Estrategia de simulacion hidrologica en la cuenca del rio Nech

Nicolas Mateo Chamat Ovalle, nmchamato@unal.edu.co

C.C. 1017243402

Danilo Gonzalez Tirado, dagonzalesti@unal.edu.co

C.C. 1036648562

Vanessa Alexandra Lopera Mazo, valoperam@unal.edu.co

C.C. 1036959689

Mariana Lopez Roldan, marlopezrol.edu.co

C.C. 1152219280

Carlos Alejandro Martinez Reyes, caamartinezre@unal.edu.co

C.C. 1116801476

Juan David Osorio Henao, jdosorioh@unal.edu.co

C.C. 1017229540

Daniela Perez Pulgarin, dperezp@unal.edu.co

C.C. 1152196219

Michael Sanchez Lopez, misanchezlo@unal.edu.co

C.C. 1216724716

Seminario de Proyectos en Ingeniera III

FACULTAD DE MINAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE MEDELLIN

2018

Indice General

1. Introducción 1

2. Planteamiento de problema y objetivos 3

3. Normativa 4
   - 3.1. Normativa de software libre 4
   - 3.2. Normativa ambiental 4
   - 3.3. Evaluación de impacto ambiental 5

4. Estudio de Mercado 6

5. Estudio de Costos 8

6. Estudio técnico 10
   - 6.1. Selección del modelo hidrológico 10
   - 6.2. Localización de la Cuenca 11
   - 6.3. Información disponible 12
   - 6.4. Geomorfología de la cuenca 13
   - 6.5. Cálculo de mapas de parámetros sobre la cuenca 14
   - 6.6. Generación de campos de precipitación, Metodología IDW 16
   - 6.7. Cuantificación de la bondad de ajuste del modelo: Eficiencia de Nash-Sutcliffe . . 17
   - 6.8. Proceso de calibración y validación del modelo 17

7. Conclusiones y recomendaciones 19

8. Anexos 20

1. Introducción

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica facilita el tratamiento de información hidrológica, al integrarse con los resultados de las modelaciones hidrológicas esta información puede ser incorporada al proceso de toma de decisiones y en la ordenación de territorio (Pacheco Moya, 2012). Un modelo hidrológico permite determinar el comportamiento de los flujos reales, estos son especialmente utilizados en la gestión de operaciones aluviales donde sirve como insumo para el análisis de escenarios como: los cambios climáticos, cambios de cobertura, determinar el comportamiento del régimen de caudales en la cuenca, la relación entre la cuenca y el nivel de tala de árboles en la región, incremento de la intensidad de precipitación, y otros. El modelo hidrológico es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones respecto a la explotación y remediación del impacto en la zona. Esto permite que Mineros S.A. desarrolle estrategias con menor incertidumbre para establecer mecanismos acordes a su política de responsabilidad social y ambiental.

La zona de explotación se ubica en la cuenca del río Nech entre las subcuencas de quebrada de San Pedro y la subcuenca del río Cacer. Las operaciones desarrolladas por el grupo Mineros S.A. se centran en la exploración, explotación y recuperación del ecosistema; el proceso de extracción se realiza bajo una técnica que consiste en la utilización de dragas de succión y de cucharas que alcanzan una profundidad de 30 metros, a su paso se crean cúmulos de sedimentos que son depositados en rellenos hidráulicos. El área intervenida no tiene contacto directo con el cauce del río y como medida preventiva se instaló una secuencia de jarillones para evitar el contacto por inundaciones. Pese a esto en el Grupo empresarial surge una preocupación medio ambiental con el transporte de sedimentos hacia el río Nech que pueden ocasionar alteraciones irreversibles en el ecosistema, y por tanto sanciones monetarias por parte de la autoridad ambiental colombiana. Bajo esta necesidad se realizó un estudio para determinar el comportamiento de los flujos reales en la zona mediante un modelo hidrológico que sirva como recurso de apoyo para la toma de decisiones en la operación del Grupo empresarial.

Debido a la necesidad reconocida por el Grupo empresarial se pretendió alinear la estructuración del trabajo bajo la metodología de diseño de George Dieter, la cual se adaptó para, además, facilitar la validación del modelo. Se realizó una búsqueda de información disponible sobre las estaciones hidrológicas y meteorológicas dispuestas por el IDEAM sobre (o cerca) del afluente principal en la cuenca para determinar los datos del caudal y precipitaciones, respectivamente; también se obtuvo el mapa de coberturas del IDEAM y el mapa de suelos del IGAC (en resolución 1:100.000, ambos), y, el modelo de elevación digital de Alos Palsar con las coordenadas de salida de la cuenca. Con esta información se comparó y determinó que el modelo que mejor se adapta a los requerimientos del cliente y al objetivo de la simulación es el modelo hidrológico distribuido SHIA Vélez Upegui y Francés García (2008) integrado en la herramienta WMF propuesta por Velázquez (2011). En la estructuración del modelo se calcularon los parámetros de permeabilidad y capacidad de almacenamiento del suelo usados en la ecuación general del modelo.

Para llevar a cabo el proceso de calibración y validación del modelo se tomó como referencia

la estacion hidrologica del IDEAM llamada La Esperanza, ubicada aguas abajo de la cuenca. Finalmente, en el proceso se logra obtener un coeficiente de eficiencia Nash-Suctlife equivalente a 0.73 denotando como \ Muy Bueno " el ajuste del modelo, segun la tabla 6.1.

2. Planteamiento de problema y objetivos

Reconocimiento de la necesidad

Teniendo en cuenta los requerimientos de Mineros S.A. y las problematicas que surgen en el cauce del Ro Nech, La Republica (2018); se observa que es necesario un modelo hidrobgico que permita a dicha empresa la evaluacbn y predicc bn de la fuente uvial en la que se presenta la operacbn de la compa-ia, esto al darse variaciones en las condiciones climaticas de la zona.

Problema

La empresa Mineros S.A. actualmente ejecuta un proyecto de extraccbn de oro en el Ro Nech, Bagre - Antioquia. Este proceso se hace por medio de dragas de succbn y de cucharas. En el campo hidrobgico la empresa debe tomar decisiones bajo un alto grado de incertidumbre, dado que se realiza de forma emprica o basada en la experiencia de los colaboradores y la interpretacbn de algunos estudios hidrobgicos previos. Es por esto que se hace necesario desarrollar un modelo hidrobgico que le permita describir el comportamiento en la cuenca y simular escenarios espacio - temporales (precipitacbn, cobertura).

Objetivo

Simular hidrobgicamente la Cuenca del Ro Nech.

Informacbn de la Cuenca

La cuenca del Ro Nech esta ubicada en el nororiente antioque-no, su extensbn es de 14500 Km^2 y se caracteriza por altas precipitaciones pluviales. Se constituye como uno de los principales a uentes del ro Cauca. El regimen de caudales para el ro Nech altera el regimen de aguas del ro Cauca, lo que favorece la capacidad de transporte de sedimentos. La cuenca esta constituida por 13 subcuencas, este estudio se centra en la subcuenca de quebrada San Pedro y la subcuenca del ro Cacer (incluye al ca-no sabalito). La primera de estas, presenta fuertes pendientes en la parte alta de la cuenca, su cobertura boscosa es del 40 % al 60 %, en la parte media y baja de la cuenca pese a que se mantienen pendientes planas el caudal es fuerte, correntoso y presenta cadas de aguas. La segunda subcuenca se caracteriza por mayor sedimentacbn debido a la alta exposicbn minera y adema-as, posee un cauce deteriorado. Trejo Arteaga (2000)

3. Normativa

3.1. Normativa de software libre

En Colombia, existe la \Ley de propiedad Intelectual", tambien llamada \Ley de propiedad cient ca, literaria y artstica" (Ley 11723, 1933) , la cual se encarga de regular el derecho de propiedad de una obra y establece sanciones para aquellos que violen la normativa, esta fue actualizada en el ano de 1998 para adicionar modi caciones respecto al software. Debido al costo de las licencias y por la libertad en los datos se debe priorizar el software libre.

3.2. Normativa ambiental

DECRETO 3930 de 2010 menciona los parametros a cumplir en la generacion de vertimientos en fuentes hdricas, por actividades domesticas, comerciales e industriales. Se de ne una entidad ambiental que regule los rangos permisibles en las actividades de la empresa, con el n de no tener repercusiones en el ecosistema de la zona, en este caso, CORANTIOQUIA es la entidad que proporciona los valores lmites de sedimentos permisibles en su actividad minera, ademas se encarga de supervisar y monitorear las condiciones de operacion (Alcalda Mayor de Bogota, 2010).

Teniendo en cuenta la importancia de las licencias ambientales se realizo una entrevista con Luz Marina Salgado Gutierrez, abogada especializada en servicios medioambientales radicada en la o cina principal de CORANTIOQUIA en Medelln, donde se extrajo la informacion siguiente.

El da 12 de diciembre de 2017 bajo la resolucion 160PZ-RES17126998 es concedida la licencia ambiental para la extraccion en las zonas con nadas ubicadas en El Bagre y Amacer, destinadas a operacion aluvial, certi cando por medio de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) el no requerimiento de permisos para deposito de vertimientos sobre la cuenca dado el uso de fosas semiabiertas para el deposito de sedimentos, aun as, son requeridas por CORANTIOQUIA cuanti caciones del deposito de sedimentos sobre la cuenca en los informes tecnicos que habran sido prorrogados por 6 meses desde el pasado 14 de Febrero.

Por su parte, la LEY 1333 DE 2009 estipula las sanciones correspondientes al impacto ambiental que causa una entidad al afectar el ecosistema con el suministro de lquidos y solidos en un cuerpo de agua. La sancion puede ser hasta 5000 SMMLV diarios y tambien puede haber una suspension parcial o total de las actividades.(CONGRESO DE LA REPUBLICA, 2009)

Cabe mencionar que estos valores mencionados, corresponden a la multa mas alta que podra tener una empresa y que dista en gran medida a las multas ya puestas a algunas entidades en Colombia por vertimientos en cuerpos de agua. Cuyos valores mas elevados encontrados fueron de 889 millones de pesos.

Han habido sanciones por vertimiento de sustancias en los cuerpos de agua, por exceder los niveles maximos permisibles, interpuestos por la autoridad ambiental correspondiente; este estos se encuentra el caso de el humedal Gual, en el que la autoridad CAR (Corporacion Autonoma Regional de Cundinamarca), interpuso una sancion a las empresas Urbanos Logsticas S. en C. y Ajecolombia S.A. de 889 millones de COP(RCN, 2017).

Otro caso de analisis se ha presentado en el ro, donde CORANTIOQUIA ha sancionro en los anos (2013-2016) a cinco empresas por el vertimiento de sustancias qumicas al ro Medelln, la sancion ha variado de (6 - 300) millones de COP(El Colombiano, 2016).

3.3. Evaluacion de impacto ambiental

Para determinar los impactos ambientales al implementar el modelo hidrobgico, se hizo uso de la Matriz de Evaluacion de Impacto Ambiental - EIA. (Ver anexo Tabla 8.1), en la cual se estiman dimensiones fsicas, bioticas, economicas, culturales y polticas, logrando identi car diferentes impactos positivos, como la preservacion del ecosistema.

4. Estudio de Mercado

El estudio de mercado se realizo al contactar las empresas SHI Colombia y GMS, estas nos brindaron informacion acerca de los modelos hidrobgicos que ofrecerian a Mineros S.A. y el costo asociado.

Se usa la metolodologa de las 4C, debido a que se busca satisfacer la necesidad que tiene Mineros S.A. respecto al modelo hidrologico. La siguiente tabla presenta el estudio:

Tabla 4.1: Analisis de Estudio de Mercado

Empresa	Cliente	Costo	Conveniencia	Comunicacion
SHI Colombia	Modelo distribuido TETIS. Simulacion hidrobgica, ciclo de sedimentos y ciclo de nitrogeno.	$12'500,000 + IVA	Entrega del producto por medio de correo electronico	Pagina web y contacto de la empresa interesada
GMS	Modelo distribuido. Simulacion hidrobgica realizada en un plazo de 60 das estudio y 30 das para obtener informacion del IDEAM. No incluye topografa de la zona.	$18'540,000 + IVA	Entrega del producto por medio de correo electronico	Pagina web y contacto de la empresa interesada
SPI 3	Modelo distribuido SHIA. Simulacion hidrobgica con: Resolucion temporal: diaria Resolucion espacial: 120 metros Modelo distribuido Salida: serie simulada de caudales	$21'226,621 + IVA	Entrega del producto por medio de correo electronico y fsico. Posible montaje y capacitacion del modelo SHIA para la empresa Mineros S.A. (costo agregado)	Proyecto planeado

El valor agregado con el que se cuenta como proyecto es que se realiza el modelo con la necesidad espec ca de Mineros S.A., ademas del posible montaje y capacitacion para que la

empresa le de un uso futuro al modelo en la toma de decisiones, permitiendoles analizar escenarios de precipitacion actuales (por medio de los datos historicos proporcionados por el IDEAM) o futuros (generados como escenarios de cambio climatico) y escenarios de cambios de coberturas en la zona (deforestacion, reforestacion, cambio de usos del suelo, entre otros.) y la respuesta que tendra la cuenca ante ellos en terminos de sus caudales.

5. Estudio de Costos

Para estimar los costos, se divide el proyecto en 2 fases (Ver tabla 5.1):

1. Costos asociados a la simulación hidrológica y la entrega de los resultados

Se incluyen los costos directos (capital de trabajo), costos indirectos (depreciación equipos) y el margen que corresponde a la universidad.

2. Costos de asesoría y capacitación sobre el manejo del software y el modelo hidrológico (esta fase se desarrolla si el cliente está interesado en conocer el desarrollo para implementarlo como herramienta de gestión y planeación)

Se incluyen los costos directos, el margen de la universidad y adicionalmente se especifican las condiciones mínimas requeridas para desarrollar la fase de capacitación (Colaborador ingeniero de Mineros S.A; PC Core i7, RAM 16GB, SO ubuntu, WMF software)

Ahora bien, para determinar la viabilidad del proyecto, se ha analizado el impacto que tendría la toma de decisiones con la implementación del modelo, en este caso se tiene en cuenta que el desconocimiento del comportamiento hidrológico de la zona, podría generar el vertimiento de sedimentos en humedales y el río Nech, que generaría una emergencia ambiental en el ecosistema.

Para estimar la sanción que la autoridad ambiental podría imponer a Mineros S.A por vertimientos de alto impacto en el ecosistema, se utiliza la metodología para la tasación de multas consagradas en el numeral 1. del art. 40 de la ley 1333 del 21 de julio de 2009, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2009) la cual tiene en cuenta los siguientes criterios:

Beneficio ilícito, el cual consta de ingresos directos, costos evitados o ahorros de retrasos; Factor de temporalidad; Grado de afectación ambiental; Circunstancias agravantes y atenuantes; Costos asociados; Capacidad socioeconómica del infractor

De acuerdo a los criterios mencionados, y su relación en términos monetarios (Ver anexo Tabla 8.2) se estima una multa por valor de: 3'462.397.561 COP, la cual puede variar de acuerdo a las particularidades del caso, y el impacto ambiental generado.

Se establece entonces la siguiente relación Costo - Beneficio:

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costo}} = \frac{3462397561}{33262873} = 104 \tag{5.1}$$

Adicionalmente, Mineros S.A como persona jurídica que hace uso de recursos hídricos para su operación, debe hacer el pago anual de una tasa retributiva por vertimientos de acuerdo al Decreto 2667 del 2012, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012), la cual se cobra de acuerdo a la carga contaminante diaria, y que puede disminuir significativamente al tener conocimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca, obtener el modelo como herramienta de gestión y planeación, e implementar las medidas correspondientes de mitigación.

Tabla 5.1: Estimación de costos

	Concepto	Horas	$/hora	Total
Fase 1. Resultados de la simulación hidrológica	Asesora docente UN	4	$ 300.000	$ 1.500.000
	Asesora Profesional	10	$ 150.000	$ 1.200.000
	Estímulo estudiantes	640	$ 19.531	$ 12.499.872
	Costo de uso de equipos (5 %)			$ 759.994
	Software libre			-
	Margen UN (33 %)			$ 5.266.756
	Total sin IVA			$ 21.226.621
Fase 2. Asesora en el manejo del software y el modelo hidrológico	Asesora estudiantes	12	$ 180.000	$ 2.160.000
	Transporte			$ 64.800
	Margen UN (33 %)			$ 712.800
	Total sin IVA			$ 2.937.600
	Requerimientos			
	Ingeniero a capacitar	12	$ 25.621	$307.450
	Hardware			$ 4.200.000

6. Estudio tecnico

6.1. Seleccion del modelo hidrologico

Los modelos hidrologicos se proponen, como lo manifiesta Cabrera (2013), para entender el funcionamiento y comportamiento de los elementos que componen un ciclo hidrologico, los cuales son usados como herramienta de gestion y planeacion, para modelar escenarios futuros a partir de parametros actuales, entre otras.

Segun Cabrera (2013), los modelos hidrologicos se pueden clasificar de acuerdo a

- Conceptualizacion de los procesos basico: conceptuales, basados en procesos o empricos

- Naturaleza de los algoritmos basicos: determinsticos o estocasticos

- Representacion espacial: agregados o distribuidos

El desarrollo y aplicacion de los modelos hidrologicos agregados y distribuidos han sido adaptados a las necesidades, prioridades y avances tecnologicos. Actualmente, como lo menciona Velazquez (2011), por los avances en computacion y los sistemas de informacion geografica, se desarrollan mas modelos donde la informacion se encuentra distribuida teniendo en cuenta que tiene mayor aproximacion a la realidad.

En los modelos agregados se asume que la cuenca es homogenea, como lo define Cabrera (2013), supuesto basado en las limitaciones dadas al momento de hacer la modelacion de cuencas por la poca informacion y desconocimiento de los procesos y propiedades del suelo. Sin embargo, considerar una cuenca homogenea podra ser valido solo para cuencas de tamaño reducido.

Adicionalmente en este modelo se pueden evidenciar diferentes limitaciones en cuanto a las simplificaciones que se deben hacer, la poca aplicabilidad ya que no es posible tener en cuenta gran parte de las variables existentes en los procesos fsicos que se presentan al interior de la cuenca, y asumir comportamientos lineales entre los volumenes de lluvia y la escorrenta superficial arrojando grandes errores para diferentes eventos (Velazquez, 2011).

Ahora bien, cuando la cuenca tiene un tamaño significativo, para tener una mayor aproximacion a los procesos que realmente ocurren en su interior se realizan divisiones de la cuenca, en un principio en sub-cuencas, hasta realizar discretizaciones mas finas en la misma, siendo los modelos hidrologicos distribuidos los que cumplen esta funcion.

De acuerdo con Velazquez (2011) para la discretizacion de tal espacio existen diferentes posibilidades y tecnicas, entre las cuales se destacan los modelos digitales de elevacion del terreno (MDE), la discretizacion a partir de triangulos irregulares o TIN, y en algunos casos en laderas como ocurre en el modelo KINEROS.

En este caso se realiza una discretizacion por medio de celdas dado que tiene ventajas como

la facilidad desde el punto de vista topologico para el manejo de una malla de celdas que puede ser de nida por ndices de la y columna, la facilidad de procesamiento de informacion digital distribuida en formato raster con tamano de celda compatible, la facilidad para el cambio de escalas y para llevar a cabo algebra de mapas (Velez Upegui, 2001).

El modelo hidrologico distribuido elegido es el modelo de Simulacion Hidrologica Abierta (SHIA) propuesto por Velez Upegui (2001) ya que luego de identi car y analizar los requerimientos del cliente, condiciones de la cuenca y diferentes tecnicas aplicadas en el modelamiento hidrologico, las cuales son evaluadas bajo los criterios: tipo (emprico o conceptual), accesibilidad, requerimiento de datos y resultados, se concluye que es es modelo mas adecuado para ser aplicado en la zona objetivo del proyecto.

Segun Velazquez (2011), este es un modelo fsico con el cual se pretende representar los procesos que se dan en la parte super cial e interna de la cuenca utilizando tanques de almacenamiento, enmarcando diferentes procesos en cada tanque.

Para el modelo se tiene como requerimiento la existencia de una conexion continua en la malla de la cuenca ya que bajo los parametros conceptuales cada celda en el modelo contiene 5 tanques como se observa de manera conceptual en la gura 8.12 en la seccion de anexos, los cuales se describen a continuacion:

Tanque 1. Parte superior que representa el almacentamiento capilar. El agua en este tanque sale por evaporacion.

Tanque 2. No hay un lmite de almacenamiento. Representa la escorrenta super cial, el agua que llega a este tanque proviene del tanque 1.

Tanque 3. Representa el almacentamiento subsuper cial

Tanque 4. Representa el almacenamiento en el acufero

Tanque 5. Representa el cauce en el terreno

6.2. Localizacion de la Cuenca

La cuenca en estudio se encuentra localizada en su mayor parte en el departamento de Antioquia y en un menor porcentaje en el departamento de Bolvar, como se puede observar en la gura 6.1

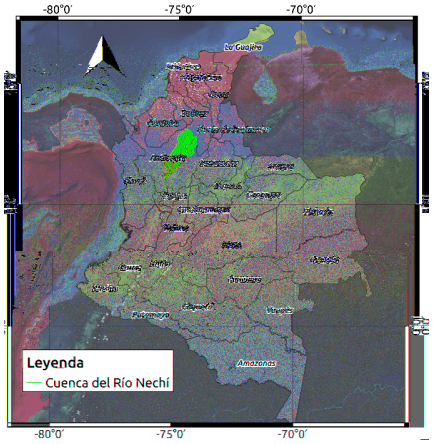

Figura 6.1: Localizacion de la cuenca del ro Nech sobre Colombia

El Ro Nech, es el a uente principal de dicha cuenca y vierte sus aguas al ro Cauca siendo su tributario mas importante. A su vez, el tributario mas importante del ro Nech es el ro Porce y cuenta con otros 12 que hacen que tenga un caudal promedio multianual de 88 m^3/s. El comportamiento del ciclo anual de dichos caudales se observa en la gura 6.2.

Sobre la cuenca se tiene una precipitacion media multianual de 2500 mm acumulados, estimada con las estaciones meteorobgicas del IDEAM sobre la misma. El comportamiento del ciclo anual de precipitacion se observa en la gura 6.2 el cual es bimodal al igual que el presentado en los caudales, con dos epocas de incremento de lluvia en el a-no

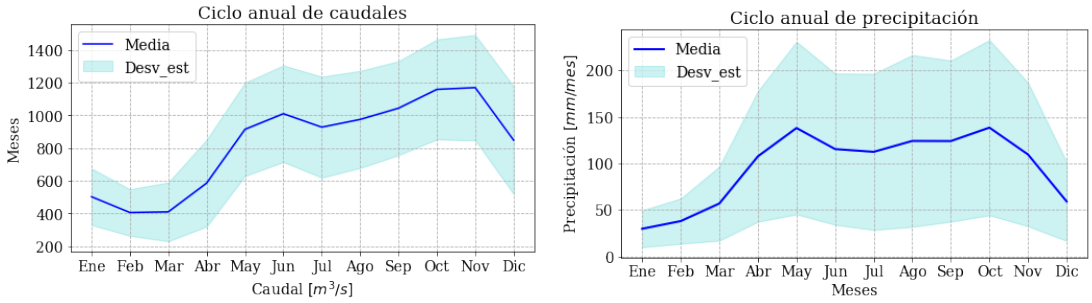

Figura 6.2: Ciclo anual del caudal del ro Nech (izquierda) y ciclo anual de precipitacion sobre la cuenca (derecha)

6.3. Informacion disponible

La implementacion de este modelo de base fsica sobre la cuenca requiere una gran cantidad de informacion, de cuya calidad depende el desempe-no del mismo. Para la parametrizacion de los procesos y la caracterizacion de los diferentes tanques se cuenta con informacion distribuida en escala 1:100000 de coberturas y suelos proporcionados por el IDEAM y el IGAC respectivamente. Estos de observan en las guras 8.2 y 8.3 de los anexos, despues de haber sido acotados para el area de estudio.

Para realizar el proceso de Validacion y Calibracion del modelo, se cuenta con informacion de Estaciones de precipitacion, las cuales seran llevadas a campos distribuidos y seran las entradas del modelo. Como punto de comparacion se tiene la serie de caudales en la estacion La Esperanza del IDEAM, disponible entre los a-nos 1966 y 2015, contra la cual sera comparado el caudal de simulado por la cuenca. Todas las estaciones disponibles sobre la cuenca y espec camente la serie de caudales de la estacion la esperanza se observan en la gura 6.3.

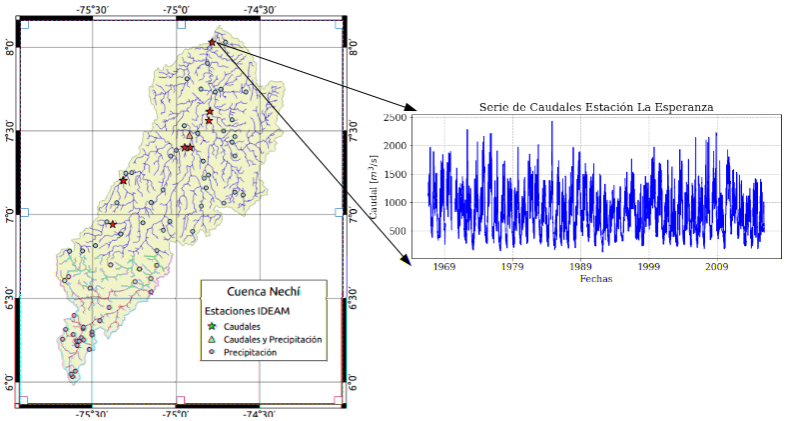

Figura 6.3: Estaciones hidrobgicas y meteorobgicas disponibles sobre la cuenca del ro Nech y Serie de Caudales de la estacbn la Esperanza ubicada sobre la corriente del mismo ro

6.4. Geomorfologa de la cuenca

Por medio del uso del modelo de elevacbn digital del terreno y del mapa de direcciones se realizo el trazado de la cuenca haciendo el uso de la herramienta WMF (Velazquez (2011)). La red trazada y la divisoria de aguas de la misma se observan en la gura 6.4

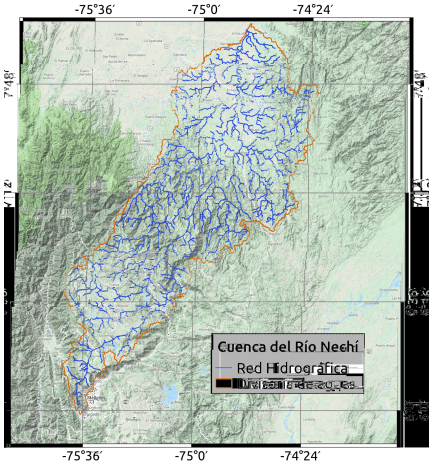

Figura 6.4: Red y divisoria de aguas trazadas mediante WMF para la cuenca del ro Nech

Posteriormente se realizo un analisis de las caracteristicas topogra cas y geomorfobgicas de la cuenca con el objetivo de tener bases para la comprensbn del comportamiento hidrobgico de la misma y la forma en la que responde a la precipitacbn.

En la desembocudaura de la cuenca al ro Cauca, esta se encuentra a una altura de 25 m:s:n:m:, mientras que la cuenca completa tiene una altura media de 1049 m:s:n:m:. Existe una diferencia de nivel de alrededor 3000 m desde la parte alta a la parte baja de la cuenca, dada su gran area y su ubicacbn sobre Antioquia. El mapa de elevacbn de la cuenca se observa en la gura 8.4 en los anexos.

Las pendientes sobre la cuenca son mayores en la parte media de la cuenca, mientras que en la parte baja y alta de la misma, no superan un 30 % como puede observarse en la gura 8.5 en

la seccion de anexos. Lo anterior tiene como consecuencia que el tiempo de respuesta o tiempo de concentracion estimado por diferentes metodologas (Velez y Botero, 2011) sea en promedio de 15 horas y que haya tiempos de viaje desde la parte alta de la cuenca de muchos das hasta la salida. Los resultados de la estimacion del tiempo de concentracion por diferentes metodologas se observan en la gura 6.5

Este comportamiento de la cuenca justi ca la implementacion del modelo diario, ya que la modelacion a escala de evento no sera muy representativa para una cuenca de respuesta lenta (Velez y Botero, 2011).

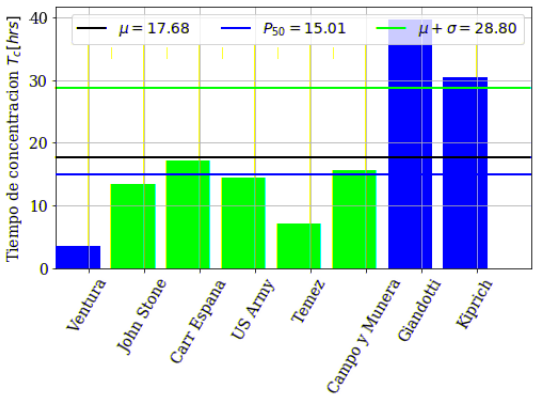

Figura 6.5: Tiempo de concentracion o respuesta de la cuenca

6.5. Calculo de mapas de parametros sobre la cuenca

Dado que no existen mediciones directas de los parametros y caracteristicas hidraulicas de las diferentes capas de suelos y super cie de la cuenca deben realizarse estimaciones a partir de la informacion disponible de coberturas, suelos y elevacion mencionados en las seccion de informacion disponible.

A continuacion se describen las metodologas para la estimacion de los parametros necesarios para la con guracion del modelo, las cuales han sido aplicadas antes en trabajos como el de Yepes (2016). Estos mapas de parametros son llevados posteriormente a un formato Raster con tamano de celda compatible con la resolucion en la que se trabaja la cuenca.

- Evapotranspitacion sobre la cuenca: la evapotranspiracion es estimada de manera distribuida sobre la cuenca por medio de la metodologa propuesta por Cenicafe (Robledo, 2006), la cual toma en cuenta unicamente la elevacion de cada pixel sobre la misma como se observa en la siguiente ecuacion:

$$ET_o = 4;37\exp(\ \ 0;0002\ \ A) \tag{6.1}$$

Donde:

ET_o es la evapotranspiracion en $\frac{mm}{dia}$

A es la altitud de cada pixel de la cuenca en metros sobre el nivel del mar.

El campo distribuido de evapotranspiracion se observa en la gura 8.6 en anexos

- Coe ciente de Rugosidad de Manning: este parametro es fundamental para la estimacion de la velocidad sobre el terreno la cual sera inversamente proporcional a este parametro. La relacion entre coberturas y este parametro fue propuesta por Chow y cols. (1994). El resumen de la propuesta se observa en la tabla 8.4 y el mapa para Nech se observa en la gura 8.7.

- Profundidad de raices: esta es necesaria para la estimacion de los almacenamientos maximos de las capas de suelo, lo cual se explicara en detalle para la estimacion de parametros a partir del mapa de suelos.

  Este parametro tambien se calcula a partir de tablas de relacion para la cobertura (ver tabla 8.5 en anexos) y su resultado se aprecia en la gura 8.7 en los anexos.

- Conductividad hidraulica del suelo y del subsuelo: para la estimacion de este parametro en las diferentes unidades de suelos se hizo uso del software libre SPAW (http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/SPAWDownload.html), el cual hace uso de las funciones empricas de pedotransferencia (Saxton y Rawls, 2006) para relacionar las caractersticas fsicas de los suelos como textura y granulometra con sus propiedades hidraulicas.

  La informacion de los porcentajes de arenas, limos y arcillas de los suelos para cada unidad de suelos fueron obtenidos de estudios de suelos realizados en la region. Con esta informacion se obtuvo para cada capa de suelo un valor de conductividad hidraulica por medio de SPAW y se calculo el tiempo de viaje en cada capa (Ecuacion 6.2). Posteriormente se estimo el tiempo de viaje total en la unidad de suelo (Ecuacion 6.3) y la conductividad hidraulica para dicha unidad (Ecuacion 6.4)

$$Tv_n = \frac{H_n}{Ks_n} \tag{6.2}$$

$$Tv_{total} = \sum_{i=1}^{n} Tv_n \tag{6.3}$$

$$Ks_{total} = \frac{H_{total}}{Tv_{total}} \tag{6.4}$$

  Donde:

  n: numero de capas del per l

  Tv_n: Tiempo de viaje de cada capa

  Ks_n: Permeabilidad hidraulica de cada capa (de SPAW)

  H_n: Espesor de cada capa del suelo

  La conductividad hidraulica en el subsuelo se estimo con la misma distribucion espacial que la del suelo, pero dos ordenes de magnitud por debajo de esta segun la siguiente ecuacion:

$$Kp = \frac{Ks}{100} \tag{6.5}$$

- Almacenamiento maximo capilar y gravitacional: tambien en este caso se hace uso de las funciones de pedotransferencia (Saxton y Rawls, 2006) por medio del software SPAW para estimar la humedad de saturacion, capacidad de campo y punto de marchitez de los suelos. La humedad de saturacion es la capacidad maxima de agua que puede ser contenida en el suelo, la capacidad de campo es la cantidad de agua que posee un suelo

Tabla 8.3: Relacion entre coberturas y profundidad de races

Cobertura	Manning
1.1.1. Tejido urbano continuo	0.025
1.2.5. Obras hidraulicas	0.025
2.2.1. Cultivos permanentes herbaceos	0.035
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	0.035
2.3.1. Pastos limpios	0.025
2.3.3. Pastos enmalezados	0.027
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0.025
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.05
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	0.05
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	0.05
3.1.1. Bosque denso	0.1
3.1.2. Bosque abierto	0.1
3.1.3. Bosque fragmentado	0.1
3.1.4. Bosque de galeria y ripario	0.1
3.1.5. Plantacion forestal	0.1
3.2.2. Arbustal	0.07
3.2.3. Vegetacion secundaria o en transicion	0.07
5.1.1. Rios (50 m)	0.025
5.1.4. Cuerpos de agua arti ciales	0.00001

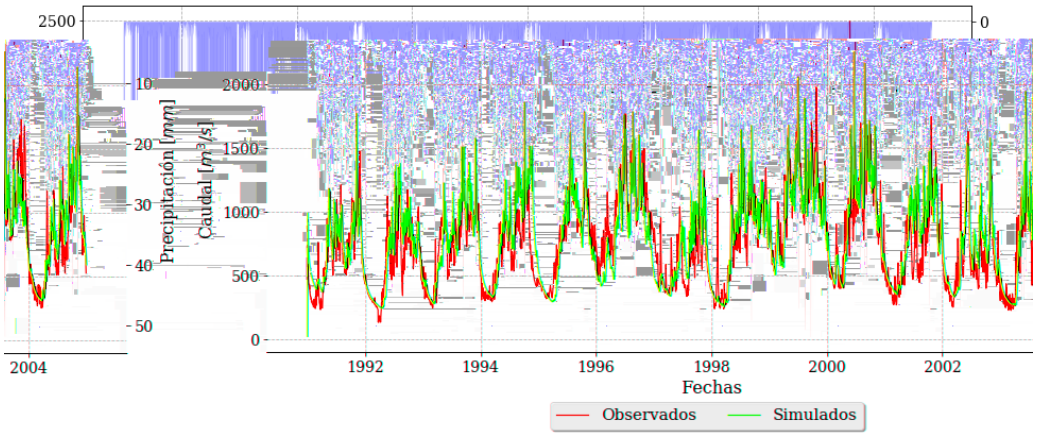

Figura 8.9: Serie de caudales observada y simulada en el periodo de calibracion. Ademas, la precipitacion media sobre la cuenca

Tabla 8.5: Relacion entre coberturas y profundidad de raices

cobertura	Z (cm)
Afloramientos rocosos	0.01
Playas, arenales y dunas	0.01
Tierras desnudas o degradadas	0.01
Arbustos y matorrales	100
Pastos naturales y sabanas herbaceas	50
Vegetacion de paramo y subparamo	100
Vegetacion esclerofila	100
Bosque de galeria y/o ripario	200
Bosque natural denso	200
Bosque natural fragmentado	200
Bosque plantado	200
Mosaico de cultivos	40
Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	50
Mosaico de pastos y cultivos	40
Mosaico de pastos y espacios naturales	50
Otros cultivos anuales o transitorios	40
Cafe	50
Canna panelera	40
Frutales	60
Otros cultivos permanentes	40
Platano y banano	40
Pastos arbolados	50
Pastos enmalezados o enrastrojados	60
Pastos limpios	40
Escombreras y vertederos	0.01
Zonas de extraccion minera	0.01
Obras hidraulicas	0.01
Zonas industriales o comerciales	0.01
Tejido urbano continuo	0.01
Tejido urbano discontinuo	0.01
Fincas de recreo - parcelaciones	30
Instalaciones recreativas	0.01

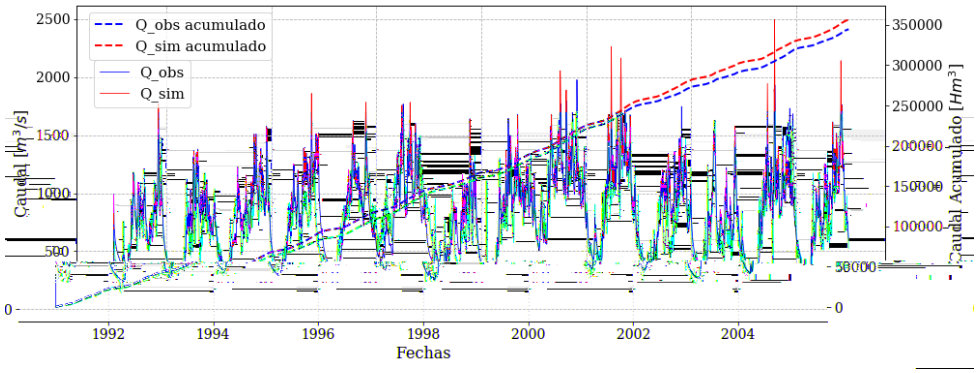

Figura 8.10: Serie de caudales observada y simulada en el periodo de calibracion. Ademas, caudales acumulados en todo el periodo de calibracion

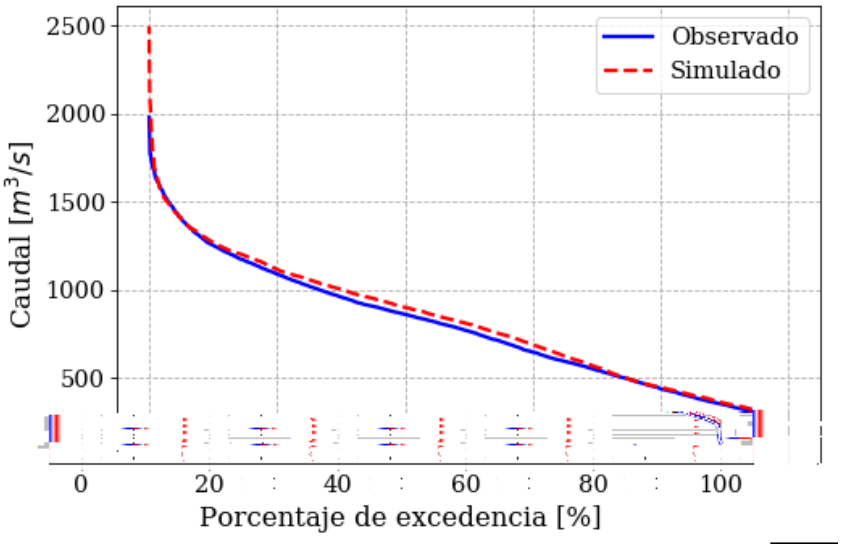

Figura 8.11: Curva de duracion de caudales para el periodo de calibracion

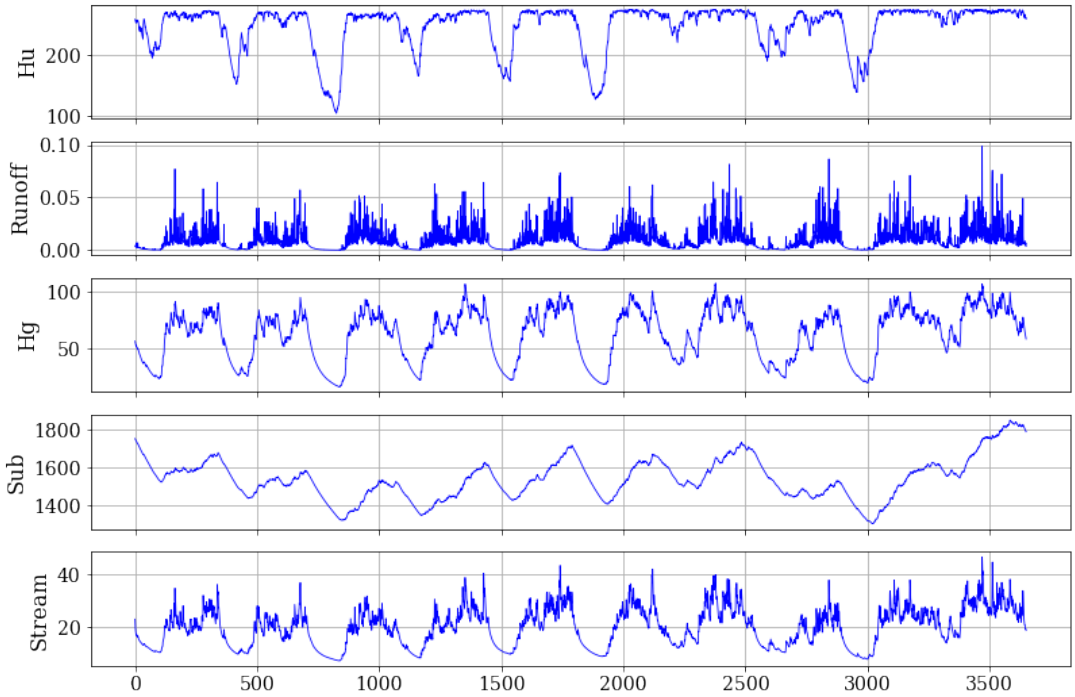

Figura 8.12: Curva de duracbn de caudales para el periodo de calibracbn

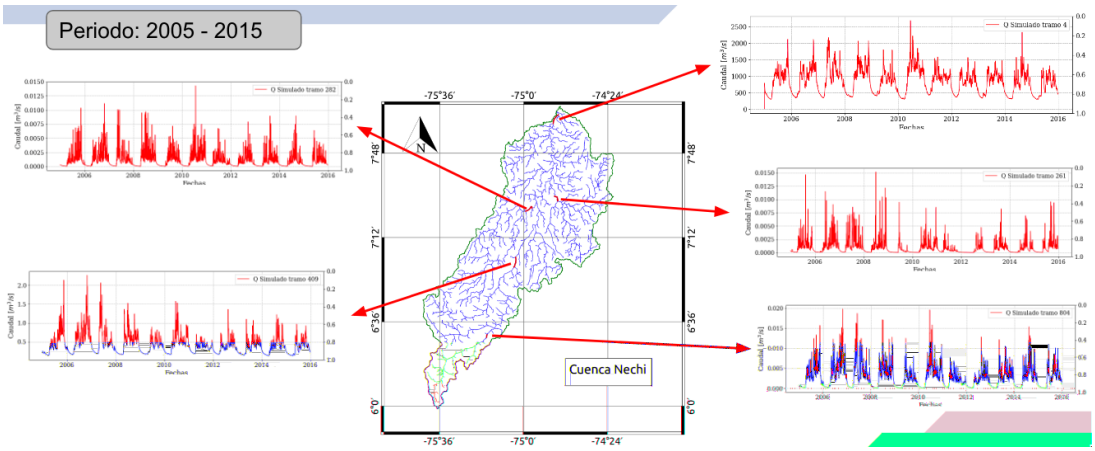

Figura 8.13: Curva de duracbn de caudales para el periodo de calibracbn

Referencias

Alcalda Mayor de Bogota. (2010). Decreto 3930 de 2010 Nivel NacionalDescargado 2018-07-08, de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620

Cabrera, J. (2013). Modelos Hidrobgicos. Descargado dehttp://www.imefen.uni.edu.pe/Temas{}interes/modhidro{_}1.pdf

Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). Hidrologa aplicada. McGraw-Hill.

CONGRESO DE LA REP UBLICA. (2009). Ley 1333 de 2009. Descargado 2018-07-08, de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley{_}1333{_}2009.html

El Colombiano. (2016). Las multas por vertimientos en el ro Medelln ascienden a los 500 millones de pesos.Descargado 2018-07-08, dehttp://www.elcolombiano.com/antioquia/las-multas-por-vertimientos-en-el-rio-medellin-ascienden-a-los-500-millones-de-pesos-YC4206375

La Republica. (2018, may). La empresa Mineros alerto sobre rompimiento de jarilbn en el municipio de Nech. Descargado dehttps://www.larepublica.co/economia/grupo-mineros-sa-alerta-sobre-rompimiento-de-jarillon-en-nechi-2729192

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2009). Tasacbn de multas, numeral 1 del artculo 40 de la Ley 1333. Descargado dehttp://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res{_}2086{_}251010.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Decreto 2667 de 2012 Nivel Nacional. Descargado dehttp://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=51042

Pacheco Moya, R. M. (2012). Ingenieria hidraulica y ambiental. (Vol. 33) (n.º 1). Centro de Investigaciones Hidraulicas, Instituto Superior Politecnico Jose Antonio Echeverria. Descargado dehttp://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci{_}arttext{&}pid=S1680-03382012000100008

RCN. (2017). Multa de 889 millones de pesos a dos companias de Funza por vertimientos al Humedal Gual | Noticias RCN. Descargado 2018-07-08, de https://www.noticiasrcn.com/nacional-regiones-centro/multa-889-millones-pesos-dos-companias-funza-vertimientos-al-humedal-guali

Robledo, A. J. (2006). EVAPOTRANSPIRACI ON DE REFERENCIA EN LA REGI ON ANDINA DE COLOMBIA. 288 Cenicafe, 57(4), 288{298. Descargado dehttps://www.cenicafe.org/es/publications/arc057{%}2804{%}29288-298.pdf