las vías municipales, interveredales, los accesos existentes y el propio derecho de vía para la línea en construcción. No se construirán vías de acceso nuevas para el desarrollo de esta actividad, por lo cual se

aprovecharán los medios de transporte existente en la zona para el desplazamiento y trasiego de equipos y materiales hasta los frentes de obra.

Una vez el acceso hasta las áreas de trabajo ofrezca las garantías necesarias para el tránsito seguro, se procede a transportar maquinaria, equipo (equipo para corte de tubería, equipo de soldadura, etc.) e insumos (madera para construcción de entibados, palas, picas, etc.) requeridos para las labores de construcción de la línea.

El cargue de la tubería en los remolques debe hacerse de acuerdo con el procedimiento presentado por el Contratista y aprobado por Ecopetrol S.A. Las dimensiones máximas que deberá tener el remolque se relacionan en la **Tabla 2-107**:

**Tabla 2-107 Dimensiones máximas del remolque para el transporte de tuberías**

DIMENSIÓN DEL REMOLQUE	VALORES MÁXIMOS
Ancho útil:	2,6 m
Altura útil:	4,4 m (incluyendo remolque)
Longitud útil:	12,2 m
Carga útil:	26,5 ton

Fuente: Normas de Ingeniería de Oleoductos. NIO-0501

El Contratista transportador debe usar equipos con capacidad adecuada y en buen estado para garantizar la entrega de la tubería.

El transporte local debe realizarse utilizando los equipos convenientes (carga-tubos), cuyos soportes ("cunas") deben estar debidamente protegidos con bandas de caucho. Deben tomarse las medidas necesarias para evitar el contacto tubo a tubo durante el transporte.

Transporte de equipos: Los trabajos de movilización y desmovilización se realizarán utilizando los medios más adecuados para evitar daños a los sitios por donde pase; el deterioro que se ocasiona como consecuencia de esta actividad y éste será reparado oportunamente.

Para el transporte de equipos, pesados o livianos, se utilizarán elementos tales como polines, sacos, cadenas, etc., para garantizar que durante el transporte no ocurran accidentes que puedan afectar tanto a los elementos transportados como al entorno en su trayecto.

Se utilizarán camiones o vehículos de carga para el transporte de equipos pesados o livianos, los cuales deberán ser apropiados tanto en número como en capacidad para no sobrepasar los límites de carga establecidos para las vías y puentes por donde se transite.

Transporte de personal: El transporte colectivo del personal de construcción hacia los sitios de obra, se hará en vehículos apropiados para tal fin, tales como camperos, buses o camiones acondicionados para el transporte de personas, preferiblemente de modelos cuya vida útil no exceda cinco años.

#### ➤ Sitio de acopio de tubería y de materiales

Los sitios de acopio estarán ubicados en lugares con apropiada infraestructura, en los cuales se requerirá la adecuación del terreno e instalaciones de apoyo para el acomodamiento de la tubería. Dichos sitios deberán permitir la movilización de los equipos de transporte y cargue y la instalación de elementos de soporte para el almacenamiento de la tubería.

En la **Tabla 2-108** se presentan los sitios de acopio establecidos para el desarrollo de las actividades constructivas de la nueva línea de vertimiento

**Tabla 2-108 Sitios para acopio de equipos y tubería**

NOMBRE	AREA (M2)	AREA (Ha)	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ	
			ESTE	NORTE
Acopio Temporal 1	42.349,11	4,23	1.063.571,56	932.903,77
			1.063.560,92	933.004,18
			1.063.975,28	933.060,27
			1.063.988,82	932.960,25
			1.063.571,56	932.903,77
Acopio Temporal 2	55.521,82	5,55	1.060.374,60	932.527,18
			1.060.319,90	932.716,15
			1.060.593,42	932.790,75
			1.060.643,15	932.598,04
			1.060.374,60	932.527,18
Acopio Temporal 3	47.521,76	4,75	1.059.075,31	931.747,42
			1.059.277,83	931.883,38
			1.059.389,68	931.718,95
			1.059.192,31	931.588,80
			1.059.075,31	931.747,42
Acopio Temporal 4	37.421,47	3,74	1.058.375,27	929.252,15
			1.058.408,94	929.310,75
			1.058.763,40	929.135,27
			1.058.735,16	929.078,22
			1.058.735,33	929.077,37
			1.058.712,52	929.038,76
			1.058.507,21	929.128,26
			1.058.530,20	929.175,46
Acopio Temporal 5	47.521,76	4,75	1.058.375,27	929.252,15
			1.056.891,74	926.216,18
			1.057.033,97	926.414,35
			1.057.196,23	926.299,38
			1.057.056,80	926.108,45
Acopio Temporal 6	57.698,88	5,77	1.056.891,74	926.216,18
			1.055.188,44	923.271,01
			1.055.355,50	923.494,61
			1.055.427,57	923.477,45
			1.055.473,44	923.225,20
			1.055.415,30	923.141,12
			1.055.188,44	923.271,01

Fuente: Ecopetrol S.A.

➤ **Señalización temporal**

Anterior al tendido de la línea, el contratista deberá elaborar un plan de manejo de tráfico (PMT), el cual deberá estar avalado por la Interventoría HSEQ de Ecopetrol S.A. y en el cual se establezcan las medidas de seguridad que deben seguirse en el desarrollo de las actividades, con el fin de mitigar, prevenir y evitar riesgos a la integridad física de los habitantes del sector y a la infraestructura existente en las áreas de trabajo.

Los diferentes tipos de señales se instalarán antes de la iniciación de las operaciones de construcción en el sector, éstas se resumen en la **Tabla 2-109**:

**Tabla 2-109 Señalización vial a utilizar durante los trabajos de construcción de líneas de flujo**

**Señales reglamentarias.** Forma circular. Diámetro mínimo del círculo: 90 cm. Color: Fondo blanco y símbolo y orla negra, trazo oblicuo rojo. Las señales reglamentarias que indican prohibición, deben tener un trazo oblicuo descendente a 45° con la horizontal de izquierda a derecha.

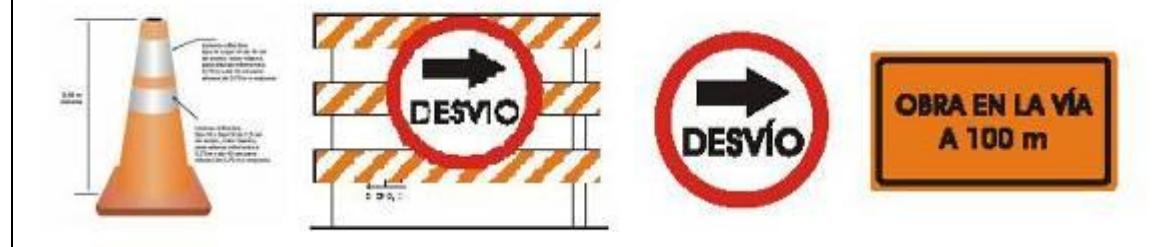
**Señales preventivas.** Forma cuadrada. Se deben colocar con una diagonal en sentido vertical. Dimensión mínima del lado del cuadrado: 90 cm. Color: Fondo anaranjado y símbolos y orla negra.

**Señales informativas.** Forma rectangular. Se deben hacer con la mayor dimensión en posición horizontal. Las dimensiones del rectángulo varían de acuerdo con el mensaje. El lado menor debe ser mínimo de 50 cm. Color del fondo anaranjado. Letra y orla negras. Las señales informativas deben indicar, además, entradas y salidas de equipos pesados y su ubicación debe ser escogida en forma tal que sea fácilmente visible y no interfiera el tránsito continuo de los vehículos ni la visibilidad, ya sea por la ubicación o por las demoras ocasionadas por su lectura.

**Barricadas.** Se deben formar por bandas o listones horizontales de longitud no superior a 3 m y ancho de 30 cm separados por espacios iguales a sus anchos. La altura de cada barricada debe tener un mínimo de un 1.5 m. Las bandas horizontales se pintan con franjas alternadas negras y anaranjadas reflectivas que formen un ángulo de 45° con la vertical.

**Canecas.** Cuando la construcción de barricadas no es factible se pueden utilizar canecas llenas de suelo, previo acuerdo con Ecopetrol, las cuales deben pintarse con franjas alternadas reflectivas negras y anaranjadas de 20 cm de ancho; la altura de las canecas no debe ser inferior a 80 cm.

**Conos.** Existen conos de delineación y delineadores luminosos. Se deben utilizar conos con una altura mínima de 45 cm, los cuales se emplean para delinejar los sitios temporales de construcción cuando el flujo de tránsito sea temporalmente desviado de su ruta. En vías donde haya tráfico nocturno se deben utilizar señales intermitentes que demarquen la calzada de tránsito por medio de focos luminosos distanciados no más de 10 m



➤ **Apertura y conformación del derecho de vía**

El derecho de vía es una franja de terreno a lo largo de toda la línea cuyo ancho varía de acuerdo al diámetro de la tubería y el número de éstas. Para el caso de la nueva línea de vertimiento, esta faja tendrá un ancho de 50 metros. En dicha faja, se ejecutarán los trabajos con la intención de que permanentemente sea posible el tránsito a lo largo de toda la línea, tanto para equipos como para vehículos.

➤ **Transporte, acopio y tendido de tubería**

- ✓ Transporte: la tubería será transportada hasta los sitios de almacenamiento principal y secundario, cercano al derecho de vía, desde donde posteriormente se hace la distribución a los diferentes frentes de trabajo.
- ✓ Durante el cargue de la tubería en el remolque, deben manejarse los tubos sin dejarlos caer y se colocan pareados en su longitud con los otros tubos. Después de acomodarlos, se aseguran con eslingas de *nylon*, debidamente protegidas para fijar la carga a los apoyos. Se deben utilizar cojines de caucho o manilas de *nylon* para evitar el contacto tubo a tubo; los apoyos deben ser suficientemente anchos para distribuir la carga. Durante el viaje debe evitarse el deslizamiento de los tubos.
- ✓ Acopio: Se refiere al almacenamiento de los tubos en los sitios previamente autorizados yadecuados en la forma conveniente, para evitar daños a los mismos. Los lugares escogidos deben estar localizados en terrenos firmes y bien nivelados, con las pendientes y drenajes adecuados, que permitan la escorrentía.
- ✓ Disposición de los tubos: La primera hilada de tubos se debe apoyar sobre durmientes de madera o montículos de tierra revestida con sacos o similar y en ningún caso sobre el terreno natural. Para evitar el contacto tubo a tubo se deben emplear lazos (manilas) de *nylon* (f 1/2"), adecuadamente dispuestas en sentido transversal a la tubería en cada tercio de su longitud
- ✓ Tendido de Tubería: Conformado el derecho de vía, se realizará el tendido de la tubería que consistirá en transportarla desde los sitios de acopio hasta el derecho de vía, donde se ubicará, de tal manera que permita la circulación de los vehículos, maquinaria y equipos.
- ✓ La tubería descansará apoyada sobre sacos llenos de suelo del sitio a lo largo del derecho de vía o sobre marcos H.

➤ **Doblado, alineado y soldadura de tubería**

- ✓ Doblado: Esta actividad será llevada a cabo por el frente de doblado, el cual se hará en frío con una dobladora. Este equipo de doblado y el método constructivo se definen de acuerdo con el diámetro, espesor y calidad de la tubería, así como dependiendo de la topografía del terreno. Al respecto es importante tener en cuenta que la distancia mínima entre una curva y una junta circumferencial a los extremos de la tubería no debe ser inferior a 1,80 m con el fin de evitar ovalamiento.
- ✓ Alineación: consiste en la colocación de los tubos enfrentados, mediante la utilización de grapas internas y externas que garanticen su alineación y fijación, durante el desarrollo de los trabajos.
- ✓ Soldadura: Esta será realizada por personal calificado y regulada según la norma API-1104 "STANDARD PIPELINE WELDING AND RELATED FACILITIES". Durante Esta labor las soldaduras deberán protegerse de las condiciones meteorológicas que puedan perjudicarlas durante la operación. También se dejará una pega abierta cada cierta distancia con el fin de poder manejar la lingada, de tal forma que al bajar coincidan las curvas con la zanja y así evitar cortes posteriores.

➤ **Radiografía y revestimiento de juntas**

Este proceso se utilizará durante la construcción para determinar los defectos en la soldadura tales como poros y fisuras, de tal manera que luego se pueda realizar la correcta reparación, garantizando absoluta perfección en las uniones de los tubos.

Toda junta de producción debe inspeccionarse visualmente en todas y cada una de las etapas de su ejecución. Las fallas detectadas durante esta inspección deben corregirse para poder proseguir con su ejecución.

Para el control radiográfico se permiten fuentes electrónicas (Rayos X) o Isotópicas (Rayos Gamma). Se efectúa el control radiográfico hasta el 50% de las juntas soldadas. En pasos especiales, el control radiográfico es del 100%.

Los residuos generados durante la realización de esta actividad tales como material radiográfico utilizado y empaques, así como los residuos químicos generados en los laboratorios estacionarios y/o móviles tales como soluciones químicas y materiales de relevado serán manejados como residuos sólidos especiales y su manejo y disposición final lo harán las empresas autorizadas por la Autoridad Ambiental para tal fin.

#### ➤ **Bajado y enterrado de la línea**

Una vez la tubería se encuentra tendida se procede a la apertura de la zanja a lo largo del derecho de vía, se debe aplicar limpieza con sandblasting, grado cerca de metal blanco (SSPC-SP10).

Posteriormente se les aplica el siguiente sistema de pinturas: Como recubrimiento anticorrosivo: Primer Epoxi – Zinc, referencias: 10073 componente A, 10074 Componente B y 13351 componente C, de Pintuco o su equivalente, hasta un espesor seco promedio de 2,5 a 3,0 mils. Y como recubrimiento de acabado se aplicará EPOXI – ALQUITRAN, referencia 13265 componentes A y 13266 componente B de Pintuco o su equivalente, hasta un espesor seco promedio de 8,0 a 10,0 mils; para obtener un espesor seco promedio de todo el sistema de 10,5 a 13,0 mils.

Antes de realizar el relleno y tapado de la tubería, se debe inspeccionar el recubrimiento con ensayo de continuidad y medición de espesores con los equipos correspondientes. Para la preparación y aplicación de las pinturas se siguen estrictamente las recomendaciones del fabricante.

Dado que la línea va enterrada, debe garantizarse su protección antes de ser depositadas en el fondo de la zanja. Si al bajar los tubos a la zanja se estropea la protección, esta deberá repararse antes del tapado.

Durante el llenado de la zanja se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Debe retirarse del fondo de la zanja todo aquello que pueda dañar al recubrimiento como por ejemplo, rocas sueltas, piedras, bloques de madera, tubos, herramientas y varillas de soldadura. El fondo debe estar nivelado para que el peso de la tubería quede bien distribuido.
- ✓ El material de relleno de las zanjas es el mismo de la excavación de ellas, libre de materia orgánica o de suelos muy húmedos y blandos. La zanja se llenará inmediatamente después de la instalación para evitar cualquier daño del recubrimiento. Después de colocar sobre la tubería unos 15 cm de relleno con tierra suelta, se pueden incluir los objetos duros separados anteriormente.
- ✓ El relleno debe terminarse acamellando el material, de manera que la parte superior de dicho camellón quede 20 a 30 cm por encima del nivel del terreno adyacente, apisonándolo con un mínimo de 4 pasadas con un mini compactador de rodillo.
- ✓ Los materiales que resulten de las excavaciones deben almacenarse en forma separada y se evaluarán si estos cumplen con las características de calidad, tales que le permitan ser o no reutilizados. Todos los escombros y material sobrante de la excavación, serán recogidos y acordonados al lado de la zanja, evitando que se mezcle con la capa vegetal retirada durante

la apertura del derecho de vía y protegidos para evitar el lavado por escorrentía. Estos materiales podrán ser utilizados para llenar sacos, los cuales podrán emplearse en la protección de taludes y cauces contra la erosión u otras funciones.

- ✓ No deberán alterarse las condiciones de estabilidad del terreno y/o estructuras aledañas. En las áreas donde se requiera romper infraestructura en concreto, se debe tener especial cuidado de no apilar los escombros en sitios donde impidan la libre operación de los equipos existentes y se debe evitar el deterioro de las instalaciones respectivas.

El material que deba ser remplazado, será remplazado por material granular de buena gradación, libre de materiales vegetales y será de naturaleza tal que al regarlo y pisarlo, se produzca una buena compactación.

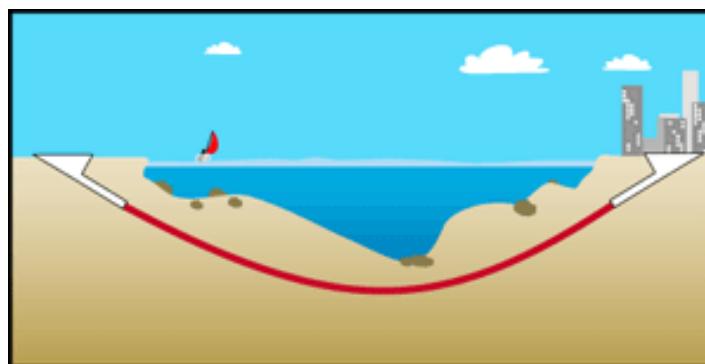
#### 2.3.3.7 Procesos constructivos en cruces especiales

##### ➤ Cruces fluviales

La ejecución de las obras de construcción de la nueva línea de vertimiento requieren de implementar cruces de algunas corrientes hídricas, para lo cual se tiene planificada la adecuación de pasos sub-fluviales, empleando para ello como método constructivo el método de zanja abierta.

Para el cumplimiento de esta labor, se obtendrán de manera previa al inicio de obra, los respectivos permisos de ocupación de cauce, e igualmente ha de requerirse las medidas de manejo adecuadas para el control de las aguas del cauce intervenido, en el sitio de ejecución de las obras.

En todo caso se debe realizar el respectivo análisis técnico que permita definir la ejecución de cruces especiales empleando la técnica de perforación horizontal dirigida, que permita que la línea pase por debajo del lecho del cauce de que se trate, con los beneficios ambientales sumados a los que en materia de seguridad esta opción confiere. En la **Figura 2-99** se observa un esquema de un cruce de este tipo.



**Figura 2-99 Esquema Cruce Subfluvial**  
**Fuente: Ecopetrol S.A. 2011**

##### ➤ Vías

Antes del inicio de las obras, se hará la gestión necesaria para obtener oportunamente los permisos indispensables para cruzar con la línea las carreteras y caminos que se encuentren en el trazado de la misma. Dependiendo del servicio que presten, las vías se clasifican como principales y secundarias.

**Vías principales:** Son las carreteras interdepartamentales e intermunicipales pavimentadas y aquellas que por sus características de tráfico no deben ser interrumpidas. La excavación debe hacerse por el método de perforación y el procedimiento debe estar conforme al *API RP 1102*. De acuerdo con la autorización recibida del propietario de la vía, algunos cruces pueden efectuarse por una combinación de túnel perforado y zanja a cielo abierto.

**Vías secundarias:** Son las carreteras intermunicipales, caminos vecinales y carreteras veredales con afirmado. Los cruces de este tipo pueden realizarse a zanja abierta. La tubería debe instalarse recta. Debe rellenarse la zanja inmediatamente después de bajar la tubería y su acabado y compactación deben ser, como mínimo, iguales a los existentes en la vía antes de construir la zanja.

Para la intervención de una vía cuya administración esté a cargo del Instituto Nacional de Vías INVIAS, deberá solicitarse el respectivo permiso de uso de zona y anexar a los documentos técnicos solicitados un respectivo Plan de Manejo de Tráfico (PMT) para el desarrollo de los trabajos sin afectar las condiciones de transitabilidad sobre la vía.

Para cualquier cruce de vías se debe contar con una adecuada señalización, de acuerdo con el Manual de Señalización del Ministerio de tránsito y transporte.

#### 2.3.3.8 Prueba hidrostática

La prueba hidrostática es un ensayo mecánico que somete la tubería a condiciones extremas admisibles, de tal manera que se constituye en un examen final de ducto. La presión de prueba hidrostática en cualquier punto de la tubería no debe ser inferior al 125% de la presión de operación en cualquier punto.

Para la prueba se utilizarán equipos como: múltiples, bombas, compresores, filtros, tubería para llenado y drenaje, raspadores, etc.; instrumentos, inhibidor de corrosión, secuestrante de oxígeno entre otros. El agua que se utilizará para la prueba hidrostática será captada del STAP más cercano.

Deben realizarse pruebas locales en el momento previo a la instalación de tramos en cruces especiales y zonas de especial cuidado. Posteriormente se deben realizar pruebas generalizadas de la línea, que hagan parte del tramo correspondiente, una vez terminada su instalación. En la **Tabla 2-110** se enumera el procedimiento comúnmente utilizado para la ejecución de la prueba hidrostática.

**Tabla 2-110 Procedimiento para la realización de prueba hidrostática**

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
Requisitos Previos	Antes de iniciar la operación de prueba se instalarán todos los accesorios y conexiones permanentes a lo largo del tramo de línea que va a probarse.
Limpieza interior y calibración de la tubería	Para la limpieza se instalará un múltiple receptor de raspadores en el extremo del tramo opuesto al punto de inyección y un múltiple de envío en el extremo del tramo para la inyección del agua, desde el cual se envía un raspador de limpieza a través de la tubería, empujado por agua o aire comprimido.
Llenado y Purga de aire	Se contará durante esta labor con un medidor en el lado de la succión de la bomba de llenado con el fin de determinar el tiempo aproximado requerido para llenar cada sección de prueba y un proporcionador con su bomba de descarga, con el fin de injectar el inhibidor de corrosión en el agua de prueba. En el caso que el agua de prueba vaya a permanecer un tiempo significativo dentro de la tubería, debe emplearse además un secuestrante de oxígeno.
PreNororienteización	Cuando la sección de prueba está lista, se conecta la bomba de presión a la instalación, bombeando hasta alcanzar presiones sucesivas con el propósito de probar que no existen fugas mayores. Se continúa comprimiendo hasta alcanzar el 70% de la presión

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
	<p>de prueba, la que se debe mantener hasta que se estabilicen presiones y temperaturas. Posteriormente se realizan incrementos pequeños hasta alcanzar la presión de prueba. Una vez la presión de prueba haya sido alcanzada, se detiene y desconecta la bomba. Se debe mantener la presión de prueba durante un período mínimo de 4 horas.</p> <p>La prueba es satisfactoria si no sobreviene una caída de presión durante el período de prueba y si los cambios de presión que se lleguen a presentar pueden ser correlacionados satisfactoriamente con las variaciones de temperatura.</p>
Desplazamiento de agua y empates	<p>Una vez que el agua haya sido retirada y la tubería esté satisfactoriamente drenada, se da inicio a las operaciones de empate o conexión de las secciones de prueba, las cuales deben someterse a prueba radiográfica para su aceptación. Los múltiples para envío y recibo de raspadores deben retirarse y prepararse para las pruebas de la sección siguiente, dependiendo de la longitud de la línea.</p> <p>El agua será desplazada al siguiente tramo para ser utilizada en la prueba y de esta manera reducir la captación y transporte.</p> <p>Una vez finalizada las pruebas se procederá a reducir la presión y a desocupar la tubería empleando carro tanques para realizar los respectivos análisis fisicoquímicos y tratamientos necesarios para su posterior vertimiento.</p>

➤ **Empalme de tramos**

Las lingadas dejadas inicialmente para efectos de manejo de la tubería se empalmarán una vez bajada la tubería; igual labor se realizará en los sitios de obras especiales. Para la realización de esta actividad se creará un frente de empalmes especiales, el cual contará con los recursos de personal y equipos apropiados.

➤ **Plan de mantenimiento y reposición de tubería**

Éstas líneas ingresarán al programa de mantenimiento del campo una vez entre en funcionamiento, programa que consiste básicamente en incluir la respectiva línea dentro de la inspección que se realiza con la periodicidad requerida por el campo, con el fin de detectar fallas y realizar las respectivas medidas de tipo preventivo y correctivo.

2.3.3.9 Infraestructura existente

Para acceder a la zona donde se encuentra la línea de vertimiento y la descarga al Río Guayuriba, se toma la vía Acacias – vereda Dinamarca, la cual conecta el tramo 2 y 3 de la línea de vertimiento en la abscisa K12+770, esta se encuentra pavimentada y tiene un ancho de 6 m. La distancia desde el municipio de Acacias hasta el derecho de vía de la línea de vertimiento es de 26 Km. Para llegar a los dos últimos tramos de la línea de vertimiento correspondientes a los tramos 3 y 4 en la abscisa K17+250, se toma la vía Acacias – vereda las lomas. Esta es una vía sin pavimentar y tiene un ancho de 6 m. La distancia desde el municipio de Acacias hasta el derecho de vía de la línea es aproximadamente de 28 Km. La descripción de estas vías y su respectivo inventario se encuentra consignado en el Capítulo 2, parte 2 del presente documento.

El acceso a los frentes de obra a través de las vías secundarias, requieren una adecuación mínima, ya que ellas han sido utilizadas en la construcción de la línea existente y considerando que en la actualidad son de uso de la comunidad.

Es importante señalar que dentro de los términos contractuales exigidos al contratista de construcción, se establecerá el requerimiento de presentar para aprobación de Ecopetrol S.A. el Plan de Uso de Vías, en el que, como es práctica común en este tipo de proyectos, se efectuará un procedimiento de registro gráfico y evaluación del estado inicial de las mismas, elaborado

conjuntamente con las autoridades municipales, las personerías municipales, las comunidades, los contratistas y la interventoría del proyecto, con el fin de asegurar que al final de las actividades constructivas las vías sean entregadas en iguales o mejores condiciones que a las encontradas antes de iniciar los trabajos.

El sistema actual de vertimiento de agua de producción al Río Guayuriba, consta de una estación de bombeo, una línea de conducción de 36" y la descarga que reúne dos alternativas. La primera es un sistema de emergencia, línea directa al río y la segunda consiste en una flauta de distribución, instalada por el lecho del río.

A lo largo del corredor que se empleará para la construcción de la nueva línea, también discurre el oleoducto que conecta la estación de bombeo ubicada en la Estación Castilla 2, hacia la planta de Apiay. Este despacho se realiza a través de una línea de 16" de diámetro.

Así mismo, existe a lo largo del corredor proyectado una línea de transmisión eléctrica, apoyada en torres, correspondiente a una capacidad de 115 Kv y la cual integra las estaciones Apiay y Castilla.

#### 2.3.4 Uso, aprovechamiento y afectación de recursos naturales.

➤ **Aprovechamiento forestal**

Dado que las áreas por las cuales discurre la nueva línea de vertimiento en general corresponden a zonas ya intervenidas, no se prevé mayores requerimientos en este sentido. Sin embargo en los puntos donde este aprovechamiento sea requerido, se deberá adelantar el respectivo inventario forestal al 100%, con el cual se deberán solicitar los respectivos permisos de aprovechamiento conforme a la normatividad legal ambiental vigente.

➤ **Requerimientos de agua**

El agua será uno de los principales elementos demandados por la ejecución de la obras. El agua requerida para el consumo humano, será comprada en los centros urbanos cercanos al proyecto para lo cual se adquirirán botellones u otra presentación que se estime conveniente.

La ejecución de la prueba hidrostática requerirá el empleo de un volumen de agua importante. En la **Tabla 2-111** se presenta el volumen requerido para la prueba hidrostática de tramos de 500 metros tanto en la nueva línea de vertimiento como en las de transferencia entre estaciones, la captación de agua para esta actividad se realizará en los puntos autorizados por la autoridad ambiental teniendo en cuenta los volúmenes autorizados:

**Tabla 2-111 Volumen de agua requerida para prueba hidrostática**

DIÁMETRO DE LA TUBERÍA (Plg)	LONGITUD (m)	VOLUMEN REQUERIDO (m <sup>3</sup> )
36	500	329
42	500	447

➤ **Materiales de construcción**

Estos materiales serán adquiridos, a través de terceros que cuenten con los permisos ambientales y de explotación minera vigentes.

➤ **Volúmenes de vertimiento de agua y alternativas de sitios de vertimiento**

El proyecto contempla el vertimiento de las aguas de la prueba de presión, por lo que se estima que el volumen a verter es equivalente al volumen captado. El sitio para la disposición serán los

sistemas de tratamiento de aguas de producción (STAP) existentes en el campo o los puntos aprobados por la Autoridad Ambiental.

### 2.3.5 Generación, manejo y disposición de residuos

#### ➤ Residuos sólidos

Los residuos generados durante la construcción de la línea de Vertimiento, serán esencialmente industriales, dado que no se construirán campamentos temporales para alojar personal de la obra de construcción de líneas. Sin embargo los residuos domésticos que se puedan generar en los frentes de trabajo, serán manejados conforme a las medidas establecidas dentro del **Capítulo 6** del presente documento.

Durante las operaciones en los frentes de trabajo en campo, todos los residuos serán recolectados y clasificados en las áreas de trabajo para su posterior transporte a los lugares de disposición final.

En la **Tabla 2-112** se numera las tecnologías para el aprovechamiento o disposición de los residuos sólidos:

**Tabla 2-112 Disposición de residuos sólidos durante la construcción de líneas de flujo**

SITIO DE GENERACIÓN	DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN
Frentes de Trabajo, Talleres y sitios de acopio de tubería	Retales metálicos Colillas de soldadura Repuestos usados limpios	Reutilización Reciclaje
	Retales Metálicos Repuestos usados impregnados	Descontaminación y reutilización Descontaminación y reciclaje Entrega a terceros autorizados
	Madera limpia	Reutilización Reciclaje
	Madera impregnada	Descontaminación y reutilización Descontaminación y reciclaje
	Cartón, papel, estopas impregnados de aceite	Entrega a tercero autorizado
	Envases de plástico, metálicos, vidrio impregnados	Descontaminación y reutilización Descontaminación y reciclaje Descontaminación y disposición final
	Material Radiográfico	Encapsulamiento Neutralización y filtrado

Fuente: Ecopetrol S.A. 2011

Los residuos como baterías, llantas, etc., serán devueltos a los proveedores dentro de los planes de logística inversa.

#### ➤ Residuos líquidos

Al igual que los residuos sólidos, los residuos líquidos domésticos que se generan tienen su origen en los frentes de trabajo de la línea. En estos frentes de trabajo se hará manejo apropiado de los residuos líquidos domésticos mediante la utilización de unidades de cabinas sanitarias portátiles.

Las unidades sanitarias portátiles deben ser suministradas por una compañía que cuente con los permisos respectivos y que además ofrezca el servicio de limpieza y disposición final de los lodos generados en sitios debidamente autorizados. La empresa que suministre el servicio deberá realizar periódicamente acciones de mantenimiento de los baños para asegurar su adecuado funcionamiento.

➤ **Aguas aceitosas**

Para el mantenimiento de la maquinaria se deberá establecer un sector fijo, la cual se impermeabilizará, mediante la instalación de material sintético impermeable para evitar la infiltración de aguas aceitosas; deberá contar además con un sistema de drenajes conectado a un separador de grasas y aceites. Cuando se lleve a cabo mantenimiento de equipos por fuera de estas áreas deberán colectarse todos los desechos sólidos y líquidos y disponerse en los sitios de recolección aprobados por la Interventoría Ambiental. Los cambios de aceite de vehículos y maquinaria liviana deben realizarse en lo posible en talleres.

### 2.3.6 Estimativos de maquinaria equipos y mano de obra

➤ **Equipos y maquinaria**

De acuerdo a las actividades que se desarrollen en los diferentes frentes de obra, se requerirá de cierto tipo de equipos, maquinaria y vehículos para el transporte de las herramientas especiales y tubería, los cuales se relacionan en la **Tabla 2-113**, teniendo en cuenta que el tendido de la línea de flujo que se proyecta tiene un diámetro de 42”.

**Tabla 2-113 Maquinaria y equipo por frente de obra en construcción de líneas de flujo**

FRENTE DE OBRA	MAQUINARIA Y EQUIPOS
Derecho de vía	Vehículo Motoniveladoras y bulldozers Sierra de Potencia Volquetas
Zanjado (Aplica para líneas de flujo enterradas)	Retro cargadores con balde tipo zanja Volquetas Compresores Martillo Neumático
Tendido	Grúas con winche Tractores de Remolque para tubería Camionetas Grúas laterales
Doblado	Dobladora Jalón
Cuadrilla de Soldadura	Soldadores Tractor con remolque
Cuadrilla de Recubrimiento	Tractor Grúas laterales Maquinaria de limpieza y Pintura Revestidora Caldera de Brea Soporte y “Stringbacks” Holiday
Bajado (Aplica para líneas de flujo enterradas)	Grúas laterales Retrocargador con balde tipo zanja Motobomba de agua
Empalme	Grúas laterales Soldadores Retrocargador con balde tipo zanja Caldera de Brea Motobomba de Agua
Tapado y Limpieza Final (Aplica para líneas de flujo enterradas)	Mini cargador (Bobcat , Case, etc) Moto niveladoras Montacargas Tractor de finca Cable de arrastre Volquetas Equipo de Compactación

Fuente: Ecopetrol S.A. 2011

➤ **Mano de obra requerida**

El método constructivo que será utilizado en las líneas de flujo se hará con un frente en bloque de línea regular y un frente de obras especializadas llamadas cuadrillas.

El bloque de línea regular se encarga de ir desarrollando cada una de las actividades ordinarias de construcción, desde el derecho de vía hasta el tapado, dejando los tubos instalados y listos. Sin embargo, de los trabajos realizados por el bloque de frente de línea regular quedan algunas discontinuidades en los sitios que por sus características especiales no permiten un desarrollo continuo de las obras, como son: los cruces de corrientes y accidentes topográficos, entre otros. Es entonces cuando los frentes de obras especiales van cerrando estos sitios.

En la **Tabla 2-114** se presenta el personal requerido en cada frente de trabajo durante la construcción de líneas de flujo.

**Tabla 2-114 Personal requerido por cada frente de obra en la construcción de líneas de flujo**

FRENTE DE OBRA	PERSONAL
Zanjado	1 Capataz 3 Operadores 3 Conductores 4 Obreros
Tendido	1 Capataz 2 Operarios de la grúa 3 Conductores
Cuadrilla de Doblado y Soldadura	1 Capataz 1 Supervisor de soldadura 3 Soldadores 6 Ayudantes 1 Operarios de tractor 1 Conductores
Cuadrilla de Recubrimiento	1 Capataz 4 Obreros
Bajado	1 Capataz 3 Operadores 1 Mecánicos 3 Obreros
Tapado y Limpieza Final	1 Capataz 1 Supervisor 3 Operario de excavadora 2 Operario de bulldócer 1 Operario de monta carga 2 Ayudantes, 4 Obreros

*Fuente Ecopetrol S.A. 2011*

### 2.3.7 Infraestructura social o económica a intervenir

En lo referente al aspecto socioeconómico, el desarrollo de la línea de vertimiento, genera una inferencia directa sobre ocho veredas del Municipio de Acacias y una del municipio de Villavicencio, estas Veredas son: Caño Hondo, Primavera, El Triunfo, Quebraditas, Palomas, La Loma, Patio Bonito y La Unión y Vegas del Guayuriba, respectivamente. Esta última vereda se incluye dentro del AID debido que se encuentra localizada sobre la margen opuesta del Río Guayuriba, en relación con el punto escogido para el vertimiento.

Sin embargo, a lo largo del trazado proyectado para la nueva línea, no se ha identificado infraestructura social o económica que pueda requerir intervención.

### 2.3.8 Etapas y cronograma estimado de ejecución.

Dentro de las diferentes etapas contempladas para la ejecución del proyecto, se tienen las actividades expuestas en la **Tabla 2-115**.

**Tabla 2-115 Etapas y actividades para la construcción de la nueva línea de vertimiento**

ETAPAS	ACTIVIDADES
Pre-operativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estudios y diseños de la línea de vertimiento</li> <li>✓ Negociación y adquisición de derechos de servidumbre por parte del grupo de Gestión Inmobiliaria</li> <li>✓ Elaboración del Plan de Manejo Ambiental</li> <li>✓ Obtención de los permisos requeridos (captación, ocupaciones de cauces y aprovechamiento forestal)</li> <li>✓ Socialización del proyecto.</li> </ul>
Construcción	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Movilización de personal, maquinaria y equipos</li> <li>✓ Selección de mano de obra para trabajar en el proyecto</li> <li>✓ Señalización temporal</li> <li>✓ Adecuación campamentos.</li> <li>✓ Apertura y conformación del derecho de vía de la línea de vertimiento</li> <li>✓ Geotécnica preliminar</li> <li>✓ Transporte, acopio y tendido de tubería</li> <li>✓ Doblado, alineación y soldadura</li> <li>✓ Revestimiento de la tubería, las juntas y protección de la tubería</li> <li>✓ Zanjado, bajado y tapado de la tubería.</li> <li>✓ Reconformación del terreno, limpieza final y obras de protección geotécnica.</li> <li>✓ Cruces especiales de cuerpos de agua y vías</li> <li>✓ Prueba hidrostática</li> <li>✓ Instalación de protección catódica</li> <li>✓ Obras de conexión a la estación de despacho</li> </ul>
Operación y Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Llenado de la línea y puesta en operación.</li> <li>✓ Mantenimiento del derecho de vía y obras geotécnicas</li> <li>✓ Recorridos para establecer puntos críticos o inestables que pudieran poner en riesgo la tubería</li> </ul>
Restauración del área intervenida	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Restauración mediante labores de revegetalización de áreas intervenidas.</li> <li>✓ Seguimiento y monitoreo a la gestión social y a los recursos naturales.</li> </ul>

Fuente: Ecopetrol 2011

El cronograma estimado para la ejecución de las obras de construcción de la nueva línea de vertimiento se consigna en la **Tabla 2-116**.

**Tabla 2-116 Cronograma de ejecución estimado**

ACTIVIDADES	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	MES 8
Movilización								
Campamento								
Localización y replanteo								
Construcción y montaje de la línea.								
Montaje de bombas								
Montaje de válvulas								

### 2.3.9 Desmantelamiento y restauración de las áreas intervenidas

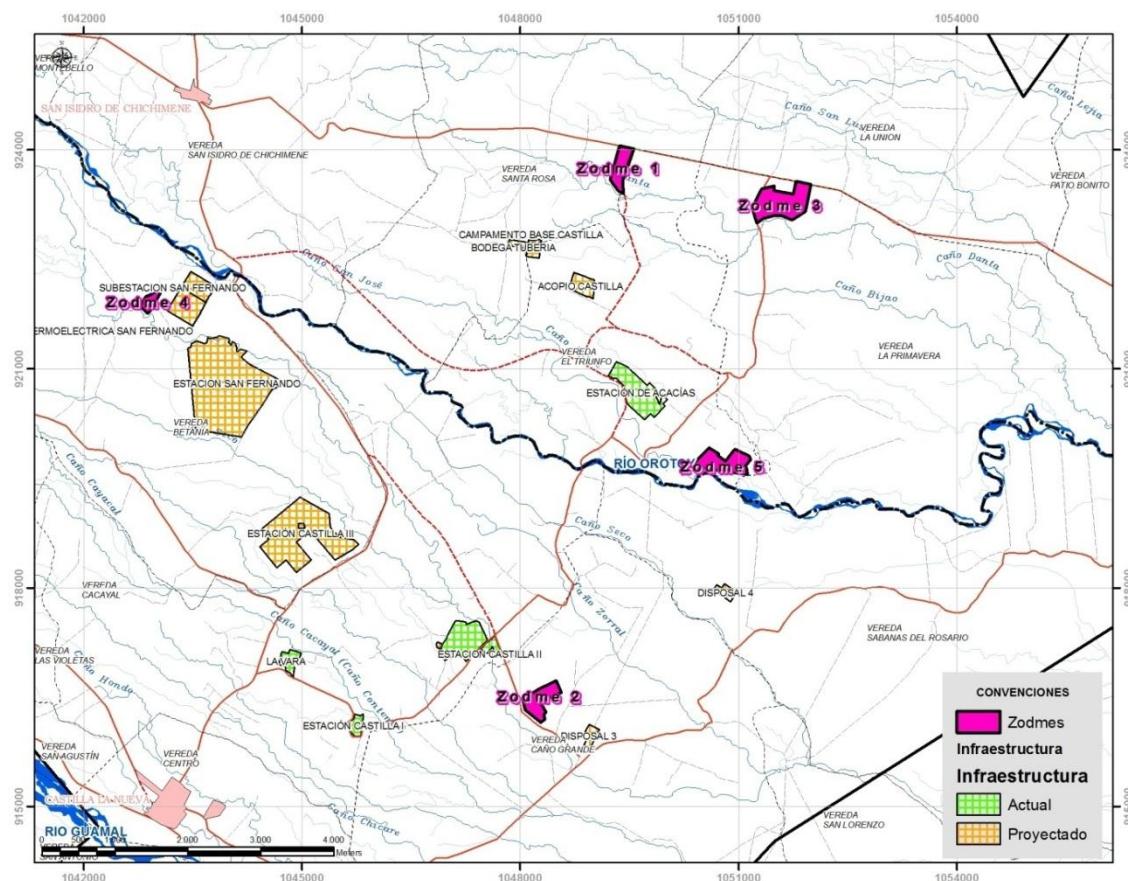
Las medidas establecidas para el abandono y restauración de las áreas intervenidas con la ejecución del proyecto, se tratan de manera amplia, dentro del **capítulo 8** del presente documento.

## **2.4 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS – CONSTRUCCIÓN Y ADECUACIÓN DE ZODMES**

## 2.4.1 Localización

Debido a la construcción de nueva infraestructura con sus respectivas vías de acceso y líneas de flujo, se deben realizar movimientos de tierra compensados para evitar la intervención de áreas de manera innecesaria.

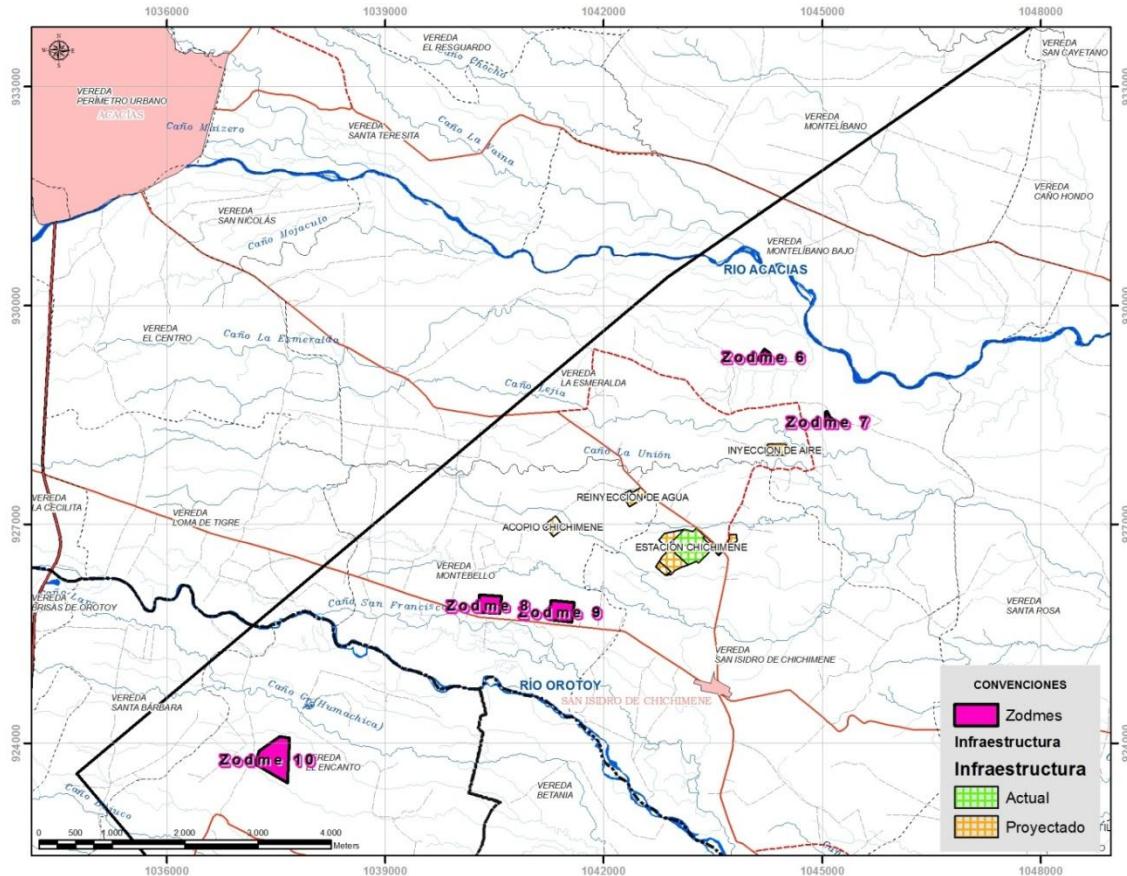
Sin embargo, durante la etapa de construcción, será necesario contar con ZODME's debido a que no siempre se logra hacer la compensación de los volúmenes de corte, especialmente en los sectores donde la topografía es ondulada.



**Figura 2-100 Localización de Zodmes para el Campo Castilla.**

Se han definido cinco (5) ZODMES para el campo Castilla (Ver **Figura 2-100**).

Para el Campo Chichimene han sido seleccionadas cinco (5) zodmes (Ver **Figura 2-101**). En todos los casos las áreas escogidas, cumplen con los criterios ambientales que tanto la actividad como la normativa vigente exigen.



**Figura 2-101 Localización de Zodmes para el Campo Chichimene.**

Los principales criterios que se tuvieron en cuenta para la definición de estas áreas son:

- ✓ Zonas planas o de baja pendiente localizadas en las proximidades de las vías de comunicación.
- ✓ Áreas preferiblemente desprovistas de vegetación arbórea o arbustiva.
- ✓ Sectores con condiciones geotécnicas adecuadas referentes a zonas estables que no registren fenómenos de remoción en masa.
- ✓ El sitio seleccionado deberá localizarse a una distancia no menor de 30metros de cuerpos de agua, y a más de 100 metros de puntos de aguas subterráneas.

En la **Tabla 2-117** se presentan las zonas escogidas para disposición de sobrantes de excavación (Zodmes's).

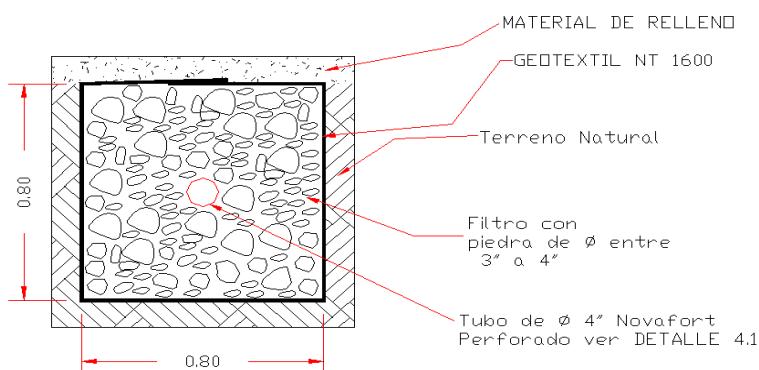
**Tabla 2-117 Zonas seleccionadas para ZODME's**

No.	AREAS (M2)	VOL A H=2M (M3)	COORD. CENTROIDE (MAGNA SIRGAS O. BOGOTÁ)		OBSERVACIONES
			ESTE	NORTE	
<b>Campo Castilla</b>					
1	102.238	204.476	1.049.380	923.768	La cobertura vegetal corresponde a pastos limpios con una topografía plana.
2	127.731	255.462	1.048.275	916.455	Área con cobertura de pastos limpios y topografía predominantemente plana.

No.	AREAS (M <sup>2</sup> )	VOL A H=2M (M <sup>3</sup> )	COORD. CENTROIDE (MAGNA SIRGAS O. BOGOTÁ)		OBSERVACIONES
			ESTE	NORTE	
3	150.982	301.964	1.051.450	923.222	Posee una topografía levemente ondulada con una cobertura de pastos.
4	42.428	84.855	1.042.921	921.934	De topografía predominantemente plana y cubierta de pastos limpios.
5	167.686	335.372	1.050.793	919.722	Cuenta con una topografía plana y cobertura de pastos limpios.
<b>Campo Chichimene</b>					
6	16.953	33.907	1.044.211	929.310	Cobertura de pastos limpios y topografía de planicie.
7	18.018	36.036	1.045.095	928.427	Cobertura de pastos limpios y topografía llana.
8	71.547	143.094	1.040.432	925.905	Predio con topografía predominantemente plana y cobertura de pastos
9	85.061	170.122	1.041.419	925.809	Predio con cobertura de pastos sembrados y morfológicamente plano.
10	187.588	375.177	1.037.496	923.791	Cobertura de pastos limpios y topografía llana.

Una vez seleccionado el predio para la disposición de estos materiales, se tendrán en cuenta entre otras las siguientes consideraciones constructivas:

- ✓ Remover la capa vegetal y conformar un acopio temporal.
- ✓ Implementar un sistema de drenaje para el manejo de aguas subsuperficiales y producto de infiltración tal como se muestra en la **Figura 2-102**.
- ✓ Disponer los materiales estériles conformando taludes 3H:1V y de requerirse bermas no menores de 3 metros.
- ✓ Implementar las obras para el manejo de aguas de escorrentía por medio de cunetas, estructuras de caída y canales en caso de requerirse. Estas estructuras deben contar con disipadores de energía en los puntos de entrega con el fin de prevenir fenómenos erosivos.
- ✓ La disposición de los materiales se hace en forma de terraplén, cuya energía de compactación es la producida por la maquinaria que los dispone (retroexcavadoras y/o bulldozer).
- ✓ En la etapa de clausura se debe cubrir la superficie del ZODME con una capa orgánica producto del descapote y realizar la siembra de especies nativas.



**Figura 2-102 Sección típica para filtro en la base del ZODME**

En la **Tabla 2-118**, se relaciona la capacidad portante del suelo de acuerdo con la consistencia del mismo, los cuales sirven para establecer una resistencia tentativa de los suelos. Estos valores solo se podrán obtener mediante pruebas In Situ de penetración o mediante ensayos de laboratorio detallados.

**Tabla 2-118 Relación de consistencia de los suelos cohesivos y resistencia a la compresión.**

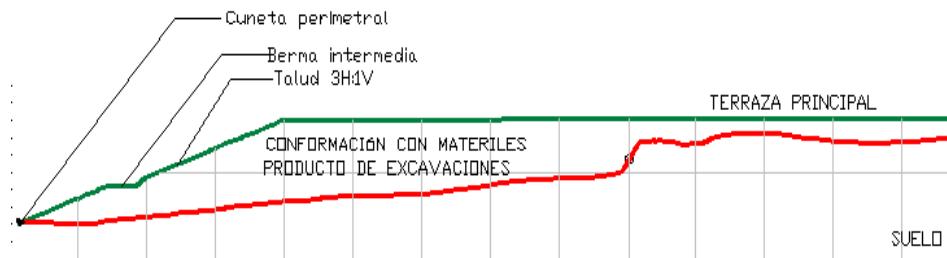
CONSISTENCIA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (Ton/m <sup>2</sup> )
Muy Blanda	menor a 0.25	menor 2.5
Blanda	0.25 – 0.50	2,5 – 5.0
Media	0.50 – 1.00	05 – 10
Firme	1.00 – 2.00	10 -20
Muy firme	2.00 – 4.00	20 -40
Dura	mayor a 4.0	Mayor a 40

Fuente: *Mecánica de suelos – J.J. Zans Llano*

#### 2.4.1 Diseño tipo del ZODME

El ZODME debe ser debidamente conformado empleando Bulldozer o Retroexcavadoras que compacten el material por capas, en un espesor no mayor de 20cm. Para ello, se emplea un rodillo vibratorio, con el propósito de lograr una estructura densa evitando movimientos en masa del material.

En la **Figura 2-103** se presenta el aspecto que se espera obtener al conformar los Zodmes para las áreas seleccionadas.



**Figura 2-103 Diseño tipo paraconformación de un ZODME en áreas con pendiente moderada.**

#### 2.4.2 Actividades de cierre y clausura paraZodmes

La adecuación y revegetalización del ZODME, comprende las siguientes acciones:

- ✓ La estabilización y manejo de taludes se realizará, de acuerdo con las acciones y medidas propuestas en la ficha de manejo de taludes.
- ✓ Para la restauración se extenderá una capa de suelo orgánico (proveniente del descapote), asegurándose causar mínima compactación. Para proporcionar un buen contacto entre las capas de material se sugiere escarificar la superficie de cada capa (5-15cm. de profundidad) antes de cubrirla. Esto mejora la infiltración y el movimiento del agua, evita el deslizamiento de la tierra extendida y facilita la penetración de las raíces.

- ✓ El área se empradizará con especies herbáceas y rastreras que pertenezcan a las gramíneas y leguminosas. El establecimiento de pastos y cobertura herbácea busca disminuir la energía de las aguas de escorrentía, retener el suelo por medio del sistema radicular y mejorar sus propiedades de infiltración.
- ✓ La revegetalización del área debe considerar las acciones presentadas en la respectiva ficha para la actividad presentada en el **Capítulo 7** del presente documento.

#### 2.4.3 Balance de masas

Los volúmenes de materiales que se proyecta disponer como producto de la ejecución de las obras civiles involucradas en las actividades de desarrollo del bloque Cubarral, se presentan en la **Tabla 2-119**.

**Tabla 2-119 Volúmenes estimados de materiales inertes sobrantes**

PROYECTO	VOLUMEN REQUERIDO (M3)
Estación Castilla 3	320.000
Termoeléctrica San Fernando	18.000
Oficinas Campo Castilla	5.000
Centros de Acopio	20.000
Campamentos Generales	8.000
centros de maniobra, transferencia y distribución de energía eléctrica	3000
<b>Total Estimado</b>	<b>374.000</b>

Para los Zodmes propuestos en el presente documento se ha estimado una capacidad total de 1.101.171 Metros cúbicos; lo cual permite ver que los campos Castilla y Chichimene, cuentan con una oferta mucho mayor a la demanda generada, en cuanto a lo que respecta a los ZODMES.

#### 2.4.4 Consideraciones adicionales

Además de lo establecido en la respectiva ficha de manejo para la disposición de materiales sobrantes de excavación, se deberá tener en cuenta las siguientes consideraciones.

- ✓ No se colocarán materiales en los lechos de ríos o quebradas, ni en las franjas definidas por la legislación vigente, evitando la contaminación de las corrientes por efecto de las ZODME. Las aguas infiltradas o provenientes de los drenajes deberán ser conducidas a un sedimentador antes de su entrega al medio receptor.
- ✓ No se colocarán materiales en sitios donde la capacidad de soporte de los suelos no permita su disposición segura, ni en lugares donde puedan perjudicar las condiciones ambientales o donde la población quede expuesta a algún tipo de riesgo.
- ✓ Evitar sitios en donde se puedan generar asentamientos del terreno que pongan en peligro la estabilidad de las ZODME.
- ✓ No generar contaminación sobre las aguas superficiales o subterráneas.
- ✓ Evitar los sitios que representen amenazas para los recursos naturales y/o la población por ocurrencia de sismos, contaminación atmosférica o generación de ruido.
- ✓ Respetar las zonas de exclusión establecidas para el proyecto.
- ✓ Evitar la construcción sobre corrientes de agua y la desviación de las mismas mediante la excavación de zanjas o acequias.
- ✓ Terminada la colocación del material, se construirán canales interceptores en la corona del depósito y a lo largo del mismo. Los descoles de estos drenajes se deberán llevar hasta los canales naturales o niveles base.

- ✓ Una vez terminada la disposición de desechos, las ZODME deberán clausurarse; procediendo a su revegetalización y obras finales de estabilización. Estas últimas incluyen la construcción del sistema de cunetas evacuantes de las aguas lluvias que caerán sobre la superficie del depósito. Con este sistema se busca evitar la infiltración del agua superficial, mediante su evacuación rápida y eficiente.

## 2.5 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS –CENTROS PARA EL ACOPIO Y MANEJO DE LODOS Y CORTES DE PERFORACIÓN.

### 2.5.1 Aspectos generales y localización.

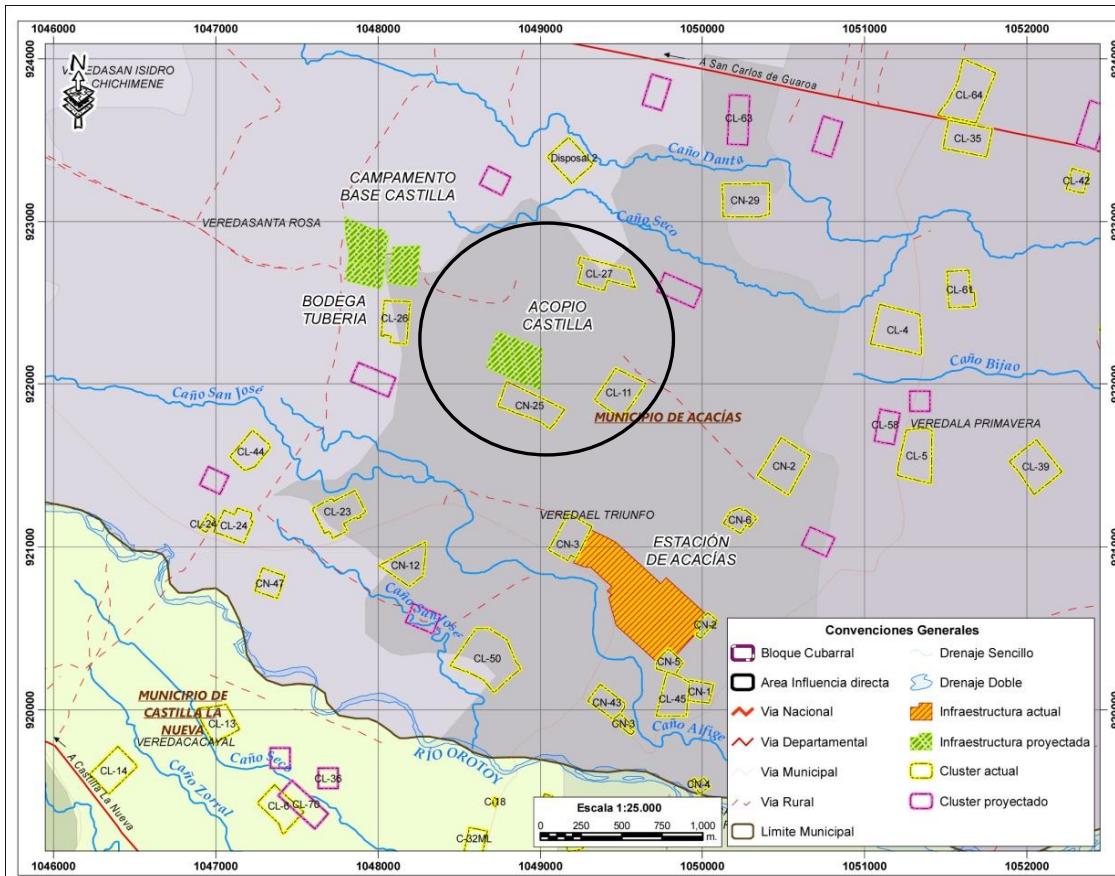
#### 2.5.1.1 Localización centro de acopio campo Castilla

La zona para disposición de cortes de perforación del Campo Castilla se encuentra ubicada entre las veredas Santa Rosa y el Triunfo al noroeste de la estación Acacias entre los clúster 25 y 26. Las coordenadas del polígono se muestran en la **Tabla 2-120** y en la **Figura 2-104** las vías de acceso al mismo comprende un área de 80.358,82 m<sup>2</sup> y su ubicación geográfica se presenta en la **Figura 2-104** y en el **Anexo12 -1 Cartográfico Mapa 1. Localización General del Proyecto**.

**Tabla 2-120 Coordenadas del predio seleccionado**

DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ	
ESTE	NORTE
1048998,01	921959,20
1048942,24	921988,70
1048938,04	921990,54
1048933,62	921991,74
1048929,06	921992,27
1048924,48	921992,12
1048907,48	921990,32
1048665,63	922101,59
1048731,67	922316,52
1048739,30	922320,17
1048897,00	922262,84
1048937,60	922248,27
1049012,82	922220,81
1049008,27	922059,02
1049004,34	921976,92
1048998,01	921959,20

Fuente: Ecopetrol S.A.2011



**Figura 2-104 Localización Centro de acopio de cortes del Campo Castilla.**

#### 2.5.1.2 Localización centro de acopio campo Chichimene

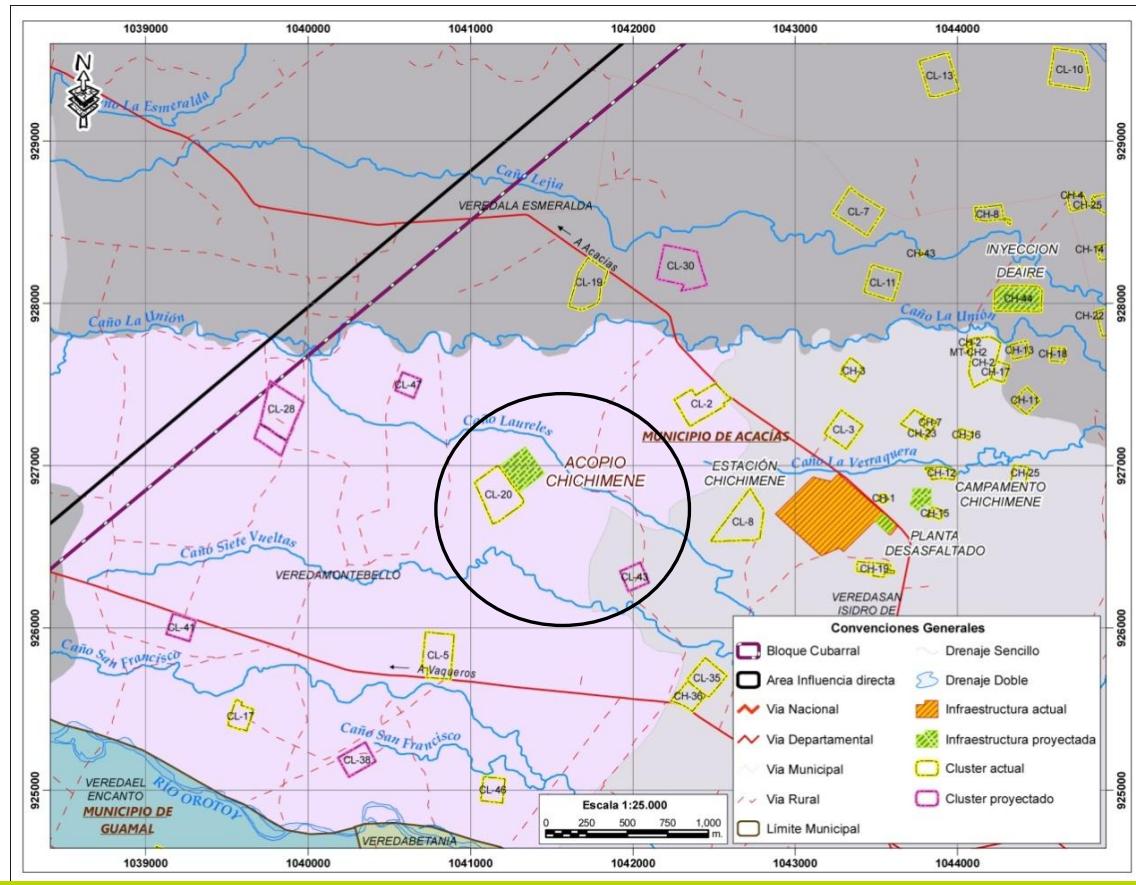
La zona para disposición de cortes de perforación del Campo Chichimene se encuentra ubicada en la vereda Monte Bello del Municipio de Acacias contiguo al clúster 20. (Ver Anexo 2.5 y 2.6)

Las coordenadas del polígono se muestran en la **Tabla 2-121** y en la **Figura 2-105** las vías de acceso al mismo. Comprende un área de 39616,81 m<sup>2</sup>, y su ubicación geográfica se presenta en la **Figura 2-105** y en el **Anexo 12 Cartográfico Mapa 1. Localización General del Proyecto**.

**Tabla 2-121 Coordenadas del predio seleccionado**

DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ	
ESTE	NORTE
1041182,4	926997,2
1041338,5	927114,0
1041458,1	926949,0
1041303,4	926832,7
1041182,4	926997,2

Fuente: Ecopetrol S.A.2011



**Figura 2-105 Localización centro de acopio de cortes del Campo Chichimene.**

### 2.5.2 Vías e infraestructura existente

Para acceder al Área de Influencia del Centro de Acopio para cortes de perforación del Campo Castilla, partiendo de la Cabecera urbana del Municipio de Acacias, se toma la ruta nacional 65 hacia el casco urbano del Municipio de Guamal y de allí hacia el centro urbano Castilla la Nueva. Posteriormente en dirección Noreste hacia la Estación Acacias, llegando finalmente al sitio del proyecto en predios cercanos al clúster 25.

Una ruta alterna de acceso partiendo igualmente de la cabecera urbana del Municipio de Acacias, sigue hacia la población de San Isidro de Chichimene para continuar hacia la estación Acacias llegando al predio seleccionado para el desarrollo del proyecto.

En relación con el Centro de acopio Chichimene, se toma la vía que desde el centro urbano del Municipio de Acacias conduce hacia el poblado de San Isidro de Chichimene y a la altura del KM8+900 se toma el desvío a mano derecha por la vía de acceso al Clúster 20 del campo Chichimene.

Estas vías se encuentran pavimentadas, cuentan con suficiente señalización y demarcación e igualmente su descripción e inventario de infraestructura se encuentra consignada en el Capítulo 2, Parte 2 del presente documento.

## 2.5.3 Características del proyecto

### 2.5.3.1 Objetivos

Este proyecto en particular, busca optimizar las operaciones de manejo y tratamiento de residuos sólidos y líquidos de perforación (cortes y fluidos), eliminando y/o disminuyendo la construcción y uso tradicional de piscinas para tratamiento en las localizaciones de los pozos, así como el número de requeridos con este fin.

De igual manera se pretende reducir los impactos ambientales asociados a la intervención de las áreas por la ejecución de las obras civiles, de recursos naturales para el tratamiento de residuos y riesgos de afectación al suelo por estos sitios de tratamiento que requieren de un control permanente.

### 2.5.3.2 Características técnicas

La configuración y características técnicas de los centros de acopio de castilla y centro de acopio Chichimene son las mismas. Por lo que la descripción que se hace a continuación, hace referencia a los dos.

El proyecto requiere de la disposición de un área de seis hectáreas distribuidas de la siguiente forma:

Una hectárea será utilizada para los equipos operacionales del centro de acopio como son centrifugas, unidad de dewatering, shales haker (zarandas), piscinas para tratamiento (Ver **Tabla 2-123**), laboratorio de química, bodega de química, frac tanks y tanques de tratamiento. Los equipos a operar en el centro de acopio se describen a continuación **Tabla 2-122**.

**Tabla 2-122 Equipo a operar en el centro de acopio**

CADA POZO	CANTIDAD	CENTRO DE ACOPIO	CANTIDAD	CENTRO DE ACOPIO	CANTIDAD
Hidrolavadora	1	Laboratorio	1	Bomba de desplazamiento +	2
compresor	1	Hidrolavadora	1	Centrifuga vertical	1
Flowmeter	3	Generador con tanque de combustible	1	Unidad de dewatering	1
Bombas neumáticas	2	compresor	1	Electrobomba 4*3	3
Centrífugas	2	Flowmeter	1	Frac Tank 500 bbls	4
Tanque 20 bbls	1	Bombas neumáticas M 15	2	Tanque de agua de 500bbls	2
Bomba de desplazamiento +	2	Bombas neumáticas M 8	2	Volqueta	1
Tanque de agua de 500bbls	2	Batería de baños	1	Retroexcavadora de aruga	1
Electrobomba 4*3	2	Planta de tratamiento	1	Tanque de lodo de 500bbls	3
Bomba sumergible	2	Zaranda	1	Tanque de mezcla de 300bbls	2
Frac Tank 500 bbls	2	Centrífugas	2	Embudos de mezcla químicos	2
Catch tank 250 bbls	2				
Pajarita	1		1	Bombas centrífugas	2
Volqueta	1				

Fuente Ecopetrol S.A. 2010

**Tabla 2-123 Dimensiones de piscinas**

TIPO DE PISCINA	CAPACIDAD BBLS
Piscina de recibo de cortes. Recubierta con geomembrana y terminada en concreto.	4500
Piscina de mezcla de cortes. Recubierta con geomembrana y terminada en concreto.	1500
Piscina para recibo de agua. Recubierta en geomembrana.	2500

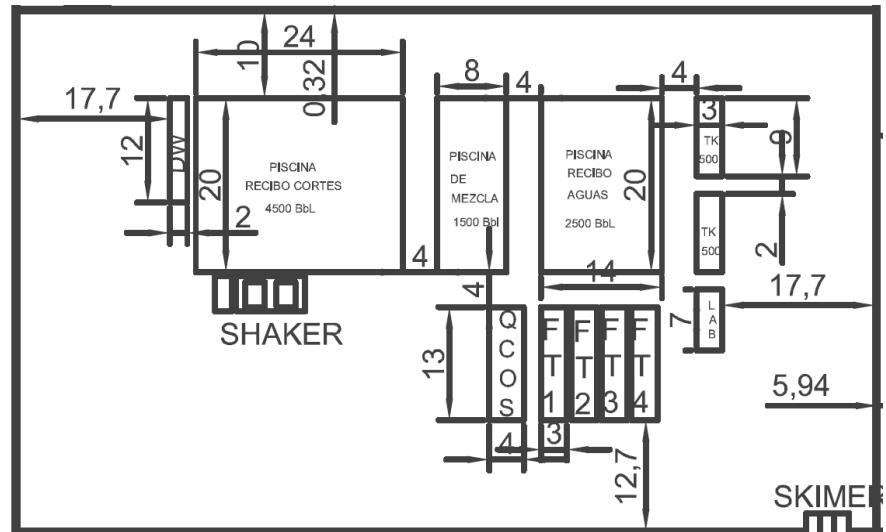
*Fuente Ecopetrol S.A. 2010*

En cuatro hectáreas se construirán alrededor de 100 celdas de secado de cortes con unas dimensiones de 5m x 5m x 3m (Ver **Figura 2-106**). En cada hectárea se requiere adelantar la construcción decanales perimetrales con estructuras de control (skimmer).

Se ha proyectado que estas celdas logren almacenar 23,000 bbls de cortes tratados, dado lo cual se estima una capacidad total de 114,500 bbls en las cinco hectáreas.

#### 2.5.3.3 Diseños tipo de infraestructura a construir y adecuar

En la **Figura 2-106** se presenta la disposición de equipos.


**Figura 2-106 Distribución de equipos, tanques, piscinas y laboratorio.**
*Fuente: Ecopetrol S.A. 2010*

#### 2.5.4 Actividades a desarrollar

##### 2.5.4.1 Descripción del proceso de tratamiento

En cada uno de los pozos se contará con la posibilidad de pasar por zarandas y centrífuga el lodo para poder recircularlo en caso que no se requiere hacer cambio del mismo, si es necesario hacer cambio de éste, se recolectará en tanques cerrados en cada pozo, para ser transportados al centro de acopio. Allí se realiza un control previo haciendo pasar todo el volumen de lodo por unas zarandas, previo a ser almacenado, o procesado, los sólidos que se generen también serán transportados al centro de acopio.

El lodo almacenado podrá sufrir dos tratamientos, excluyentes. Si se determina que puede reutilizarse, se centrifugará en el centro de acopio y se retornará a cualquiera de los pozos para su re uso. Si se determina que el lodo debe ser desecharo, se realizará entonces el proceso de dewatering. La fase líquida obtenida es conducida al sistema de tratamiento de aguas o podrá ser reutilizada en la preparación de nuevo lodo. La fase sólida pasa a ser estabilizada con los cortes de perforación.

Los cortes base agua, serán llevados a una piscina de recibo de cortes 4500 bbls, luego, en la piscina de mezcla 1500 bbls en una relación de 1:1 con suelo nativo de las mismas piscinas será mezclado hasta lograr una estabilización del material; en caso que la humedad sea demasiado alta será aplicada cal viva hasta lograr un 40% de humedad y finalmente serán dispuestos en las celdas, se deberá tener en cuenta que el porcentaje de ocupación de cada una de estas celdas es del 50% ya que el otro 50% es el material nativo o tierra que se utilizará como medio para estabilizar los cortes, en las celdas, pasarán aproximadamente 30 días(una vez cumplan parámetros monitoreo). Podrá ser aprovechado en la construcción de nuevas localizaciones para la perforación de nuevos pozos y/o terraplenes en vías de acceso, siempre y cuando se establezca la competencia de sus propiedades geomecánicas y granulométricas con el fin de que sean empleados para dicho propósito.

Dependiendo de las condiciones de saturación del terreno posterior a las operaciones realizadas, se deberá analizar la viabilidad de seguir trabajando en la misma área.

A continuación en la **Tabla 2-124** se muestra la capacidad de almacenamiento del centro de acopio sin remoción de cortes, lo ideal es que una vez cumplan los parámetros establecidos por la ley (Lixiviados Decreto 4741 del 2005 y cortes Loussiana 29B) se clausuren las celdas con un apropiado plan de revegetalización u otra alternativa que se considere conveniente. Para el caso de presentarse una contingencia, estos serían los tiempos y capacidades de almacenamiento máximos a tener en cuenta.

**Tabla 2-124 Capacidad de almacenamiento sin remoción de cortes estabilizados**

Días	1	30	60	90
Volumen de cortes generados (bbls)	1.200	36.000	72.000	108.000
cant. Celdas necesarias	5	155	310	465
cant. De celdas disponibles en total	400			
Almacenamiento por celda relación 1:1(bbls)	233			
			93.000	

Tiempo de secado estimado de acuerdo a pruebas realizadas. 30 días.  
 Tiempo total para contingencia 47 días.

La capacidad max. De almacenamiento (sin remover cortes estabilizados) es de 93000bbls, lo cual ocurriría el día 77.

#### 2.5.4.2 Transporte de residuos líquidos y sólidos de perforación

Las medidas y recomendaciones que se plantean a continuación se aplican **6.1.1.5 Manejo de cortes de perforación en el Capítulo 6** del presente documento.

Los vehículos de transporte de residuos líquidos y sólidos deben cumplir los requerimientos establecidos en la legislación, relacionados con el tránsito y transporte de carga por carretera y las establecidas por Ecopetrol en sus condiciones contractuales.

Los conductores y demás personal involucrado deberán conocer los riesgos ambientales de los materiales que transportan, tener el entrenamiento y conocimiento de los procedimientos de las labores a realizar, saber cómo actuar en caso de emergencia, disponer de los elementos de protección personal y equipos adecuados para el cargue, manipulación y respuesta a emergencias.

El vehículo deberá ser el apropiado para la carga a trasportar, de tal manera que no debe superar los límites máximos permitidos en términos de niveles de llenado, peso o volumen. Adicionalmente el vehículo deberá encontrarse en condiciones óptimas de funcionamiento; para ello se deberá establecer un programa de mantenimiento preventivo, garantizando la buena sincronización y carburación de los motores, además de cumplir con las revisiones periódicas exigidas y demás requerimientos del programa de conducción segura.

#### 2.5.4.3 Especificaciones técnicas de la localización.

El área escogida ha sido definida como de baja sensibilidad e importancia ambiental y forma parte de aquellas que son susceptibles de intervención sin restricciones consignada en la zonificación de manejo para la actividad.

#### 2.5.4.4 Métodos constructivos

Se proyecta la construcción de la localización en un solo nivel en terraplén con sus obras complementarias tales como, zona para descargue y acopio de lodos y cortes, dentro de la cual se adecuarán zonas duras para la disposición de equipos área de piscinas para el tratamiento de agua y cortes de perforación, cunetas internas y perimetrales, skimmers y/o desarenadores.

La construcción del centro de acopio iniciará con los movimientos de tierra para la conformación de del mismo y la disposición temporal de la capa vegetal en los sitios definidos. A medida que se vayan alcanzando las cotas de subrasante en las diferentes áreas, teniendo en cuenta los bombeos de diseño y con ello, construir los sistemas de drenaje propuestos en los planos.

La conformación del terreno para la materialización de la localización implica: descapote, conformación de la superficie (nivelación) y disposición de una sub-base granular debidamente compactada para mejorar la capacidad portante en las áreas requeridas para la ubicación de infraestructura tal como: caseta para almacenamiento de química, caseta de operación y caseta de vigilancia y equipos.

El proceso constructivo, las características y facilidades a construir para la localización se listan a continuación:

**Tabla 2-125 Proceso constructivo del proyecto.**

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Desmonte y descapote	Consiste en retirar la cobertura vegetal o el terreno no adecuado para la construcción de estructuras, el cual se plantea retirar en un espesor variable hasta 40 cm o según se estime en los estudios y diseños.
Excavaciones	Estas se realizarán principalmente para la adecuación de piscinas y estructuras de drenaje, los materiales sobrantes de esta actividad serán dispuestos de manera adecuada en las áreas autorizadas.
Conformación de superficies	El área de recibo, ubicación de equipos e infraestructura de apoyo y vías internas, será adecuada con material que mejore su capacidad portante y acorde a lo contemplado en los diseños. Se deben considerar las alternativas propuestas para construcción y adecuación de estas superficies en plataformas de perforación contenidas en el presente documento.
Placas en concreto	Esta labor se realizará en los sitios que los diseños establecen. La labor involucra el encofrado, instalación de acero de refuerzo, vaciado y vibrado de la placa en concreto según las especificaciones y el espesor establecido en los mismos.
Construcción de piscinas	Se refiere a la excavación y construcción de estructuras para el tratamiento de las aguas industriales, así como para la recolección de los cortes y lodos procedentes de las actividades de perforación, en las cuales se realizará el mezclado con cal u otras sustancias para su

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
	tratamiento y/o estabilización y disposición final
Sistema para manejo de aguas	Consiste en la construcción de un sistema de cunetas cuya finalidad es recoger, conducir y manejar de manera independiente tanto las aguas lluvias, como las generadas durante la operación y el lavado de la infraestructura de los equipos empleados para tratamiento empleados en el centro de acopio. Esta actividad de igual manera debe contemplar las alternativas que para esta infraestructura se proponen para el caso de construcción de plataformas de perforación contenido en el presente documento.
Construcción de estructuras para desarenación	Antes de la entrega a los drenajes naturales, las aguas lluvias deben pasar por un sistema de retención de partículas sólidas en suspensión o arenas. Dicho sistema está constituido por los desarenadores. Las alternativas para estas estructuras van desde elementos portátiles en lámina metálica o en concreto reforzado (Ver Figura2-107).Estas estructuras a su vez deben contar con estructuras de entrega para el caso de terrenos ondulados con el fin de hacer una entrega controlada, donde se evite la generación de procesos erosivos.
Construcción de Skimmer	Esta estructura realiza la separación de aceites en las aguas que contengan este tipo de residuos, como aquellas provenientes del área de equipos derivada de su lavado operación. Estas son recuperadas desde esta estructura y transportadas a la estación más cercana para su tratamiento y disposición final.
Construcción de cerramientos	Está conformado por postes en concreto de 2,0 m de alto, separados cada 3,0 m y con 4 hiladas de alambre de púas No. 12. Las puertas de acceso a la localización se harán en malla eslabonada calibre 14, con postes en tubería tipo aguas negras de diámetro 2".



**Figura2-107 Desarenador convencional en concreto.**

## 2.5.5 Instalaciones de apoyo

### 2.5.5.1 Casetas de almacenamiento de químicos, otros insumos y residuos sólidos

La superficie del sitio podrá estar conformada sobre cemento, concreto o con cualquier otro material que garantice la impermeabilidad, estabilidad, funcionalidad y la protección del medio, principalmente del suelo, sobre dichas superficies se podrán ubicar estibas como alternativa para facilitar el manejo y la limpieza del lugar. La bodega será techada y tendrá una altura suficiente para el ingreso de la maquinaria encargada de ordenar y transportar los productos.

A continuación en la **Tabla 2-126** se relacionan los productos químicos a almacenar, teniendo en cuenta que se reacondicionará lodo para su re uso, además de los productos que se requieran para el tratamiento del agua.

**Tabla 2-126 Materiales a ser almacenados en la bodega de químicos**

PRODUCTO	FUNCIÓN
Bentonita	Componente base del lodo de perforación base agua.

PRODUCTO	FUNCIÓN
Nitrato de Potasio	Inhibidor químico de arcillas.
Viscosificante	Agente viscosificante.
PHPA	Extendedor e inhibidor mecánico.
Carbonato de Calcio	Sellante, incrementador de peso.
Potasa Caustica	Desembotar el BHA.
Cascarilla de arroz	Sellante (Eliminar pérdidas de circulación).
Wall Nut	Sellante (Eliminar pérdidas de circulación).
Soda cáustica	Ajuste de pH.
Asfalto	Inhibidor de corrosión.
Bicarbonato de Sodio	Secuestrante de Oxígeno.
LIPEFLOC 08	Polímero no-aniónico para floculación de sólidos.
SURFLOC 2515	Polímero aniónico para floculación de sólidos.
SURFLOC 2010	Polímero no-aniónico para floculación de sólidos.
OFXC 1143	Polímero no-aniónico para floculación de sólidos.
Ácido acético	Para ajuste de pH y coagulación.
Cal	Para ajuste de pH y coagulación.

Fuente: Ecopetrol S.A. 2010

#### 2.5.5.2 Laboratorio de química

En el centro de acopio se instalará un laboratorio el cual estará dotado como mínimo con un equipo básico para el monitoreo de calidad de aguas y control ambiental, el cual tendrá como mínimo los siguientes elementos: pH-metro, termómetro (aguas y suelo), conductímetro, kit de medición *in situ* (*humedad del suelo*), equipo para prueba de jarras.

#### 2.5.5.3 Equipo de control de incendios o de contingencias

Se compone de una red de distribución a presión conectada a dos tanques de agua con capacidad de 500 bbl cada uno, con facilidades para llegar a cualquier punto del centro de acopio, extintores, trajes para control de fuego, equipo auto contenido, botiquín, camilla y medicamentos.

#### 2.5.5.4 Caseta de celaduría

El área de la caseta será de dimensiones definidas, con piso en cualquiera de las alternativas planteadas para las demás superficies de la localización como concreto, afirmado, suelo estabilizado, estibas de madera, entre otros. La estructura contará con muros en bloque o ladrillo, con su respectiva batería de baño y será techada. También podrá instalarse una caseta prefabricada de fácil armado y desmonte que sea funcional y cómoda.

Siempre que llegara a requerirse algún sitio para la disposición de un volumen mínimo de sobrantes de excavación este se ubicará dentro de la localización.

### 2.5.6 Estimativo de la demanda de recursos naturales para obras civiles y operación

#### 2.5.6.1 Recurso agua

En la etapa de operación centro de acopio funcionará 24 horas al día, y se establecerán turnos para los operadores, los cuales no pernoctarán en este lugar, por lo tanto no se contará con

campamento para este fin. El agua que se requiera para hidratación del personal será de botellón adquirido de los centros poblados cercanos al proyecto; en cuanto a las alternativas para la obtención de este recurso durante la etapa de obras civiles se estima un caudal requerido de 0,3 l/s, para lo cual se contempla hacer uso de los permisos de captación vigentes con que cuenta el campo Castilla - Chichimene.

En etapa de operación se contará con un tanque elevado con la suficiente capacidad para labores básicas de lavado de equipos, aseo personal y laboratorio. El agua será captada de los puntos autorizados.

#### 2.5.6.2 Materiales de construcción

El movimiento de tierras para la construcción de la localización dependerá de las condiciones de la zona donde se ubique el centro de acopio. Se deberá buscar que para la conformación de la localización exista compensación entre el volumen de corte resultante y el volumen de relleno.

El material de arrastre o cantera para la conformación de la localización, se comprará a terceros debidamente legalizados.

En la **Tabla 2-127** se presentan los movimientos de tierra y cantidades estimadas de obra requeridos para la construcción de una localización típica.

**Tabla 2-127 Volúmenes estimados para la construcción y adecuación de un centro de acopio**

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Área máxima de la localización	60.000 m <sup>2</sup>
Volumen de descapote, e=0,30 m	18.000 m <sup>3</sup>
Volumen total excavación de piscinas	1.351,42 m <sup>3</sup>
Volumen de Material para conformación de superficie.	1.100 m <sup>3</sup>

*Fuente: Ecopetrol S.A. 2010*

#### 2.5.6.3 Vertimientos

El manejo de las aguas residuales domésticas que se generen por el personal técnico y operativo durante la etapa de construcción, adecuación y vías de acceso, podrá realizarse mediante la instalación de baños portátiles. Se deberá garantizar la instalación de un baño portátil por cada 15 trabajadores. La empresa que suministre estas unidades portátiles, debe garantizar el monitoreo y seguimiento de las mismas con el fin de realizar el respectivo mantenimiento y correcto tratamiento y disposición de los residuos almacenados en las mismas. Adicionalmente en los campamentos transitorios siempre que se requiera, se deben instalar sistemas sépticos (pozos) para llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales generadas durante esta etapa.

Sobre los residuos líquidos generados durante la fase de operación, se debe realizar la verificación de parámetros de calidad (Decreto .1594 de 1984), previo a la disposición final. Durante la etapa de operación también se emplearán unidades de baños portátiles.

#### 2.5.6.4 Recurso forestal

Para el desarrollo del proyecto no se prevé el aprovechamiento forestal de un volumen de madera mayor de 20 m<sup>3</sup> ya que las infraestructuras y obras proyectadas se localizan en suelos cubiertos por pastos limpios.

#### 2.5.6.5 Demanda de energía

El suministro de energía para el proyecto se apoya en la red eléctrica existente para los pozos cercanos al área destinada para el Centro de acopio y manejo de cortes de perforación, se convertirá en el respaldo para las actividades a desarrollar en el mismo, pudiendo emplearse generadores diesel para el manejo de contingencias en este tema.

#### 2.5.6.6 Tipos de residuos generados en la etapa de obras civiles

Se pueden clasificar los residuos a partir de las actividades que se llevarán a cabo en el proyecto, como se resume a continuación en la **Tabla 2-128**.

**Tabla 2-128 Fuentes y actividades generadoras de residuos en el proceso de obras civiles**

ACTIVIDAD / FUENTE	TIPO DE RESIDUO GENERADO
Construcción	Capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación Residuos de concreto y acero, madera, láminas, estopas contaminadas con solventes, residuos de mampostería, residuos de textiles, ladrillo, aumento en la contaminación atmosférica (PST, PM10, NOX, SO2, CO), aumento en los niveles de presión sonora entre otros.
Demolición	Escombros, arenas, gravas, piedra, recebo, asfalto, concreto y agregados sueltos, de construcción o demolición, ladrillo, cemento, acero, hierro, mallas, madera, formaleta y similares. Además, por el transporte de la maquinaria de construcción se genera aumento en la contaminación atmosférica (PST, PM10, NOX, SO2, CO) y aumento en los niveles de presión sonora.

Fuente: Ecopetrol S.A. 2010

#### 2.5.6.7 Manejo, sistemas de tratamiento y disposición de residuos institucionales

En las actividades, se generarán residuos con diferentes características, para los cuales se establecerá del acuerdo al PMIR (Plan de manejo integral de residuos de Ecopetrol S.A) un punto ecológico institucional y uno industrial (Ver **Figura 2-108** y **Figura 2-109**) en las áreas donde se requiera y de acuerdo a esto realizar la adecuada clasificación de los residuos generados en los recipientes y/o bolsas con los siguientes colores (Ver **Tabla 2-129** y **Tabla 2-130**).

**Tabla 2-129 Código de colores –clasificación de residuos**

COLOR RECIPIENTE	ROTULO	CONTENIDO
Azul	PLASTICO	Envases, bolsas, PVC, envases de plástico, bolsas, PET (gaseosa, agua), empaques de alimentos, tarros, tetra pack, enlatados, papel de aluminio.
Verde	PAPEL , CARTON Y VIDRIO	Papel y cartón limpios, secos y óptimos para reciclaje. Papel de impresión, papel periódico, Kraft y plegadizo, cajas, empaques, envases de bebidas.
Negro	MATERIA ORGANICA	Residuos de alimentos, poda y/o contaminado con materia orgánica, cascas de fruta, papel de servicios, papel y cartón húmedos, textiles como traperos, limpiadores (que no estén contaminados con crudo o aceite).


**Figura 2-108 Punto ecológico institucional**

**Figura 2-109 Punto ecológico industrial**
**Tabla 2-130 Manejo, sistemas de tratamiento y disposición de residuos institucionales**

COLOR RECIPIENTE	ROTULO	CONTENIDO
AMARILLO	CHATARRA, MATERIAL ELECTRICO Y MADERA	Chatarra menor, tales como: repuestos, partes de equipos, grifos, trozos de láminas, hojalata, tornillos, alambres, matrices de filtros. Materiales eléctricos como controles de bombas, motores, redes y cableado eléctrico, residuos en cobre, bronce, tubería metálica. Residuos menores de madera.
BLANCO	BATERIAS Y AISLANTES TERMICOS	Baterías, pilas o fuentes de energía de motores, compresores, linternas, tóner, radios y demás equipos electrónicos. Aislantes térmicos (Revestimientos de la planta de gas, calderas, tuberías y torres de separación). Residuos plásticos como protectores de rosca, EPP y filtros de aire de motores, silica gel.
GRIS	IMPREGNADOS CON ACEITE Y/O HIDROCARBURO	Residuos que sin importar sus características se encuentren impregnados de aceites o hidrocarburos; estopas, correas, baldes, madera, sellos de seguridad, filtros de aceite, telas baldes, mangueras.
MARRÓN	SOLIDOS ACEITOSOS	Borras de tanques, lodos de piscinas, suelos contaminados, aserrín, asfalto, tierra, arenas sandblasting, material vegetal, arena, cascarilla contaminada.

Para el caso de los tubos o lámparas fluorescentes, deberá utilizarse el envase de cartón original del tubo o lámpara nuevo para guardar el que se halla sustituido, esto evita que se rompan; si fueron rotas accidentalmente se deberá seguir el protocolo de instructivos anexos del PMIR al igual que para: baterías, chatarra metálica, equipos y aceites con PCB'S, filtros usados, protectores de varilla y tubería, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos; en caso de presentarse.

### 2.5.7 Estimativo de maquinaria, equipos y personal

La ejecución de actividades a través de las diferentes etapas del proyecto, generará una necesidad de contratación de personal especializado y no especializado, el cual variará su ocupación de acuerdo con las actividades que se estén desarrollando.

El personal especializado incluye profesionales y operarios calificados y está compuesto primordialmente por ingenieros o técnicos profesionales que poseen un grado de conocimiento y experiencia específica en el desarrollo de una actividad para este tipo de proyectos.

El personal no calificado, se contratará en la región de influencia directa del proyecto y de acuerdo con las políticas de contratación de Ecopetrol; estas personas generalmente no requieren contar con entrenamiento previo, ni experiencia en proyectos y/o actividades de la industria. Se buscará que los trabajadores no calificados cumplan turnos diarios de 8 a 12 horas, pero con disponibilidad de 24 horas al día debido a la naturaleza de las labores.

El personal requerido durante las etapas de construcción y operación se presenta en la **Tabla 2-131**.

**Tabla 2-131 Estimativos de personal**

CONSTRUCCIÓN		OPERACIÓN	
CARGO	CANT	CARGO	CANT
Ingeniero Civil	1	Ingeniero de lodos	1
Interventor Ambiental	1	Supervisor IMF	1
Inspector de HSE	1	Inspector HSE	1
Topógrafo	1	Conductor volqueta	1
Operadores de maquinaria pesada	4	Operador maquinaria	1
Conductores de volquetas	4	Obreros de patio	6
Cadeneros	2	Vigilante	1
Maestros	2		
Oficiales	4		
Obreros	20		
Total estimado	40		

*Fuente: Ecopetrol S.A. 2010.*

El estimativo de recursos en cuanto a maquinaria y equipo durante la fase constructiva se presenta en la **Tabla 2-132**. Los equipos requeridos para la etapa de operación se presentan en la **Tabla 2-122**.

**Tabla 2-132 Estimativos de maquinaria y equipo para las obras civiles**

MAQUINARIA Y EQUIPO	NÚMERO
Motoniveladora	1
Retroexcavadora	2
Bulldozer	1
Vibrocompactador	1
Volquetas	4
Mezcladoras de concreto	2
Vibradores de concreto	3

*Fuente: Ecopetrol S.A. 2010.*

#### 2.5.7.1 Etapas del proyecto

**Tabla 2-133 Etapas de ejecución del proyecto**

ETAPA	ACTIVIDADES	ASPECTOS
Pre operativa	Preparación del área y gestión socio ambiental	Gestión comunitaria e institucional
		Adquisición de bienes y servicios
		Negociación de predios y servidumbres
		Contratación y capacitación de personal
		Levantamiento topográfico.
Etapa Operativa - Construcción	Adecuación/construcción de vías de acceso al área y al centro de acopio.	Movilización de maquinaria, equipo, materiales y personal
		Instalación de campamentos para obras civiles.

ETAPA	ACTIVIDADES	ASPECTOS
		Operación de maquinaria y equipos Desmonte y descapote Excavación, cortes y rellenos Construcción de estructuras en concreto Construcción obras de drenaje y control. Transporte y disposición de material de construcción Construcción de piscinas. Captación transporte / Consumo de agua Generación y disposición de residuos líquidos. Generación y disposición de residuos sólidos Revegetalización y/o empradización.
		Montaje y operación de equipos. Movilización de maquinaria, equipo, materiales para tratamiento y personal. Captación Transporte / Consumo de agua Tratamiento de agua, lodos y cortes de perforación Generación y disposición de residuos líquidos. Generación y disposición de residuos sólidos.
		Desmonte y retiro de maquinaria tanques y equipos. Limpieza del área. Cierre de piscinas y celdas. Captación Transporte / Consumo de agua. Generación y disposición de residuos líquidos remanentes. Generación y disposición de residuos sólidos. Revegetalización y/o empradización Proceso de cierre del Plan de Gestión Social Cierre de pasivos sociales en el área.
	Etapa Operativa – Tratamiento de lodos, agua y cortes de perforación	
	Etapa Post Operativa – Abandono y Restauración final.	

#### 2.5.7.2 Cronograma de ejecución

En la **Tabla 2-134** se presenta un cronograma estimado para la ejecución de las obras para la etapa de construcción.

**Tabla 2-134 Cronograma estimado**

ÍTEM	MES 1	MES 2	MES 3
Preliminares			
Movimientos de tierra			
Adecuación de superficies			
Construcción obras en concreto			
cerramiento			

Fuente: Ecopetrol S.A.

### 2.5.7.3 Costos estimados para la construcción de un centro de acopio.

A continuación se relacionan los costos de adecuación y construcción estimados para uno de los centros de acopio.

**Tabla 2-135 Costo estimado del proyecto**

DESCRIPCIÓN	UN	VR. UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Localización y replanteo – vía de acceso	m	1.815	600,00	1.089.000
Localización y replanteo – localización	gb	2.178.000	1,00	2.178.000
Desmonte, limpieza y descapote	m2	2.299	66.000,00	151.734.000
Cuneteo, escarificación, nivelación y compactación del terreno	m	4.235	600,00	2.541.000
Corte y excavación mecánica	m3	10.890	10.000,00	108.900.000
Corte, excavación y relleno compensado, traslado < a 500 m	m3	12.100	5.000,00	60.500.000
Suministro, cargue, extendido y compactación material de afirmado	m3	31.460	3.000,00	94.380.000
Acarreo de material de afirmado	m3-km	2.130	90.000,00	\$ 191.700.000
Suministro y colocación de concreto de 3000 psi	m3	526.350	30,00	15.790.500
Acero de refuerzo figurado	kg	4.114	1.000,00	4.114.000
Cunetas de aguas lluvias	m	84.700	2.000,00	169.400.000
Impermeabilización de piscinas con geomembrana	m2	15.730	900,00	14.157.000
Cerramiento en cerca con alambre de púas	m	16.940	2.200,00	37.268.000
Alcantarilla – tubería de concreto de 36"		605.000	7,00	4.235.000
Quiebrapatas	m	5.324.000	1,00	5.324.000
Suministro e instalación de puerta de acceso	un	1.936.000	1,00	1.936.000
Geotextil tejido 2100	m2	5.929	18.000,00	106.722.000
Tapa metálica para skimmer	un	1.815.000	2,00	3.630.000
Desmonte de cercas existentes	m	9.680	300,00	2.904.000
Área terreno	Ha	45.000.000	6,00	270.000.000
<b>SUBTOTAL OBRAS CIVILES</b>				<b>1.248.502.500</b>

Fuente: Ecopetrol S.A. 2010

## 2.6 OPTIMIZACIÓN Y MANEJO DE RESIDUOS ACEITOSOS

### 2.6.1 Descripción del proyecto

#### ➤ Localización

La implementación del proyecto “Optimización manejo de residuos Aceitosos” en las estaciones Castilla 2, Castilla 3 y Acacias, se realizará en las coordenadas presentadas en las **Tabla 2-136** a **Tabla 2-138**.

**Tabla 2-136 Coordenadas estación Castilla 3**

NORTE	ESTE
916.123,7	1.046.927,1
916.156,5	1.046.860,1

NORTE	ESTE
916.125,1	1.046.842,9
917.181,2	1.046.850,3
917.158,0	1.046.894,2
916.123,7	1.046.927,1

**Tabla 2-137 Coordenadas estación Castilla 2**

NORTE	ESTE
918.881,3	1.044.953,3
918.881,3	1.045.017,4
918.822,5	1.045.040,3
918.814,3	1.045.034,6
918.815,3	1.044.953,3

**Tabla 2-138 Coordenadas estación Acacias**

NORTE	ESTE
920.683,8	1.049.836,1
920.719,9	1.049.868,9
920.649,4	1.049.945,6
920.615,1	1.049.911,7

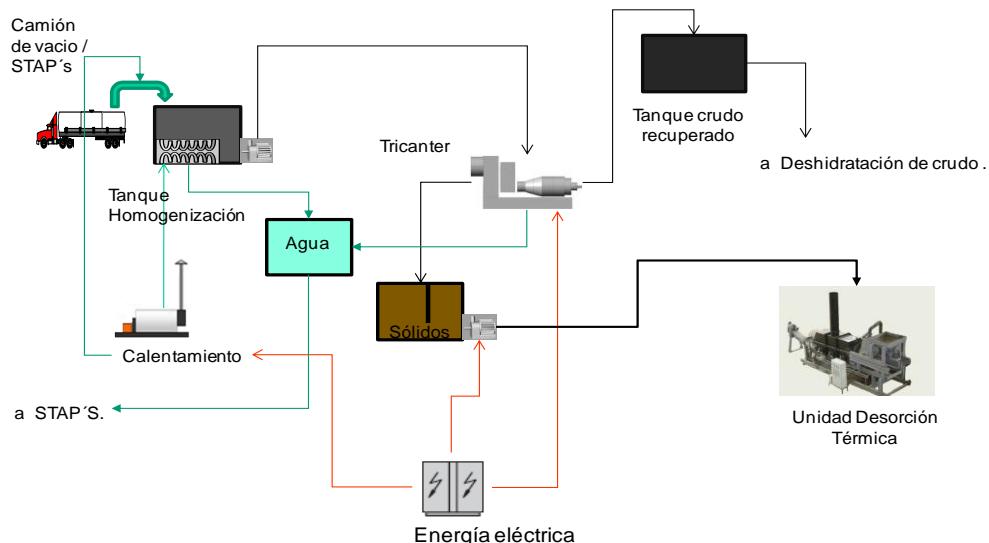
#### ➤ Justificación

Para el año 2012 y años siguientes se proyecta que los STAP's de la Estación Acacias y de la nueva Estación Castilla III, pertenecientes a la SCC, cuenten cada uno con una capacidad de tratamiento de 2.000 KBWPD; lo que adicionado a la condición actual, se traducirá en una capacidad de tratamiento total de 4.480 KBWPD.

De acuerdo con lo anterior, es posible inferir que actualmente la SCC cuenta con un sistema de tratamiento de lodos aceitosos poco eficiente, que incurre en costos elevados de tratamiento y transporte, debido principalmente a que los lodos generados se componen en su mayor parte de agua. Por esta razón, se establece como premisa la necesidad de mejorar los STAP's existentes, de tal manera que se minimice el contenido de agua del residuo aceitoso que finalmente será tratado. Dichas mejoras deben considerar la instalación de decantadores de lodos para CPI's, decantadores para manejo de retrolavado de filtros, puesta en funcionamiento de lechos de secado, entre otros.

#### ➤ Prueba piloto

Con base en la revisión de las tecnologías existentes para tratamiento de lodos aceitosos, el análisis desarrollado por el ICP y a los resultados de las pruebas piloto; el esquema propuesto para tratar los lodos aceitosos de la SCC debe optimizar la recuperación de crudo y permitir la obtención de un residuo sólido con el mínimo contenido de agua y aceite permisible. De acuerdo con lo anterior, en **Figura 2-110** se muestra el esquema de proceso finalmente propuestos para el tratamiento de lodos en SCC.



**Figura 2-110 Esquema de proceso recomendado para tratamiento de residuos aceitosos en el área de Castilla y Acacias.**

Este esquema operativo fue utilizado en la Planta Piloto instalada provisionalmente en la Estación Apiay, bajo el contrato N° 4027890: PRUEBA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DE FLUIDOS PROVENIENTES DE RESIDUOS ACEITOSOS PRODUCIDOS EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA DE LAS FACILIDADES DE PRODUCCIÓN EN LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO.

La **Tabla 2-139** y la **Figura 2-111** muestran los resultados preliminares obtenidos en las pruebas piloto:

**Tabla 2-139 Resultados preliminares prueba piloto tratamiento de lodos aceitosos en GEC3.**

LUGAR	RECIBIDO (bbl)	ALMACENADO (bbl)	ACEITE RECUPERADO (bbl)	SÓLIDOS SEPARADOS (bbl)	AGUA SEPARADA (bbl)
PISCINA ANTIGUO PATIO	63	43	0	0	20
	190	0	109	5	76
	20	0	10	2	8
LODOS DE LIMPIEZA DE PISCINAS	200	0	0	9	191
LODOS CHICHIMENE	146	17	88	6	35
<b>TOTAL</b>	<b>619</b>	<b>60</b>	<b>207</b>	<b>22</b>	<b>330</b>



Residuo sólido separado



Agua separada

**Figura 2-111 Fases sólida y acuosa separadas como resultado de pruebas piloto en Estación Apiay.**

Con base en la revisión de las tecnologías existentes para tratamiento de lodos aceitosos, el análisis desarrollado por el ICP y a los resultados de las pruebas piloto; el esquema propuesto para tratar los lodos aceitosos de la GEC debe optimizar la recuperación de crudo y permitir la obtención de un residuo sólido con el mínimo contenido de agua y aceite permisible. (Ver **Figura 2-110**).

➤ **Características del proyecto**

- ✓ Condiciones del lugar

Dado que las Estaciones se encuentran en zonas cercanas, se considera que las condiciones ambientales son semejantes entre sí. De acuerdo con lo anterior, las condiciones de lugar son las siguientes:

Altura sobre el nivel del mar:	420 m
Temperatura de bulbo seco:	Máxima = 90 °F Mínima = 80 °F Promedio = 82 °F
Temperatura ambiente:	85 – 100 °F
Presión barométrica:	28,4 in Hg 13,9 psia
Viento:	Velocidad Máxima = 100 m/h Dirección predominante = Sur a Norte
Clasificación sísmica:	Alta, Aa = 0,25
Humedad relativa:	Máxima = 82 % Mínima = 70 % Promedio = 75,3 %

- ✓ Características y materiales a tratar

- o Materiales a deshidratar :

Lodos del STAP  
 Borras Aceitosas de las diferentes estaciones de Ecopetrol.

- o Características del material a tratar

Aceite	:	10-20%
Sólidos	:	20-30%
Agua	:	60-70%
Viscosidad	:	10.000 a 30.000 cp
Densidad	:	0,85 a 0,95 Kg/lt
Temperatura	:	40 a 60°C

- o Entrega de materiales a la planta de lodos:

Lodos STAP: Bombeado desde el STAP  
 Borras Aceitosas: Entrega en carrotanque

- ✓ Estimación de volúmenes a tratar

Para la estimación del volumen de lodos a tratar se toma como base los residuos aceitosos que se generan en los sistemas de aguas de producción (STAP's) de la SCC. Los STAP's son la mayor fuente generadora de lodos.

Se cuenta con datos del sistema portátil de tratamiento de aguas los cuales se encuentran tratando agua de las estación Catilla I con buenos resultados en la calidad del agua. La capacidad de este sistema portátil es de 30,000 BWPD con obtención de valores de G&A y SST por debajo de 1 ppm bajo el esquema típico de proceso para tratar aguas de producción en la SCC que incluye: CPI's, Celdas de flotación y Filtros operando en serie.

La **Tabla 2-140** muestra los resultados en ppm removidos de G&A y SST en cada una de las etapas para el sistema portátil de 30,000 BWPD. Los valores corresponden a un monitoreo promedio hora a hora consolidado finalmente por día.

**Tabla 2-140 Concentración de G&A y SST removidos en STAP de 30,000 BWPD en estación Castilla I**

Día	Volumen corregido por calibración (BWPD)	ppm SST removido en CPI	ppm G&A removido en DAF	ppm SST removido DAF	ppm G&A removido filtros	ppm SST removido filtros
1-Jul	27379	21.0	50.7	121.0	2.5	5.2
2-Jul	27596	18.0	60.7	134.0	2.6	4.2
3-Jul	26853	26.0	487.0	128.0	1.9	4.0
4-Jul	28494	12.5	40.0	93.0	2.6	4.0
5-Jul	27532	12.0	62.0	86.0	4.7	3.4
6-Jul	26007	20.0	48.0	112.0	3.1	2.8
7-Jul	26885	33.0	94.0	129.0	3.8	3.2
8-Jul	26852	28.7	69.0	180.0	3.5	4.2
9-Jul	27264	35.0	120.0	161.0	4.4	4.9
10-Jul	26355	14.0	111.0	169.0	4.7	5.0
11-Jul	26234	18.0	123.0	177.0	5.5	4.9
12-Jul	27222	30.0	139.0	185.0	6.9	6.1
13-Jul	30427	38.0	226.0	280.0	9.3	10.4
14-Jul	29609	36.0	211.0	296.0	5.8	6.4
15-Jul	31617	47.0	166.0	288.0	6.6	8.0

Día	Volumen corregido por calibración (BWPD)	ppm SST removido en CPI	ppm G&A removido en DAF	ppm SST removido DAF	ppm G&A removido filtros	ppm SST removido filtros
16-Jul	31363	41.0	171.0	342.0	7.5	9.3
17-Jul	31846	22.0	393.0	392.0	7.9	9.5
18-Jul	32567	20.9	308.0	219.0	5.9	5.5
19-Jul	31292	17.5	281.0	170.0	6.2	5.3
20-Jul	32446	12.0	155.0	159.0	4.1	6.5
Promedio	<b>27661.24</b>					

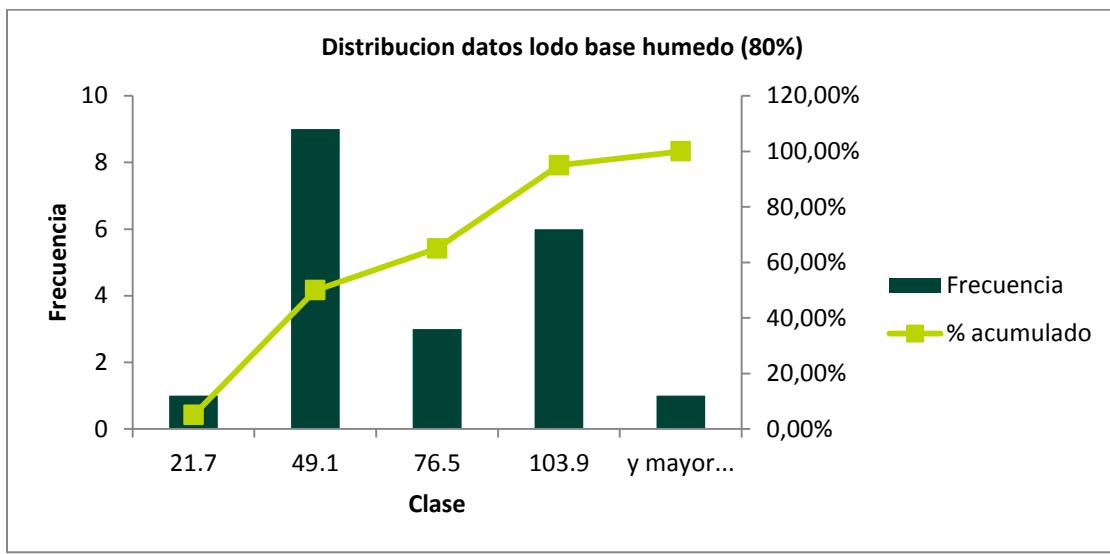
**Tabla 2-141 Concentración G&A y SST removidos en STAP de 30,000 BWPD**

Día	Volumen corregido por calibración	Volumen sólido removido CPI (bls)	Volumen G&A removido DAF (bls)	Volumen sólido removido DAF (bls)	Volumen G&A removido filtros (bls)	Volumen de SST removidos de filtros (bls)	Volumen lodo base seca (bls)	Volumen residuo aceitoso (80% agua)
1-Jul	27379	0.57	1.39	3.3	0.07	0.14	5.49	27.43
2-Jul	27596	0.50	1.68	3.7	0.07	0.12	6.06	30.29
3-Jul	26853	0.70	13.08	3.4	0.05	0.11	17.37	86.86
4-Jul	28494	0.36	1.14	2.6	0.07	0.11	4.33	21.67
5-Jul	27532	0.33	1.71	2.4	0.13	0.09	4.63	23.14
6-Jul	26007	0.52	1.25	2.9	0.08	0.07	4.83	24.17
7-Jul	26885	0.89	2.53	3.5	0.10	0.09	7.07	35.35
8-Jul	26852	0.77	1.85	4.8	0.09	0.11	7.66	38.32
9-Jul	27264	0.95	3.27	4.4	0.12	0.13	8.87	44.34
10-Jul	26355	0.37	2.93	4.5	0.12	0.13	8.00	40.02
11-Jul	26234	0.47	3.23	4.6	0.14	0.13	8.62	43.08
12-Jul	27222	0.82	3.78	5.0	0.19	0.17	9.99	49.95
13-Jul	30427	1.16	6.88	8.5	0.28	0.32	17.15	85.76
14-Jul	29609	1.07	6.25	8.8	0.17	0.19	16.44	82.20
15-Jul	31617	1.49	5.25	9.1	0.21	0.25	16.30	81.51
16-Jul	31363	1.29	5.36	10.7	0.24	0.29	17.90	89.51
17-Jul	31846	0.70	12.52	12.5	0.25	0.30	26.25	131.27
18-Jul	32567	0.68	10.03	7.1	0.19	0.18	18.21	91.07
19-Jul	31292	0.55	8.79	5.3	0.19	0.17	15.02	75.10
20-Jul	32446	0.39	5.03	5.2	0.13	0.21	10.92	54.61
Promedio	<b>27661.24</b>							

De un análisis de estadística descriptiva se aprecia que la probabilidad acumulada de los resultados el 90% de los datos podría tener un valor de 100 BPD de residuos aceitosos(80% humedad).

**Tabla 2-142 Distribución acumulada concentración de residuo aceitoso húmedo (80% agua)**

VOLUMEN RESIDUO ACEITOSO (BLS)	FRECUENCIA	% ACUMULADO
21.7	1	5.00%
49.1	9	50.00%
76.5	3	65.00%
103.9	6	95.00%
y mayor...	1	100.00%


**Figura 2-112 Distribución de volumen de residuo aceitoso (80% humedad)**

Para el dimensionamiento de las plantas de proceso se tomará como base una producción de 100 BPD de residuo aceitoso por cada 30,000 BWPD.

➤ **Crecimiento modular**

Dada la necesidad de tratar de manera integral los residuos aceitosos generados en las diferentes Estaciones de la GEC, y al deseo de contar con tecnologías limpias y de mayor eficiencia; se realizó la estimación de los caudales de lodo que se generarán en las Estaciones Acacias, Castilla II, Castilla III y Chichimene, de acuerdo con la capacidad proyectada para cada estación y a los valores diarios de concentración (grasas/aceites y sólidos suspendidos) registrados actualmente para los sistemas de tratamiento de agua. A continuación se muestra la información tenida en cuenta como base para el desarrollo del estimado mencionado:

**Tabla 2-143 Proyección estimada tratamiento de agua en estaciones SCC**

SUPERINTENDENCIA	ESTACIÓN	STAP	AÑO ENTRADA STAP	CAPACIDAD (KBWPD)
SCC	ACACIAS	1	EXISTENTE	250
		2	2011	250
		3	2013	250
		4	2013	250
		5	2014	250

SUPERINTENDENCIA	ESTACIÓN	STAP	AÑO ENTRADA STAP	CAPACIDAD (KBWPD)
CASTILLA II	-	6	2014	250
		7	2014	250
		8	2014	250
	TOTAL			2.000
	CASTILLA II	1	EXISTENTE	200
		2	EXISTENTE	100
	TOTAL			300
	CASTILLA III	1	2013	250
		2	2013	250
		3	2013	250
		4	2013	250
		5	2013	250
		6	2013	250
		7	2013	250
		8	2013	250
	TOTAL			2.000
CHICHIMENE	ACACIAS		2012	120

**Tabla 2-144 Proyección estimada de lodos aceitosos en estaciones de la SCC**

SUPERINTENDENCIA	ESTACIÓN	QAGUA (KBWPD)	LODO ACEITOSO (BPD)
SCC	CASTILLA II	300	1000
	CASTILLA III	2000	6700
	ACACIAS <sup>5</sup>	2000	6700
<b>TOTAL SCC</b>		<b>4300</b>	<b>14400</b>

Con base en los balances de lodos aceitosos que se espera que se generaran en la GEC se proponen plantas con crecimiento modular con las siguientes capacidades:

- ✓ Estación Castilla II

Planta de capacidad de 1000 BPD de lodo aceitoso.

- ✓ Nueva estación Castilla III

Una planta de un primer módulo de 3500 BPD de residuo aceitoso con capacidad de ampliación a un segundo módulo de 3500 BPD.

- ✓ Estación Acacias

Una planta de un primer módulo de 3500 BPD de residuo aceitoso con capacidad de ampliación a un segundo módulo de 3500 BPD.

<sup>5</sup> De acuerdo con el modelo QUAL2K.

<sup>5</sup>Incluye lodos provenientes de la Estación Chichimene

- ✓ Químicos empleados en el proceso de tratamiento de residuos aceitosos

Los productos químicos utilizados en el proceso de deshidratación de lodo de la centrifuga tricanter son:

1- <b>Acido Cítrico</b>	:	Ajuste de pH: Solución al 50% de acido cítrico industrial.
2- <b>Floculante</b>	:	Solución entre 0,05 y 0,2% según se requiera.
3- <b>Limpiador Acido</b>	:	Para CIP: Solución al 0,5%.
4- <b>Soda Alcalino</b>	:	Para CIP: Solución al 1,5 a 2%.

**Tabla 2-145 Resumen de químicos a utilizar.**

Número	Producto Químico	Referencia	Preparación (%)	Caudal de Dosificación Máximo (ml/min)		Dosis Máxima Disponible (ppm)	Dosis Esperada (ppm)
1	Acido Cítrico - Ajuste de pH	Ac Cítrico	50,00%	505	ml/min	1.009,33	300,00
2	Floculante	Por definir	0,20%	130,00	lt/hr	1.040,00	200,00
Número	Producto Químico	Referencia	Preparación (%)	Consumo Durante el CIP		Frecuencia CIP (Veces /mes)	Consumo Mensual (Kg)
3	Limpiador Acido	SP-405	0,50%	50	Kg	1	50,00

➤ **Definiciones de proceso y logística a seguir durante la fase de ingeniería básica**

- ✓ Instalaciones de equipos

El esquema de proceso a seguir es el definido en la **Figura 2-110**. A continuación se presentan los principales sistemas que se instalan:

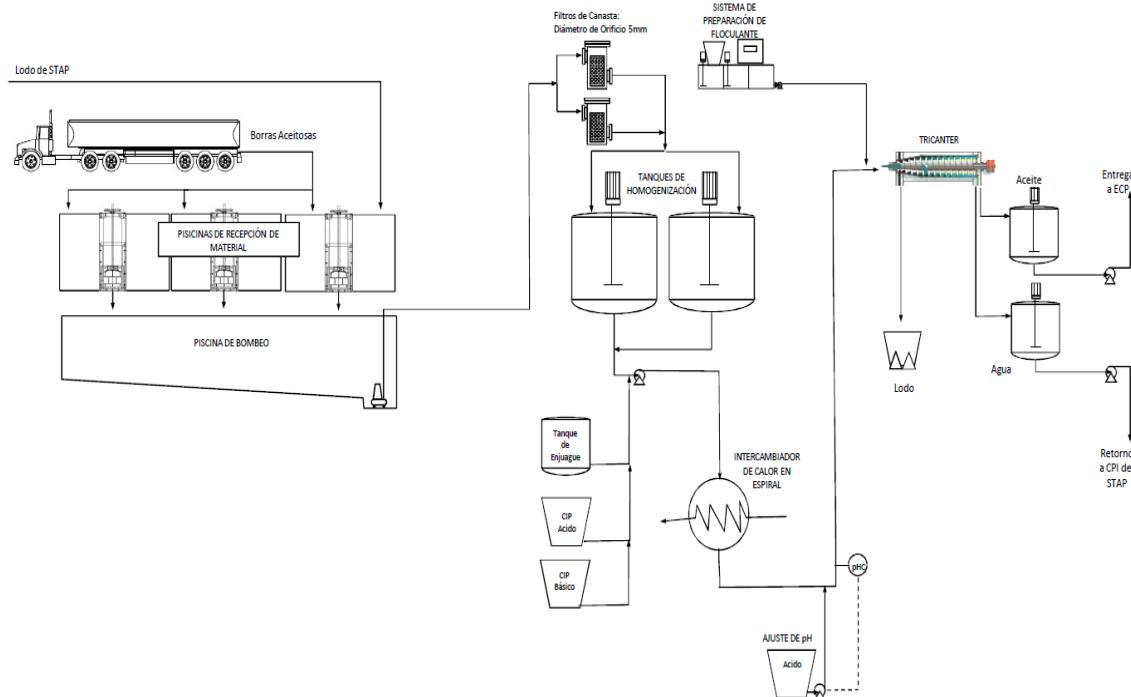
- o Instalación de sistema de centrifuga tricanter
- o Instalación de sistema de centrifuga de discos
- o Instalación de Unidad de desorción Térmica
- ✓ Otras consideraciones:
  - o Todos los anteriores sistemas de proceso y sus respectivos equipos requeridos y definidos durante los análisis conceptuales deberán ser capaces de manejar los volúmenes de lodos definidos en las bases de diseño.
  - o Los equipos requeridos para el cargue y descargue de los lodos aceitosos y secos de las unidades deberán ser considerados durante el desarrollo y diseño de equipos.
  - o Los diseños de tratamiento deberán preverse para un crecimiento modular.
  - o Las unidades de desorción térmica deberán emplear sistema de calentamiento indirecto con el fin de reducir las emisiones al medio ambiente, quemando combustibles lo más limpio posibles.

➤ **Descripción del sistema**

El sistema de tratamiento de lodos y borras consta de piscinas de recepción de material, desde donde se envía a los tanques de homogenización lugar donde se pueden verificar las características del material para enviarlo a la tricanter, previo paso por un intercambiador de calor tipo espiral donde se incrementa la temperatura del material para mejorar la separación. De la tricanter se obtiene: lodo seco, aceite y agua aceitosa. El lodo se retirará en volquetas, el agua se

retornará al STAP de Acacias y el aceite se enviará a una de las líneas de Ecopetrol para ser reincorporada al proceso.

El sistema cuenta con los tanques de enjuague y CIP (sistema de lavado químico de la centrifuga tricanter) de la tricanter, un tanque de agua caliente para calentar el material y uno de agua fría para la preparación del floculante en el sistema automático de preparación.



**Figura 2-113 Diagrama de proceso definido para planta de tratamiento de lodos en la SCC**

#### ➤ Filosofía de operación

El control del sistema de deshidratación de lodos se lleva a cabo con la utilización de sensores de nivel, de presión, y de temperatura, entre otros.

El material a tratar se recibe en una de las tres piscinas dispuestas para almacenar el material, de allí es enviado manualmente a la piscina de bombeo por medio de compuertas de cuchilla que permiten el flujo por gravedad. La piscina de bombeo cuenta con una alarma de alto nivel que emitirá una señal lumínica para advertir al operador, esta se establecerá con el set-Pont de un medidor de nivel tipo radar, el cual además permitirá apagar las bombas de cavidades progresivas (A/B) cuando el nivel sea muy bajo y se apagaran cuando el nivel del tanque de homogenización que se está llenando llegue al nivel de alarma máximo.

Las bombas (A/B) de la piscina se encenderán manualmente desde el tablero de control.

El operador deberá seleccionar el tanque de homogenización al cual se deberá enviar el material mediante la apertura de una de las válvulas automáticas (A/B) que van hacia los tanques de homogenización (A/B). Para proteger los equipos posteriores, y especialmente la tricanter, se cuenta con dos filtros de canasta que trabajan en paralelo que retienen toda partícula mayor a 5 mm.

En caso de presentarse problemas con las características del material, o de tener una falla en la tricanter, el material puede ser enviado a los tanques de preparación de lodo que alimentan los lechos de secado, esta operación se deberá realizar manualmente.

Los tanques de homogenización (A/B) cuentan con un sensor de nivel con un nivel de alarmas alta y baja y con niveles de operación alto y bajo.

Los niveles alto y bajo encienden y apagan, según corresponda y de manera automática el sistema de agitación tipo ancla con el que están equipados los tanques. Y las alarmas alta y baja apagan el bombeo hacia los tanques de homogenización o desde los mismos. La velocidad de giro del agitador se podrá ajustar entre 3 y 9 RPM de acuerdo con la viscosidad.

Los tanques tiene dos modos de operación: llenado y envío. En la primera se abrirá la válvula automática de llenado (A/B) y en el segundo se abrirá la válvula automática de evacuación (A/B).

La bombas de alimentación de la tricanter (A/B) trabajan de manera automática siempre que el nivel en el tanque de homogenización sea superior a la alarma de bajo nivel (LLA) y se apagan al llegar a este nivel o 10 segundos después de que arranquen si la presión de descarga no se eleva, para lo cual se cuenta con un presóstato a la descarga de dichas bombas. Adicionalmente si el nivel en los tanques de agua y aceite recuperado es muy alto, las bombas de la tricanter se apagarán.

El material es enviado a un intercambiador de calor tipo espiral o el recomendado por la ingeniería básica que usará agua tratada caliente del STAP para elevar la temperatura del material previo a la alimentación de la tricanter. El flujo puede ser desviado y no pasar por el intercambiador de calor. Esta operación de desviar o no el flujo hacia el intercambiador será manual.

Debido a la baja presión de la línea de agua caliente del STAP es necesaria la instalación de un tanque de agua caliente para la operación del intercambiador. El llenado de este tanque se hará de manera automática con una válvula proporcional para mantener el nivel del tanque.

El intercambiador de calor tiene un lazo de control entre la temperatura del material a tratar y el caudal de agua caliente proveniente del STAP. Para esto se tiene una válvula proporcional y un sensor de temperatura. El set-Pont de temperatura se podrá ajustar desde el tablero de control.

Se tendrá un sistema de control de pH el cual dosificará ácido para disminuir el valor del mismo y llevarlo al nivel requerido para la separación.

Se tendrá un sistema de preparación automático de floculante cuya bomba de dosificación al igual que la bomba dosificadora del control de pH estarán enlazadas a la operación de los motores de la tricanter y al bombeo hacia la tricanter.

De la tricanter se obtienen 3 corrientes: lodo deshidratado, agua aceitosa y emulsión crudo-agua.

El lodo es descargado directamente en las tolvas (A/B) que se tendrán bajo la plataforma de la tricanter, seleccionando una de las dos tolvas con una compuerta manual para ello.

El aceite y el agua se enviarán por gravedad a los tanques de aceite y agua o de regreso a las piscinas de preparación para lo cual se tienen válvulas automáticas en cada corriente: llegada de agua al tanque o retorno, y llegada de aceite al tanque o de retorno, adicionalmente debe estar abierta la válvula de retorno a las piscinas y cerradas las válvulas de llegada al tanques de enjuague y las válvulas y de retorno a los tanques de CIP (Para lavado y mantenimiento de la tricanter).

Cuando el motor principal de la tricanter se apague, se debe hacer un enjuague de la misma para evitar la acumulación de sólidos. Esta operación es totalmente automática, aunque se deberá poder hacer un enjuague cada vez que se requiera. Para el enjuague automático se debe cerrar abrir la válvula de descarga del tanque de enjuague y cerrar las válvulas de descarga (A/B) de los tanques de homogenización. Se debe continuar con el bombeo por el tiempo que sea requerido hasta que se verifique que la tricanter esté limpia, este tiempo debe poder ser fijado de acuerdo con la experiencia en la operación. Durante el enjuague las válvulas de llenado de los tanques de aceite y agua se deberán cerrar para retornar el agua de enjuague a las piscinas.

La operación de CIP iniciará con un enjuague de la tricanter siguiendo el proceso normal para esta operación, luego se abrirá la válvula de descarga del tanque de CIP correspondiente (A/B) y se cerrará la válvula de descarga del tanque de enjuague. Se hará la recirculación del agua a través de la tricanter y de retorno al tanque de CIP mientras se dosifica el producto para el lavado químico según el lavado que se haga: lavado ácido o alcalino. Estas se deberán apagar al cabo de un tiempo seleccionado por el operador.

Una vez concluido el CIP se enviarán las soluciones de CIP al tanque de agua de la tricanter desde donde serán posteriormente enviadas al STAP.

Los tanques y las piscinas cuentan con entradas de agua tratada caliente del STAP para acondicionamiento del material o para uso en enjuagues y CIP. Las válvulas son automáticas y se deberán accionar desde el tablero de control. Su apertura estará limitada por las alarmas de alto nivel de cada uno de los tanques para evitar reboses.

El bombeo del agua aceitosa recuperada y del aceite recuperado se hará continuamente variando la velocidad del variador de las bombas que despachan estas corrientes al STAP y al colector de aceite. La velocidad deberá variar en función del nivel en el tanque.

#### ➤ Filosofía de control

Las plantas de tratamiento de lodos de la GEC contará con los siguientes equipos principales:

- ✓ Piscinas de recepción
- ✓ Tanques de Homogenización
- ✓ Tanques de Flush
- ✓ Tanques de CIP
- ✓ Bombas de Alimentación de la Tricanter
- ✓ Tanque de Agua Caliente
- ✓ Intercambiador de Calor
- ✓ Tanque de Aceite Recuperado
- ✓ Tanque de Agua Recuperada
- ✓ Sistema de Preparación y Dosificación de Floculante
- ✓ Piscinas de recepción

Los instrumentos para control son:

- Un (1) transmisor e indicador de nivel por radar.

El transmisor e indicador de nivel permitirá alertar al operador si el nivel es alto, además de proteger las bombas de envío a los tanques de homogenización para evitar que trabajen en vacío, para lo cual se debe configurar una alarma de alto nivel y una de bajo. Estos niveles podrán ser monitoreados en el CCM de la planta.

✓ Tanques de homogenización

Los tanques de homogenización tendrán los siguientes instrumentos y Sistemas de Control:

- o Un (1) medidor y transmisor de nivel por radar.
- o Una (1) Válvulas ON/OFF en la entrada
- o Una (1) Válvula ON/OFF en la salida.
- o Una (1) válvula ON/OFF en la línea de retorno.
- o Una (1) Válvula ON/OFF en la línea de llegada de agua caliente del STAP.
- o Un (1) Indicador de temperatura

Toda la instrumentación asociada enviará sus señales al PLC.

El medidor de Nivel permitirá dar señales de alarma en caso de bajo nivel, para proteger las bombas de alimentación de la tricanter, y de alto nivel para apagar las bombas de envío desde las piscinas. Adicionalmente tendrá niveles alto y bajo para el encendido y apagado del sistema de agitación.

Las válvulas de llegada de agua caliente desde el STAP se accionarán manualmente según lo requiera la operación.

✓ Tanques de CIP y Flush

Los tanques de CIP y Flush tendrán los siguientes instrumentos y Sistemas de Control:

- o Un (1) medidor y transmisor de nivel por presión diferencial.
- o Una (1) Válvulas ON/OFF en la entrada
- o Una (1) Válvula ON/OFF en la salida.
- o Una (1) Válvula ON/OFF en la línea de llegada de agua caliente del STAP.
- o Un (1) Indicador de temperatura

El medidor de Nivel permitirá dar señales de alarma en caso de bajo nivel, para proteger las bombas de alimentación de la tricanter, y de alto nivel para cerrar las válvulas de entrada de agua proveniente del STAP.

✓ Bombas de alimentación de a la Tricanter

Las bombas de alimentación de la tricanter tienen los siguientes instrumentos de control:

- o Un (1) Presostato en la descarga

El presostato protegerá la bomba de trabajaren vacío, para lo cual si la presión no sube al valor de operación 5 a 20 segundos después de que el motor de la bomba ha arrancado se deberá dar una alarma de baja presión y apagar la bomba.

✓ Tanque de agua caliente

El tanque de Agua Caliente tendrá los siguientes instrumentos y Sistemas de Control:

- o Un (1) medidor y transmisor de nivel por presión diferencial.
- o Una (1) Válvulas ON/OFF en la entrada

El medidor de Nivel permitirá dar señales de alarma en caso de bajo nivel, para proteger las bombas que alimentan el intercambiador de calor y tendrán un alto y bajo nivel para permitir el

ingreso de agua para mantener el nivel del tanque de agua caliente con agua proveniente del STAP.

- ✓ Intercambiador de calor

El Intercambiador de Calor tendrá los siguientes instrumentos y Sistemas de Control:

- o Un (1) medidor y transmisor de Temperatura a la salida de las borras aceitosas.
- o Cuatro (4) Indicadores de Temperatura, una en cada una de las líneas de proceso.
- o Cuatro (4) indicadores de Presión, uno en cada una de las líneas para verificar que no haya ensuciamiento en el intercambiador.
- o Una (1) válvula proporcional en la línea de agua caliente a la salida del intercambiador.
- o Dos (2) válvulas proporcionales, una en la línea alimentación de la tricanter y otra en la línea de retorno de lodos a los tanques de homogenización.
- o Dos (2) medidores de Flujo.

Se tendrá un lazo de control entre el caudal de agua de calentamiento y la temperatura del lodo.

El caudal a través del intercambiador de calor deberá ser siempre 15 m<sup>3</sup>/hr, pero este caudal no necesariamente será el alimentado a la tricanter, por lo cual se retornará una parte del lodo a los tanques de homogenización.

- ✓ Tanque de aceite recuperado y de agua aceitosa

Los tanques de Aceite y Agua tendrán los siguientes instrumentos y Sistemas de Control:

- o Un (1) medidor y transmisor de nivel por presión diferencial.
- o Una (1) Válvulas ON/OFF en la entrada
- o Un (1) Indicador de temperatura

El medidor de Nivel permitirá dar señales de alarma en caso de bajo nivel, para proteger las bombas de aceite o agua según sea el caso, de alto nivel para alertar el operador.

- ✓ Sistema de preparación y dosificación de floculante

Dentro del sistema de preparación de floculante se cuenta el tanque de agua fría proveniente del STAP, que contará con los siguientes instrumentos y Sistemas de Control:

- o Un (1) medidor y transmisor de nivel por presión diferencial.
- o Una (1) Válvulas ON/OFF en la entrada

El medidor de Nivel permitirá dar señales de alarma en caso de alto o bajo nivel. Y permitirá abrir o cerrar la válvula de entrada al tanque para mantener el nivel adecuado para el funcionamiento del sistema.