



DINAGUA
Dirección Nacional de Aguas

Uso del modelo SWAT para planificar la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Santa Lucía, Uruguay

- Proyecto piloto, subcuenca río Santa Lucía –

Entregable 1

Procesos, fuentes y criterios válidos de selección de información utilizada para los datos de entrada al modelo SWAT.
Registro de las capas y fuentes de información utilizados para llegar a los datos finales de entrada

Contenido

1	Introducción	4
2	Información de entrada al modelo SWAT	5
2.1	Modelo digital de terreno	5
2.2	Uso del suelo y manejo	5
2.2.1	Mapa de uso del suelo	5
2.2.2	Rotación y manejo	11
2.2.2.1	Rotaciones “tipo” consideradas	11
2.2.2.2	Operaciones simuladas en las rotaciones	14
2.2.2.3	Tabla de manejo (Swat Input Data: .mgt)	19
2.2.3	Cultivos	24
2.3	Suelo	28
2.3.1	Mapa de suelo	28
2.3.2	Características físicas de los suelos	30
2.3.3	Características químicas de suelo	35
2.4	Datos climáticos	38
2.5	Fuentes puntuales de contaminación	40
4	Identificar las debilidades de los datos de entrada para planear actividades futuras de fortalecimiento de datos	43
4.1	Uso del suelo y manejo	43
4.2	Suelo	43
4.3	Datos climáticos	43
4.4	Fuentes puntuales de contaminación	44
5	Implementación del modelo SWAT con los datos de entrada preparados anteriormente	45
5.1	Proceso de implementación	45
5.2	Database Access	45
5.3	STEP 1 Delineate Watershed	46
5.4	STEP 2 Create HRUs	47
5.5	STEP 3 Edit Input and Run SWAT	50
5.5.1	SWAT Simulation	55
5.5.2	Análisis SWAT Output	55
6	Bibliografía	62
	ANEXO I - Precipitacion media para las subcuencas de nivel 3 y 5 de la cuenca del río Santa Lucía	64

1 Introducción

El documento siguiente corresponde al entregable 1 del proyecto piloto del uso del modelo SWAT en la subcuenca río Santa Lucía.

El mismo contiene el proceso, las fuentes y los criterios de selección de la información usada para la implementación del modelo SWAT.

También, menciona las referencias de las capas e información usadas para llegar a los datos finales de entrada.

La Tabla 1 resume las actividades del componente 1.

1- Implementar el modelo SWAT con datos de entrada de calidad superior	
1.1	Preparación de los datos de entrada de mayor calidad para el modelo SWAT y establecer criterios e hipótesis para definir los datos usados: -Modelo digital del terreno Uso del suelo: - Combinar varias fuentes de usos de suelo (satelitales, planes de uso del suelo) - Agregar datos y prácticas de manejo (fecha de siembra, fecha de cosecha, fertilización, ...) para los usos de suelo relacionado a la agricultura - Crear una base de datos específica de parámetros de los usos de suelo en Uruguay - Obtener un mapa de suelo a escala 1:40000 y crear la tabla con los parámetros de cada tipo de suelo Clima: - Obtener datos de precipitación de las estaciones de monitoreo INUMET que están localizadas en la subcuenca - Realizar el control de calidad y procesamiento de los datos de precipitación Fuentes puntuales de contaminación: - Identificar y cuantificar las fuentes puntuales de contaminación industrial, doméstica y de lechería en la subcuenca para añadir al modelo
	1.2 Identificar las debilidades de los datos de entrada para planear actividades futuras de fortalecimiento de datos
	1.3 Implementación del modelo SWAT con los datos de entrada preparados anteriormente.
	1.4 Entregables: -Registrar en informes el proceso así como la fuente y los criterios válidos de selección de la información usada para los datos de entrada al modelo. -Registrar las capas e información usadas para llegar a los datos finales de entrada

Tabla 1: Actividades del componente 1

2 Información de entrada al modelo SWAT

2.1 Modelo digital de terreno

El modelo digital del terreno (DEM) usado proviene del MGAP-DGRN (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca- Dirección General de Recursos Naturales). Este DEM tiene una resolución espacial de 30 m x 30 m. La metodología aplicada esta descrita en la página siguiente: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-de-recursos-naturales/tramites-y-servicios/biblioteca-digital/modelo-digital-del-terreno>. En el mismo enlace se puede descargar el DEM. Se le hizo un corte en el dominio hidrológico de la subcuenca del río Santa Lucía.

2.2 Uso del suelo y manejo

2.2.1 Mapa de uso del suelo

Se eligió trabajar con los mapas de uso de suelo correspondientes a los años 2000 y 2015, ya que abarcan el periodo en el que se cuenta con monitoreos de calidad de agua en la cuenca. La metodología usada para crear los mapas de uso del suelo en la subcuenca río Santa Lucía fue la siguiente:

- 1- Las capas de base de uso del suelo son los mapas realizados por MVOTMA-DINOT que tiene como nombre “Land Cover Classification (LCCS) 2000 FAO” y “Land Cover Classification (LCCS) 2015 FAO”. Se pueden descargar estos mapas en el enlace siguiente: <http://sit.mvotma.gub.uy/websdados/cobertura.html>. En el mismo enlace se encuentra la leyenda de esta capa y la metodología aplicada.

La Figura 1 muestra el mapa base LCCS del año 2000 y la Figura 2 el mapa LCCS 2015.

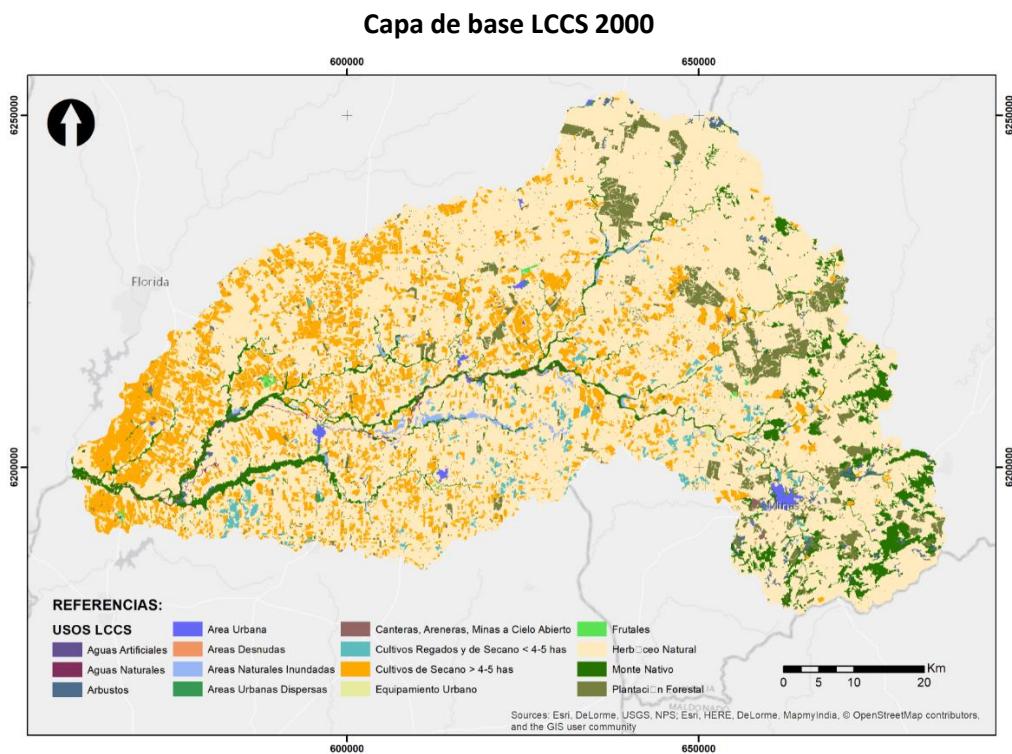


Figura 1: Mapa base LCCS 2000 (MVOTMA-DINOT)

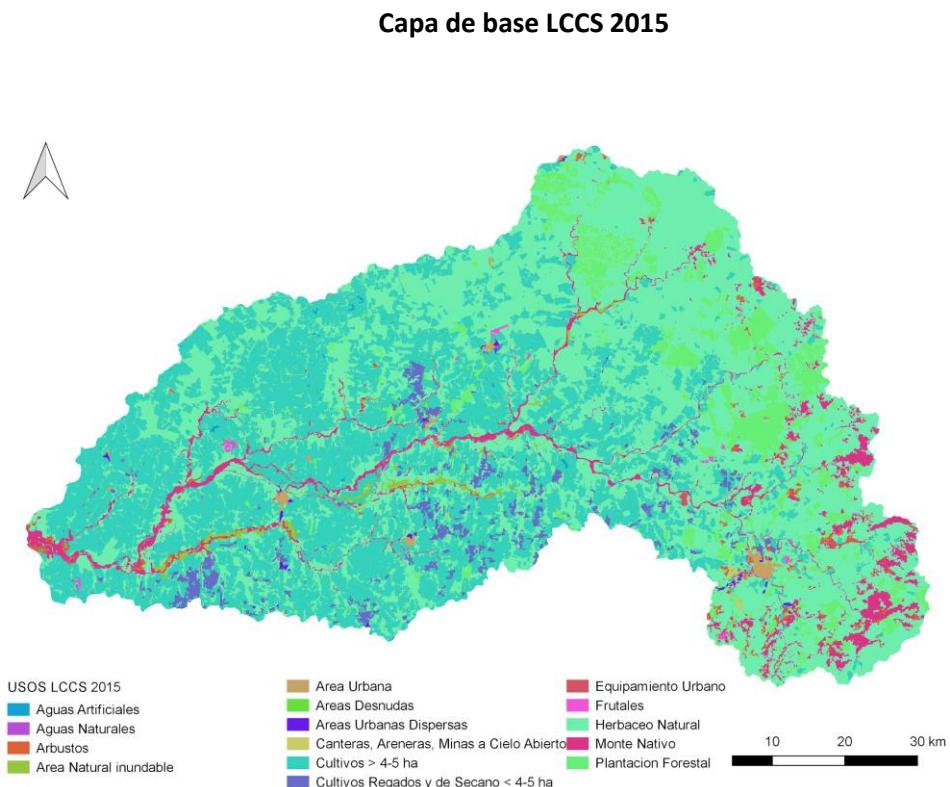


Figura 2: Mapa base LCCS 2015 (MVOTMA-DINOT)

2- Padrone lecheros (DICOSE)

Se intersecta la capa de base LCCS con la capa de padrones lecheros de la subcuenca obtenida por DICOSE del año 2016 (<http://www.mgap.gub.uy/institucional/datos-abiertos>). Esta capa representa la localización de los padrones que tiene como rubro de actividad tambos.

Los polígonos de cultivos LCCS 2000 con categoría “Cultivos de Secano > 4-5 has”, “Cultivos de Secano <4-5 has” y “Herbáceo natural” que se superponen a padrones lecheros fueron aislados y nominados con un nuevo uso de suelo que corresponde a la rotación más típica de los tambos en esta subcuenca: “Lechería”, con el código “LECH”.

3- Categoría “Cultivos de Secano > 4-5 ha” del mapa de base LCCS

Después de agregar la información de los padrones lecheros, quedaron 52.568 hectáreas categorizadas como “Cultivos de Secano > 4-5 ha” en el mapa de base LCCS. Estas áreas fueron reclasificadas utilizando la siguiente metodología: se realizaron salidas de campo a la subcuenca y se superpusieron capas georreferenciadas (i.e localización de los tambos, la clasificación MODIS de cultivos de verano que realizó Adrián Cal de INIA). Finalmente se optó por el siguiente criterio para asignar categorías de uso de suelo a las áreas restantes:

- Polígonos con área entre 0 y 15 ha: Herbáceo natural (GRASS). Estos polígonos representan los recortes de los polígonos lecheros.
- Polígonos con área entre 15 y 65 ha: Agricultura de rotación con pasturas (AGRP). Estos polígonos representan tambos.
- Polígonos con área > 65 ha: Agricultura continua (AGRC)

Esta clasificación da una representación y distribución homogénea entre estas 3 categorías de los aprox. 52.568 ha que quedaba de “Cultivos de Secano > 4-5 ha” ajustándose más a la realidad actual de la cuenca y a la distribución de su cobertura.

4- Categoría “Herbáceo natural” del mapa de base LCCS

En esta categoría se incluye un criterio relativo a la AGRP, de manera de representar los tamaños típicos de polígonos que se utilizan con estos fines. El criterio se define según el siguiente corte:

- Polígonos con área entre 15 y 150 has: Agricultura de rotación con pasturas (AGRP).
- Polígonos menores a 15 has y mayores a 150 has quedan en la categoría Herbáceo natural (GRAS).

Acordando con el grupo de trabajo, este criterio permitió reducir un poco el área que fue clasificada como herbáceo natural de la cual en realidad existe una parte con rotación de pasturas y otra de cultivos.

5- Atribución código SWAT

A cada categoría del nuevo mapa de uso del suelo creado según las etapas 1 a 4 descrita anteriormente se atribuyó un código SWAT correspondiendo a la misma (AGRP, AGRC, LECH, GRAS). En el caso de las otras categorías del mapa LCCS se utilizaron códigos existentes en SWAT. Estos códigos creados son relevantes al momento de definir las rotaciones correspondientes a cada uno que se describen en siguientes apartados.

La Tabla 2 resume el origen de cada categoría así como el código SWAT atribuido.

LCCS	Criterio	Código SWAT	Área en 2000 (has)
Cultivos de Secano > 4-5 has	Padrones lecheros	LECH	26.026
Cultivos Regados y de Secano < 4-5 has	Padrones lecheros	LECH	444
Herbáceo Natural	Padrones lecheros	LECH	35.306
Cultivos de Secano > 4-5 has	Polígonos con área entre 0 y 15 ha	GRAS	6.185
Cultivos de Secano > 4-5 has	Polígonos con área entre 15 y 65 has	AGRP	18.671
Cultivos de Secano > 4-5 has	Polígonos con área > 65 has	AGRC	27.714
Herbáceo Natural	Polígonos menores a 15 has y mayores a 150 has	GRAS	274.463
Herbáceo Natural	Polígonos con área entre 15 y 150 has	AGRP	55.416
Cultivos Regados y de Secano < 4-5 has	-	AGRC	4.735
Monte Nativo	-	MONT	29.361
Plantación Forestal	-	EUCA	27.623
Arbustos	-	SHRB	2.709
Frutales	-	APPL	508
Aguas Artificiales	-	WATB	457
Aguas Naturales	-	WATB	911
Área Urbana	-	URML	1.859
Áreas Desnudas	-	BARR	358
Áreas Naturales Inundadas	-	WETL	3.123
Áreas Urbanas Dispersas	-	URLD	450
Canteras, Areneras, Minas a Cielo Abierto	-	BARR	355
Equipamiento Urbano	-	UIDI	290

Tabla 2: Atribución de las categorías de uso del suelo para el modelo SWAT

Las Tablas 3 y 4 resumen el área total por categoría.

Uso del suelo	Código SWAT	Área [ha]
Campo natural	GRAS	280.648
Agricultura con pastura	AGRP	74.087
Monte nativo	MONT	29.361
Eucalipto	EUCA	27.623
Lechería	LECH	6.177
Agricultura continua	AGRC	3.244
Áreas Naturales inundables	WETL	3.123

Arbustos	SHRB	2.709
Áreas Urbanas	URML	1.859
Agua	WATB	1.368
Áreas desnudas	BARR	713
Frutas	APPL	508
Áreas Urbanas Dispersas	URLD	450
Industrial	UIDU	290

Tabla 3: Categorías y áreas de usos del suelo en la subcuenca del río Santa Lucía año 2000

Uso del suelo	Código SWAT	Área [ha]
Campo natural	GRAS	255.500
Agricultura con pastura	AGRP	50.960
Lechería	LECH	61.936
Agricultura continua	AGRC	63.858
Monte nativo	MONT	24.142
Eucalipto	EUCA	46.088
Áreas Naturales inundables	WETL	3.626
Arbustos	SHRB	3.534
Áreas Urbanas	URML	1.938
Agua	WATB	809
Áreas desnudas	BARR	801
Frutas	APPL	728
Áreas Urbanas Dispersas	URLD	759
Industrial	UIDU	462

Tabla 4: Categorías y áreas de usos del suelo en la subcuenca del río Santa Lucía año 2015

Las Figuras 3 y 4 representan el mapa de uso del suelo que resulta del proceso desarrollado, el cual se utilizó en el modelo SWAT, con las categorías descritas.

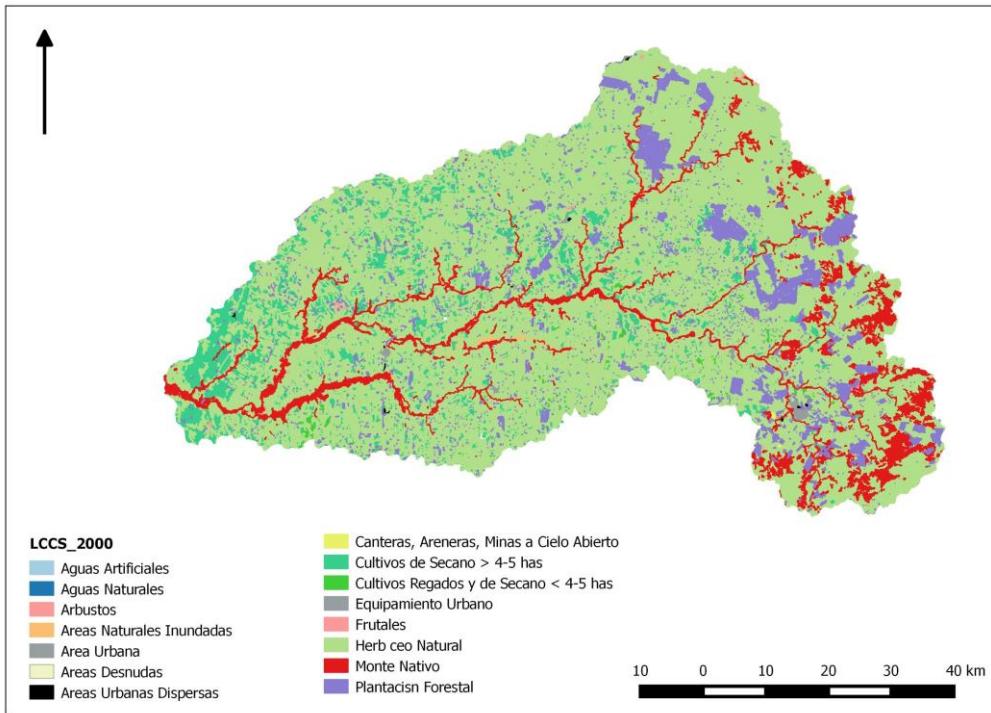


Figura 3: Mapa de uso del suelo de la subcuenca río Santa Lucía utilizando el código SWAT implementado para uso de suelo 2000.

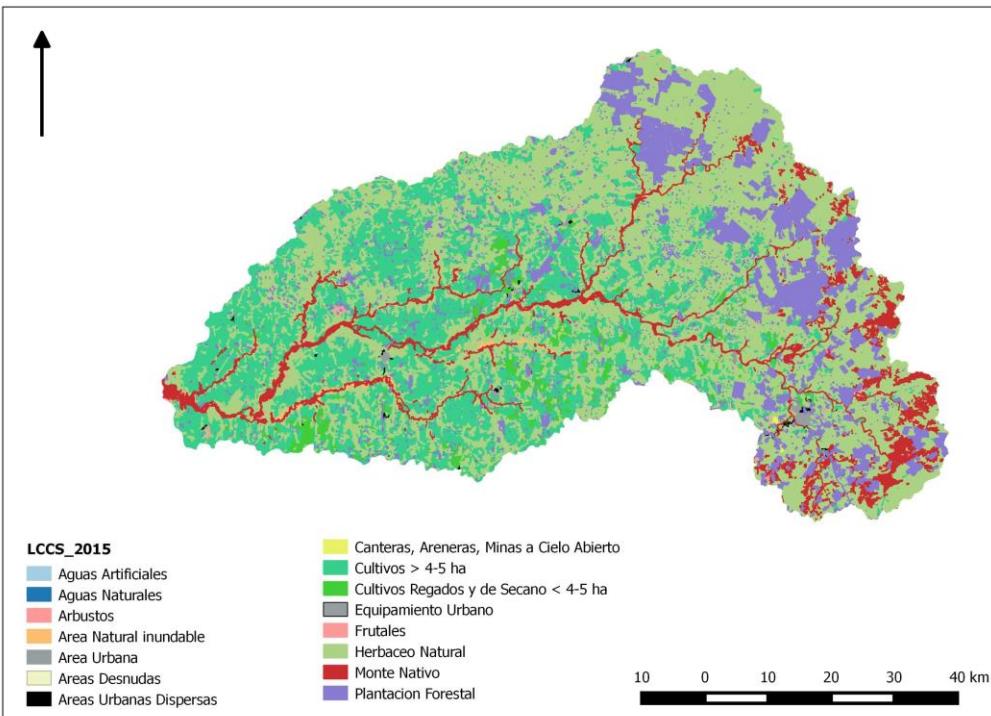


Figura 4: Mapa de uso del suelo de la subcuenca río Santa Lucía utilizando el código SWAT implementado para uso de suelo 2015.

2.2.2 Rotación y manejo

A partir de la información de los Planes de Uso y Manejo Responsable de Suelos (PU), de los datos de DICOSE (2016) y del mapa de Uso del Suelo se definen rotaciones tipo para la subcuenca, de manera de obtener un modelo simple pero que represente de manera general el manejo que se realiza en los usos de suelo considerados (Actualización del Manual de medidas exigibles para cultivos y pasturas: Instructivo para la elaboración y presentación de Plan).

Del análisis de las rotaciones agrícolas y agrícolas-ganaderas (según fueron presentados en los PU) se visualizan dos tipologías de rotaciones agrícolas: aquellas que incorporan pasturas y aquellas que no lo hacen.

Un 60% del área de los PU son netamente agrícolas, con rotaciones como:

- Soja - Cereal Invierno -Soja - Cobertura - Sorgo/Maíz - Barbecho/cobertura (Duración 3 años)
- Soja - Cereal Invierno - Soja - Cobertura (Duración 2 años)
- Soja - Cereal Invierno - Soja - Cereal Invierno - Soja - Cobertura/Barbecho (Duración 3 años)
- Soja - Cereal Invierno - Sorgo/Maíz - Cobertura/Barbecho (Duración 3 años)

El otro 40% comprende a rotaciones que incorporan pasturas, tales como:

- Soja - Cereal Invierno - Sorgo/Maíz - Cobertura/Barbecho - PASTURAS 3 años (Duración 5 años)
- Soja - Cereal Invierno - Soja - Cobertura/Cereal Invierno - PASTURAS 3 años (Duración 5 años)
- Soja - Cereal Invierno - Soja - Cereal Invierno - Soja - PASTURAS 2,5 años (Duración 5 años)
- Soja - Pasturas 3,5 años (Duración 4 años)

A continuación, se presentan las rotaciones y operaciones de manejo (incluyendo siembra, cosecha, pastoreo, fertilización, etc.) que se realizan cuando el uso de suelo tiene agricultura (AGRC), ganadería (AGR) y/o lechería (LECH).

2.2.2.1 Rotaciones “tipo” consideradas

Se definieron tres rotaciones agrícolas generales y simples en su composición de especies, una para cada sistema productivo: agrícola (AGRC), agrícola-ganadera (AGR) y agrícola-lechera (LECH). Adicionalmente se consideró una rotación ganadera extensiva sobre “campo natural” (GRASP). A continuación se describen con más detalle cada rotación.

Las consideraciones tomadas para simplificar las rotaciones implican: que no se hacen mezclas de cereales de invierno (avena raigrás), para los cultivos de verano no se toma en cuenta la temperatura del suelo para la siembra solo se considera fechas promedio y para las fechas de cosecha son fechas promedio, que no están relacionadas con la humedad del grano.

Rotación enteramente agrícola (AGRC)

Es una rotación de tres años de duración que incluye dos temporadas de verano de soja, una de maíz y tres puentes verdes. En el primer año, luego de cosechada la soja, se siembra un puente verde, dejando aproximadamente 60 días de incorporación de materia orgánica producto de descomposición del rastrojo antes de sembrar la soja nuevamente. En el segundo año, luego de la soja, se siembra un puente verde (en general avena y/o raigrás), que se deja crecer hasta septiembre. Sobre esta capa se siembra el maíz, que se cosecha el abril siguiente, dejando un puente

verde hasta la próxima siembra de soja, en primavera. La secuencia de cultivos propuesta es la siguiente:

Cultivo	Crop	Año
MAÍZ	CORN	3-1
AVENA	OATS	1
SOJA	SOYB	1-2
AVENA	OATS	2
SOJA	SOYB	2-3
AVENA	OATS	3
MAÍZ	CORN	3-1

Tabla 5: Secuencia de cultivos de la rotación AGRC

Rotación agrícola con pasturas (AGRP)

La rotación agrícola con pasturas (AGRP), es representativa de predios agrícola-ganaderos, tiene una duración de 5 años, y se diferencia de la rotación agrícola en que se implanta una pastura por tres años con pastoreo.

Se decidió hacer dos cortes de esta rotación desfasados en el tiempo con el fin de reflejar en el modelo que no todos los predios bajo esta rotación hacen una pastura o un cultivo de verano al mismo tiempo. De forma aleatoria se asigna el corte 1 cuando se encuentran en subcuencas impares y el corte 2 para subcuencas pares. Las secuencias de cultivos propuesta para cada corte son las siguientes:

CORTE 1			CORTE 2		
Cultivo	Crop	Año	Cultivo	Crop	Año
PASTURA pastoreo	PAST	1	PASTURA pastoreo	PAST	1
MAÍZ	CORN	1-2	PASTURA pastoreo	PAST	2
AVENA pastoreo	OATS	2	PASTURA pastoreo	PAST	3
MAÍZ	CORN	2-3	MAÍZ	CORN	3-4
PASTURA pastoreo	PAST	3	AVENA pastoreo	OATS	4
PASTURA pastoreo	PAST	4	MAÍZ	CORN	4-5
PASTURA pastoreo	PAST	5	PASTURA pastoreo	PAST	5

Tabla 6: Secuencia de cultivos de la rotación AGRP

Otra forma de lograr esto mismo en este uso de suelo es seleccionar “split land uses” en la etapa 2 de los pasos de edición del SWAT, lo cual no fue implementado en esta oportunidad

Rotación lechería (LECH)

La rotación representativa para los Planes de Lechería Sostenible (LECH) se caracteriza por comprender solo cultivos de pastoreo con el objetivo de alimentar el ganado. Se eligió una rotación representativa de cuatro años de duración: en febrero se siembra un cereal de invierno, en verano se siembra un sorgo forrajero y luego se implanta una pastura por tres años.

Se decidió hacer dos cortes de esta rotación desfasados en el tiempo con el fin de reflejar en el modelo que no todos los predios bajo esta rotación hacen una pastura o un cultivo de verano al mismo tiempo. De forma aleatoria se asigna el corte 1 cuando se encuentran en subcuencas impares y el corte 2 para subcuencas pares. Las secuencias de cultivos propuesta para cada corte son las siguientes:

CORTE 1			CORTE 2		
Cultivo	Crop	AÑO	Cultivo	Crop	AÑO
AVENA pastoreo	OATS	1	PASTURA pastoreo	PAST	1
SORGO FORRAJERO	SGHY	1-2			
PASTURA pastoreo	PAST	2	PASTURA pastoreo	PAST	2
PASTURA pastoreo	PAST	3	AVENA pastoreo	OATS	3
			SORGO FORRAJERO	SGHY	3-4
PASTURA pastoreo	PAST	4	PASTURA pastoreo	PAST	4

Tabla 7: Secuencia de cultivos de la rotación LECH

Rotación ganadería extensiva (GRASP)

La rotación de ganadería extensiva sobre “campo natural” (GRASP) se caracteriza por tener pastoreo con baja carga animal y ausencia de operaciones de siembra y/o fertilización. Dentro del término “campo natural” se incluyen todas las pasturas que tienen este manejo. La secuencia de cultivos es la siguiente:

Cultivo	Crop	AÑO
Campo Natural pastoreo	GRAS	1

Tabla 8: Secuencia para GRAS

2.2.2.2 Operaciones simuladas en las rotaciones

Siembra

La operación de siembra inicia el crecimiento del cultivo. La operación se simulará en SWAT solo si no existe otro cultivo en crecimiento en el HRU. Antes de una operación de siembra, se debe realizar una operación de quema o cosecha y quema.

Las variables que son incluidas en el modelo de la siembra son las siguientes:

Variable	Unidad	Definición	Comentario
MGT OP	---	Código de operación.	Para siembra MGT_OP=1
MONTH/DA Y	---	Fecha en que se realiza la siembra.	Se indica el día en que se siembra.
PLANT ID	---	Código del cultivo o cobertura de suelo.	Código de la tabla crop.dat

Tabla 9: Variables a definir para la siembra de un cultivo

Fertilización

La operación de fertilización permite incorporar fertilizantes o estiércol (manure) al suelo.

SWAT asume que los nutrientes presentes en la capa más superficial de suelo (10 mm) están disponibles para ser transportados a los cursos de agua a través de la escorrentía. Se define por el usuario qué fracción queda en los primeros 10 mm de suelo y el resto del fertilizante se agrega a la primera capa de suelo definida en el archivo HRU.sol.

En la tabla de fertilizantes (fert. data) se encuentra la fracción de los diferentes nutrientes y bacterias que cada uno contiene, a partir de los que SWAT calcula las fracciones de NO₃, NH₄, orgN, P, orgP (los únicos nutrientes que se simulan son el fósforo y el nitrógeno).

En la tabla a continuación se resumen de la tabla fert.dat los fertilizantes que fueron considerados.

Tabla fert.dat									
OBJECTID	IFNUM	FERTNM	FMINN	FMINP	FORGN	FORGP	FNH3N	FERTNAME	MANURE
4	4	UREA	0.46	0	0	0	1	Urea	0
18	18	18-46-00	0.18	0.202	0	0	0	18-46-00	
21	21	15-15-15	0.15	0.066	0	0	0	15-15-15	0
45	45	BEEF-FR	0.01	0.004	0.03	0.007	0.99	Beef-Fresh Manure	1

Tabla 10: Fertilizantes considerados en las rotaciones

Las variables que son incluidas en el modelo de la fertilización son las siguientes:

Variable	Unidad	Definición	Comentario
MGT OP	---	Código de operación.	Para fertilización MGT_OP=3
MONTH/DAY	---	Fecha en que se aplica el fertilizante.	Se indica el día en que se aplica el fertilizante.
FERT ID	---	Tipo de fertilizante o estiércol aplicado	Código de la tabla fert.dat
FRT KG	Kg/ha	Cantidad de fertilizante aplicado.	
FRT SURFACE	---	Fracción del fertilizante que se aplica en los primeros 10mm de suelo.	Se adoptó el valor por defecto FRT_SURFACE=0

Tabla 11: Variables a definir para la fertilización de un cultivo

A continuación, se presenta el esquema de fertilización promedio que se aplicará a los cultivos:

Fertilización Maíz				
	Momento de aplicación	Cantidad	Fertilizante	ID Fert.
1º	En la siembra.	100kg	18-46-0	18
2º	Cuando el cultivo tiene 6-8 hojas, 45 días aprox.	300kg	urea	4
3º	En la prefloración, 60 días aprox.	200kg	urea	4

Fertilización Soja				
	Momento de aplicación	Cantidad	Fertilizante	ID Fert.
1º	En la siembra.	200kg	15-15-15	21

Fertilización Sorgo				
	Momento de aplicación	Cantidad	Fertilizante	ID Fert.
1º	En la siembra	150kg	18-46-0	18
2º	A los 60 días	100kg	urea	4

Fertilización Avena*				
	Momento de aplicación	Cantidad	Fertilizante	ID Fert.
1º	En la siembra	100kg	18-46-0	18
2º	A los 45 días	50kg	urea	4
3º	A los 30 días	50kg	urea	4
4º	A los 30 días	50kg	urea	4
5º	A los 30 días	50kg	urea	4

*Depende del largo de la rotación la cantidad de fertilizaciones (AGRP=3 y LECH=5)

Fertilización Pastura				
	Momento de aplicación	Cantidad	Fertilizante	ID Fert.
1º	En la siembra	150kg	18-46-0	18
2º	Al primer año	150kg	18-46-0	18
3º	Al segundo año	150kg	18-46-0	18

Tabla 12: Esquema de fertilización promedio aplicado

Aplicación de plaguicidas

SWAT simula el movimiento ambiental de plaguicidas cuando se aplica a una HRU en superficie, evalúa las pérdidas por escorrentamiento hacia los cursos superficiales, en solución o adsorbido al sedimento y el movimiento en profundidad por percolación hacia las capas más profundas de suelo. La solubilidad, la vida media y el coeficiente de adsorción al carbono orgánico son los parámetros que determinan su destino ambiental.

En la tabla a continuación se resumen de la tabla pest.dat los principios activos que fueron considerados.

Tabla pest.data								
PESTNAME	IPNUM	NOMBRE COMERCIAL	SKOC	WOF	HLIFE_F	HLIFE_S	AP_EF	WSOL
2,4-D amine	230	Weedar	20	0,45	9	10	0,75	796000
Bifenthrin	198	Talstar	240000	0,4	7	26	0,75	0,1
Clorpirifos	129	Lorsban	6070	0,65	3,3	30	0,75	0,4
Glyphosate Amine	177	Roundup	24000	0,6	2,5	47	0,75	900000
Metolachlor	88	Dual	200	0,6	5	90	0,75	530

Las variables que son incluidas en el modelo de la fertilización son las siguientes:

Variable	Unidad	Definición	Comentario
PESTNAME		-	Nombre del principio activo
IPNUM		-	Código numérico para identificar al principio activo
NOMBRE COMERCIAL		-	nombre comercial de referencia
SKOC	mg/kg, mg/L	Coeficiente de adsorción normalizado por soil carbon	Indica la capacidad de un p.a de ser retenido en el suelo, su partición en el suelo.
WOF		Wash-off fraction	Cuantifica qué fracción de plaguicida se lava luego de ser aplicado
HLIFE_F	días	vida media foliar	
HLIFE_S	días	vida media en el suelo	
AP_EF		eficiencia de aplicación	0,75 por defecto
WSOL	mg/L , ppm	Solubilidad	Determina la concentración máxima de p.a a la que puede alcanzarse en la solución del suelo o durante un evento de escorrentía.

Las variables que son incluidas en el modelo de la aplicación de plaguicidas son las siguientes:

Variable	Unidad	Definición	Comentario
MGT_OP	---	Código de operación.	Aplicación de plaguicidas MGT_OP=4
MONTH/DAY	---	Fecha en que se aplica el plaguicida.	Se indica el día en que se aplica el plaguicida.
IPNUM	---	Plaguicida aplicado	Código de la tabla pest.dat
PST_KG	Kg/ha	Cantidad de fertilizante aplicado.	
PST_DEP	---	Profundidad de aplicación. Si =0, el modelo asume que se aplica en superficie	Se adoptó el valor por defecto PST_SURFACE=0

A continuación, se presenta el esquema de aplicación de plaguicida que se aplicó en las rotaciones:

Maíz				
	Momento de aplicación	Cantidad	Plaguicida	PEST_ID.
	un día previo a la siembra	1.44	Glifosato	177
	un mes luego de sembrado	0.48	Clorpirifos	129
	un mes luego de sembrado	1.08	Glifosato	177
	a los dos meses de sembrado	1.08	Glifosato	177

Soja				
	Momento de aplicación	Cantidad	Plaguicida	PEST_ID.
	al mes de sembrado	0.48	Clorpirifos	129
	al mes de sembrado	1.08	Glifosato	177
	a los dos meses de sembrado	1.08	Glifosato	177
	a los tres meses del segundo ciclo	0.1	Bifentrin	198

Sorgo				
	Momento de aplicación	Cantidad	Plaguicida	PEST_ID.
	A los dos meses de la siembra	0.48	Clorpirifos	129
	A los 4 meses de la siembra	1.44	Glifosato	177
	A los 4 meses de la siembra	0.48	2,4-D	230
	un mes antes de la implantación de una pastura	1.44	Glifosato	177

Avena				
	Momento de aplicación	Cantidad	Plaguicida	PEST_ID.
	al mes de la siembra	0.48	2,4-D	230
	a los 4 meses de la siembra	1.44	Glifosato	177
	prepara barbecho	1.08	Glifosato	177
	en el tercer año previo al maíz	0.96	Metolaclor	88

Pastura				
	Momento de aplicación	Cantidad	Plaguicida	PEST_ID.
	Al final del ciclo, previo a la implantación de un cultivo	1.44	Glifosato	177

Tabla 13: Esquema de fertilización promedio aplicado

Cosecha y quema del cultivo

La operación de cosecha y quema del cultivo termina el crecimiento del cultivo en el HRU. A partir del índice de cosecha se determina la fracción de la biomasa que será cosechada (yield) y la restante fracción quedará como rastrojo en la superficie del suelo.

Las variables que son incluidas en el modelo de la cosecha y quema son las siguientes:

Variable	Unidad	Definición	Comentario
MGT_OP	---	Código de operación.	Para cosecha y quema MGT_OP=5
MONTH/DAY	---	Fecha en que se realiza la cosecha y quema.	Se indica el día en que se cosecha.

Tabla 14: Variables a definir para la cosecha y quema del cultivo

Quema del cultivo

La operación de quema del cultivo termina el crecimiento del cultivo en el HRU.

Las variables que son incluidas en el modelo de la quema son las siguientes:

Variable	Unidad	Definición	Comentario
MGT OP	---	Código de operación.	Para cosecha y quema MGT_OP=8
MONTH/DAY	---	Fecha en que se realiza la quema.	Se indica el día en que se realiza la quema.

Tabla 15: Variables a definir para la quema del cultivo

Pastoreo

La operación de pastoreo simula la remoción de biomasa y deposición de estiércol en el período de tiempo especificado.

Cuando las rotaciones incluyen pastoreo se deben de incluir las siguientes variables en el modelo:

Variable	Unidad	Definición	Comentario
MGT OP	---	Código de operación.	Para pastoreo MGT_OP=9
MONTH/DAY	---	Fecha en que se inicia el pastoreo.	Se indica el primer día de pastoreo.
BIO EAT	Kg/ha/día	Consumo pastoreo por día por ha.	Expresado en peso seco de biomasa.
BIO TRMP	Kg/ha/día	Biomasa perdida por pisoteo por día por ha	Expresado en peso seco.
MANURE KG	Kg/ha/día		Expresado en peso seco.
MANURE ID	---	Código de la tabla fert.dat.	Manure_ID=45 en el caso de estiércol.
GRZ DAYS	días	Cantidad de días que realiza el pastoreo.	Se considera que se hace pastoreo continuo. Por lo tanto se cuenta en cada caso los días desde inicio del pastoreo hasta que se cambia de cultivo.
BIO MIN	Kg/ha	Biomasa mínima por debajo de la cual no se simula pastoreo.	Esta variable se encuentra en la primer sección del archivo .mgt. Se considera un valor de BIO_MIN= 200

Tabla 16: Variables del pastoreo

Para determinar las variables referentes al pastoreo se consideraron datos promedio de: peso de vaca, consumo de pastura diario, dotación, parte de la pradera que no se puede aprovechar y generación de estiércol (filas sombreadas en gris en la tabla). En la tabla a continuación se resumen los valores considerados para los cálculos para cada rotación y las variables calculadas (http://www.inac.uy/innovaportal/file/10495/1/pi_modulo_introductorio_web.pdf <http://www.inac.uy/innovaportal/v/8671/10/innova.front/informe-semanal-de-pesos-promedio-rendimiento-y-dressing>).

Parámetro	Unidades	Lechería	Ganadero-agrícola	Ganadería extensiva
Peso de una vaca promedio	kg	400	350	350
Consumo diario en relación a su peso	%/día	3%	3%	3%
Consumo diario	kg/día	12	10.5	10.5
Consumo por silo o ración	kg/día	6	0	0
Consumo por pastoreo	kg/día	6	10.5	10.5
Consumo por año	kg/año	2190	3833	3833

Dotación considerada	vacas/ha	1	0.93	0.85
BIO EAT: Consumo pastoreo por día por ha	Kg MS/ha/día	6.00	9.77	8.93
Parte de la pradera que no se aprovecha	%	30%	20%	20%
BIO TRMP: biomasa perdida por pisoteo por día por ha	kg MS/ha/día	1.8	2.0	1.8
Estiércol generado respecto al consumo de la vaca	%	40%	40%	40%
MANURE KG: estiércol generado por día	kg MS/ha/día	4.8	4.2	4.2

Tabla 17: Parámetros definidos para el pastoreo

2.2.2.3 Tabla de manejo (Swat Input Data: .mgt)

La tabla de manejo (.mgt) resume las prácticas de manejo aplicadas a las rotaciones consideradas y a cada HRU. En esta tabla se incluye datos de la siembra, cosecha, riego, fertilización, agroquímicos y prácticas de laboreo.

La tabla de manejo se divide en dos partes. Primero se resumen los inputs de condiciones iniciales o parámetros generales de manejo con varían durante la simulación. La segunda parte lista la agenda de operaciones de manejo según fechas específicas de aplicación.

Parámetros iniciales de los cultivos

Dado que utilizamos fechas de operación debemos indicar las condiciones del cultivo en crecimiento (si existe) al 1º de enero del año 1 de la rotación, condiciones iniciales del cultivo. Las variables que fueron incluidas son:

Variable	Unidad	Definición	Comentario
IGRO	---	Indica al modelo si existe un cultivo en crecimiento al inicio de la simulación. 0 no existe cultivo en crecimiento 1 existe un cultivo en crecimiento	
PLANT_ID	---	ID que identifica al cultivo inicial. Requerido si IGRO=1	Corresponde al número ICPNUM de la tabla crop.dat
LAI_INIT	---	Índice de Área Foliar Requerido si IGRO=1	Índice de Área Foliar en español (IAF) o Leaf Area Index (LAI).
BIO_INI_T	Kg/ha	Biomasa inicial expresada en peso seco. Requerido si IGRO=1	Se incluye el peso de las raíces además de la parte aérea del cultivo.
PHU_PLT	---	Cantidad de grados día (heat units) necesarios para que el cultivo alcance la madurez. Requerido si IGRO=1	Este parámetro solo se incluyó para GRAS dado que el cultivo no fue sembrado.

Tabla 18: Parámetros iniciales de cultivos

Parámetros generales de manejo

El único parámetro general que se modificó fue BIO_MIN según se menciona en el punto de Pastoreo. Además, se seleccionó la opción “Adjust Curve Numbers for Slope”.

Opschedules

Por simplicidad, se modificó la tabla OpSchedules para luego sobreescribir la tabla .mgt a través del SWAT Editor. En las tablas a continuación se presentan para cada rotación las columnas que se modifican en la tabla Opschedules. Se incluyen las operaciones de manejo descritas anteriormente y las fechas de aplicación consideradas.

Opschedules AGRC									
SID	CROP	YEAR	MONTH	DAY	MGT_OP	PLANT_ID	FERT_ID	FRT_KG	FRT_SURFACE
AGRC		01	01	15	3	0	4	200	0
AGRC		01	04	30	5	0	0	0	0
AGRC	OAT	01	05	01	1	32	0	0	0
AGRC		01	09	15	8	0	0	0	0
AGRC	SOYB	01	11	15	1	56	0	0	0
AGRC		01	11	15	3	0	21	200	0
AGRC		02	04	05	5	0	0	0	0
AGRC	OAT	02	04	06	1	32	0	0	0
AGRC		02	09	15	8	0	0	0	0
AGRC	SOYB	02	11	15	1	56	0	0	0
AGRC		02	11	15	3	0	21	200	0
AGRC		03	04	05	5	0	0	0	0
AGRC	OAT	03	04	06	1	32	0	0	0
AGRC		03	09	01	8	0	0	0	0
AGRC	CORN	03	11	01	1	19	0	0	0
AGRC		03	11	01	3	0	18	100	0
AGRC		03	12	15	3	0	4	300	0

Parámetros iniciales AGRC		
Variable	Unidad	Valor
IGRO	---	1
PLANT_ID	---	19 (CORN)
LAI_INIT	---	5
BIO_INIT	Kg/ha	4300

Tabla 19: Opschedule y Parámetros iniciales de la rotación AGRC

Opschedules AGRP1														
SID	CROP	YEAR	MONT_H	DAY	MGT_OP	PLANT_ID	GRZ_DAY_S	MANURE_ID	BIO_EA_T	BIO_TRM_P	MANURE_KG	FERT_ID	FRT_KG	FRT_SURFACE
AGR1	PAST	1	1	1	9	0	212	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0

AGRP1		1	8	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP1	CORN	1	10	1	1	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP1		1	10	1	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100	0
AGRP1		1	11	15	3	0	0	0	0	0	0	0	4	300	0
AGRP1		1	12	15	3	0	0	0	0	0	0	0	4	200	0
AGRP1		2	4	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP1	OAT	2	4	16	1	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP1		2	4	16	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100	0
AGRP1		2	6	1	9	0	61	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	0
AGRP1		2	6	1	3	0	0	0	0	0	0	0	4	50	0
AGRP1		2	7	1	3	0	0	0	0	0	0	0	4	50	0
AGRP1		2	8	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP1	CORN	2	10	1	1	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP1		2	10	1	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100	0
AGRP1		2	11	15	3	0	0	0	0	0	0	0	4	300	0
AGRP1		2	12	15	3	0	0	0	0	0	0	0	4	200	0
AGRP1		3	4	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP1	PAST	3	4	16	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP1		3	4	16	3	0	0	0	0	0	0	0	18	150	0
AGRP1		3	6	10	9	0	205	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	0
AGRP1		4	1	1	9	0	365	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	0
AGRP1		4	4	16	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100	0
AGRP1		5	1	1	9	0	365	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	0
AGRP1		5	4	16	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100	0

Opschedules AGRP2

SID	CROP	YEAR	MONT_H	DAY	MGT_OP	PLANT_ID	GRZ_DAY_S	MANURE_ID	BIO_EA_T	BIO_TRM_P	MANURE_KG	FERT_ID	FRT_KG	FRT_SURFAC_E	
AGRP2		1	1	1	9	0	365	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	
AGRP2		1	4	16	3	0	0	0	0	0	0	18	100	0	
AGRP2		2	1	1	9	0	365	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	
AGRP2		2	4	16	3	0	0	0	0	0	0	18	100	0	
AGRP2		3	1	1	9	0	212	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	
AGRP2		3	8	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
AGRP2	CORN	3	10	1	1	19	0	0	0	0	0	0	0	0	
AGRP2		3	10	1	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100	0
AGRP2		3	11	15	3	0	0	0	0	0	0	0	4	300	0
AGRP2		3	12	15	3	0	0	0	0	0	0	0	4	200	0
AGRP2		4	4	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP2	OAT	4	4	16	1	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP2		4	4	16	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100	0
AGRP2		4	6	1	9	0	61	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	0
AGRP2		4	6	1	3	0	0	0	0	0	0	0	4	50	0
AGRP2		4	7	1	3	0	0	0	0	0	0	0	4	50	0

AGRP2		4	8	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP2	CORN	4	10	1	1	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP2		4	10	1	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100	0
AGRP2		4	11	15	3	0	0	0	0	0	0	0	4	300	0
AGRP2		4	12	15	3	0	0	0	0	0	0	0	4	200	0
AGRP2		5	4	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP2	PAST	5	4	16	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRP2		5	4	16	3	0	0	0	0	0	0	0	18	150	0
AGRP2		5	6	10	9	0	205	45	9.77	2.44	4.2	0	0	0	0

Parámetros iniciales AGRP			
Variable	Unidad	AGR1	AGR2
IGRO	---	1	1
PLANT_ID	---	12 (PAST)	12 (PAST)
LAI_INIT	---	2	2
BIO_INIT	Kg/ha	3000	4000
BIO_MIN	Kg/ha	200	200

Tabla 20: Opschedule AGRP1 y AGRP2 y Parámetros iniciales de la rotación AGRP

Opschedules LECH1														
SID	CROP	YEAR	MONT_H	DAY	MGT_OP	PLANT_ID	GRZ_DAYS	MANURE_ID	BIO_EAT	BIO_TRMP	MANURE_KG	FERT_ID	FRT_KG	FRT_SURFACE
LECH1		1	1	01	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH1	OATS	1	2	28	1	32	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH1		1	2	28	3	0	0	0	0	0	0	0	18	100
LECH1		1	4	15	9	0	122	45	6	2.57	3.98	0	0	0
LECH1		1	4	15	3	0	0	0	0	0	0	4	50	0
LECH1		1	5	15	3	0	0	0	0	0	0	4	50	0
LECH1		1	6	15	3	0	0	0	0	0	0	4	50	0
LECH1		1	7	15	3	0	0	0	0	0	0	4	50	0
LECH1		1	8	15	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH1	SGHY	1	10	15	1	24	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH1		1	10	15	3	0	0	0	0	0	0	0	18	150
LECH1		1	12	15	3	0	0	0	0	0	0	4	100	0
LECH1		2	2	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH1		2	3	30	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH1	PAST	2	4	30	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH1		2	4	30	3	0	0	0	0	0	0	18	150	0
LECH1		2	6	30	9	0	185	45	6	2.57	3.98	0	0	0
LECH1		3	1	1	9	0	365	45	6	2.57	3.98	0	0	0
LECH1		3	4	30	3	0	0	0	0	0	0	18	150	0
LECH1		4	1	1	9	0	365	45	6	2.57	3.98	0	0	0
LECH1		4	4	30	3	0	0	0	0	0	0	18	150	0

Opschedules LECH2														
SID	CROP	YEAR	MONT_H	DAY	MGT_OP	PLANT_ID	GRZ_DAYS	MANURE_ID	BIO_EAT	BIO_TRM_P	MANURE_KG	FERT_ID	FRT_KG	FRT_SURFAC_E
LECH2	PAST	1	1	01	9	0	365	45	6	2.57	3.98	0	0	0
LECH2		1	4	30	3	0	0	0	0	0	0	18	150	0
LECH2	PAST	2	1	01	9	0	365	45	6	2.57	3.98	0	0	0
LECH2		2	4	30	3	0	0	0	0	0	0	18	150	0
LECH2		3	1	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH2	OATS	3	2	28	1	32	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH2		3	2	28	3	0	0	0	0	0	0	18	100	0
LECH2		3	4	15	9	0	153	45	6	2.57	3.98	0	0	0
LECH2		3	4	15	3	0	0	0	0	0	0	4	50	0
LECH2		3	5	15	3	0	0	0	0	0	0	4	50	0
LECH2		3	6	15	3	0	0	0	0	0	0	4	50	0
LECH2		3	7	15	3	0	0	0	0	0	0	4	50	0
LECH2		3	8	15	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH2	SGHY	3	10	15	1	24	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH2		3	10	15	3	0	0	0	0	0	0	18	150	0
LECH2		3	12	15	3	0	0	0	0	0	0	4	100	0
LECH2		4	2	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH2		4	3	30	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH2	PAST	4	4	30	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0
LECH2		4	4	30	3	0	0	0	0	0	0	18	150	0
LECH2		4	6	30	9	0	185	45	6	2.57	3.98	0	0	0

Parámetros iniciales LECH			
Variable	Unidad	LECH1	LECH2
IGRO	---	0	1
PLANT_ID	---	---	12 (PAST)
LAI_INIT	---	---	2
BIO_INIT	Kg/ha	---	3000
BIO_MIN	Kg/ha	200	200

Tabla 21: Opschedule LECH1 y LECH2 y Parámetros iniciales de la rotación LECH

Opschedules GRASP											
SID	CROP	YEAR	MONT_H	DAY	MGT_O_P	PLANT_ID	GRZ_DAY_S	MANURE_ID	BIO_EAT	BIO_TRM_P	MANURE_KG
GRASP	GRAS	01	01	01	9	127	365	45	8.93	2.23	4.2

Parámetros iniciales GRASP		
Variable	Unidad	Valor
IGRO	---	1
PLANT_ID	---	127
LAI_INIT	---	2
BIO_INIT	Kg/ha	2100
PHU_PLT	---	700
BIO_MIN	Kg/ha	200

Tabla 22: Opschedule y Parámetros iniciales de GRASP

Parámetros iniciales de Eucalipto

De la misma manera que para los otros cultivos, también se añadí parámetros iniciales para el uso de suelo “Eucalipto (EUCA)”. El manejo queda igual que la por default.

Parámetros iniciales EUCA		
Variable	Unidad	Valor
IGRO	---	1
PLANT_ID	---	119
LAI_INIT	---	2.5
BIO_INIT	Kg/ha	1000
PHU_PLT	---	1000

Tabla 23: Parámetros iniciales de EUCA

2.2.3 Cultivos

Dentro de la base de datos Access de SWAT, el archivo “crop”, contiene todos los parámetros de crecimiento de plantas que corresponden al mapa de uso del suelo y rotaciones definidas. Las definiciones de estos parámetros de crecimientos se encuentran en el documento siguiente: https://swat.tamu.edu/media/69341/ch14_input_plantdb.pdf.

Uno de los parámetros que fue cambiado en función de referencias en la literatura es la eficiencia del uso de radiación, BIO-E, expresada en ((kg/ha)/MJ/m²). La Tabla 22 indica los valores de BIO-E elegidos así que la referencia en la literatura.

Cultivo	código SWAT	BIO-E por default ((kg/ha)/(MJ/m ²))	BIO-E elegido ((kg/ha)/(MJ/m ²))	Literatura
Maíz	CORN	39	20	Birch et al., 1999
Soja	SOYB	25	19	Caviglia et al., 2003 Ponte De Souza et al., 2009 Confalone, A. and Navarro Dujmovich, M. , 1999
Sorgo	SGHY	33.5	28	Petrova Chimonyo et al., 2018 Garofalo et al., 2011
Avena	OATS	35	25	Biabani et al., 2018 Piotrowska et al., 2008
Campo natural	GRAS	34	3.7	Baeza et al., 2011 Pineiro et al., 2006
Pastura	PAST	35	6	Grigera et al., 2007
Eucalipto	EUCA	15	7	Henskens et al., 2001 Vassallo et al., 2012

Tabla 24: Valores de BIO-E elegidos y referencias

La Tabla 24 indica los valores por defecto de los parámetros en SWAT y los valores que fueron modificadas para la subcuenca del río Santa Lucía.

	CORN		SOYBEAN		SORGHUM		OATS		GRASSLAND		PASTURE		EUCALYPTUS	
	Default parameters	Parameters modified												
OBJEC TID	19	19	56	56	24	24	32	32	127	127	12	12	119	119
ICNU M	19	19	56	56	24	24	32	32	127	127	12	12	119	119
CPNM	CORN	CORN	SOYB	SOYB	SGHY	SGHY	OATS	OATS	GRAS	GRAS	PAST	PAST	EUCA	EUCA
IDC	4	4	1	1	4	4	5	5	6	6	6	6	7	7
CROP NAME	Corn	Corn	Soybean	Soybean	Sorghum Hay	Sorghum Hay	Oats	Oats	GRASS LAND	GRASS LAND	Pasture	Pasture	Eucaly ptus	Eucaly ptus
BIO_E	39	20	25	19	33.5	28	35	25	34	3.7	35	6	15	7
HVSTI	0.5	0.5	0.31	0.31	0.9	0.9	0.42	0.42	0.9	0.9	0.9	0.9	0.1	0.5
BLAI	6	4	3	3	4	4	4	2	2.5	2.5	4	4	2.5	2.5
FRGR W1	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.05	0.4	0.05	0.05	0.1	0.1
LAIMX 1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.1	0.3	0.05	0.05	0.15	0.5
FRGR W2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0.7	0.49	0.49	0.5	0.5
LAIMX 2	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.7	0.7	0.95	0.95	0.75	0.75
DLAI	0.7	0.7	0.6	0.6	0.64	0.64	0.8	0.8	0.35	1	0.99	0.99	0.99	1
CHTM X	2.5	2.5	0.8	0.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1	0.5	0.5	0.5	3.5	20
RDMX	2	2	1.7	1.7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T_OPT	25	25	25	25	30	30	15	15	25	25	25	25	20	20
T_BAS E	8	8	10	10	11	11	0	0	12	8	12	8	7	7
CNYLD	0.014	0.014	0.065	0.065	0.0199	0.0199	0.0316	0.0316	0.016	0.016	0.0234	0.0234	0.001	0.001
CPYLD	0.0016	0.0016	0.0091	0.0091	0.0032	0.0032	0.0057	0.0057	0.0022	0.0022	0.0033	0.0033	0.000	0.000
BN1	0.047	0.047	0.0524	0.0524	0.044	0.044	0.06	0.06	0.02	0.02	0.06	0.02	0.006	0.006
BN2	0.0177	0.0177	0.0265	0.0265	0.0164	0.0164	0.0231	0.0231	0.012	0.012	0.0231	0.012	0.002	0.002
BN3	0.0138	0.0138	0.0258	0.0258	0.0128	0.0128	0.0134	0.0134	0.005	0.005	0.0134	0.005	0.001	0.001
BP1	0.0048	0.0048	0.0074	0.0074	0.006	0.006	0.0084	0.0084	0.0014	0.0084	0.0084	0.0084	0.000	0.000
BP2	0.0018	0.0018	0.0037	0.0037	0.0022	0.0022	0.0032	0.0032	0.001	0.0032	0.0032	0.0032	0.000	0.000
BP3	0.0014	0.0014	0.0035	0.0035	0.0018	0.0018	0.0019	0.0019	0.0007	0.0007	0.0019	0.0019	0.000	0.000
WSYF	0.3	0.3	0.01	0.01	0.9	0.9	0.175	0.175	0.9	0.9	0.9	0.9	0.05	0.05
USLE_C	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.03	0.03	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001	0.001
GSI	0.007	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.007	0.002
VPDFR	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
FRGM AX	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
WAVP	7.2	7.2	8	8	8.5	8.5	10	10	10	10	10	10	3	3
CO2HI	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
BIOEHI	45	45	34	34	36	36	45	45	39	39	36	36	20	20
RSDCO_PL	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

OV_N	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
CN2A	67	67	67	67	67	67	62	62	49	49	49	49	49	45	45
CN2B	77	77	78	78	77	77	73	73	69	69	69	69	69	66	66
CN2C	83	83	85	85	83	83	81	81	79	79	79	79	79	77	77
CN2D	87	87	89	89	87	87	84	84	84	84	84	84	84	83	83
FERTFI															
ELD	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
ALAI_MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0.75	0.75
BIO_LEAF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.025
MAT_YRS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
BMX_TREES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	75
EXT_COEF	0.65	0.65	0.45	0.45	0.65	0.65	0.45	0.45	0	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
BM_DIEOFF	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.025	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
OpSch edule	AGRR	PAST	GRASP	PAST	PAST	AGRR	EUCA								

Tabla 25: Parámetros de la tabla crop. Valores por defecto en SWAT y valores modificadas para la cuenca del Rio Santa Lucia.

2.3 Suelo

Los inputs de SWAT en referencia a los suelos corresponden a un mapa en formato raster representando las diferentes unidades de mapeo (UM), para lo cual se contó con la nueva Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:40.000 de DGRN-MGAP (se puede visualizar desde el siguiente enlace: <http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/cartasuelos>), e información de propiedades químicas y físicas de las calicatas del suelo dominante de cada UM.

Los datos de los suelos fueron seleccionados con la ayuda de los expertos del Departamento de Estudios Básicos de Suelo de la DGRN-MGAP.

2.3.1 Mapa de suelo

La subcuenca en estudio comprende un total de 37 tipos de UM según la nueva Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:40.000 (DGRN-MGAP) según se presenta en la Figura 5.

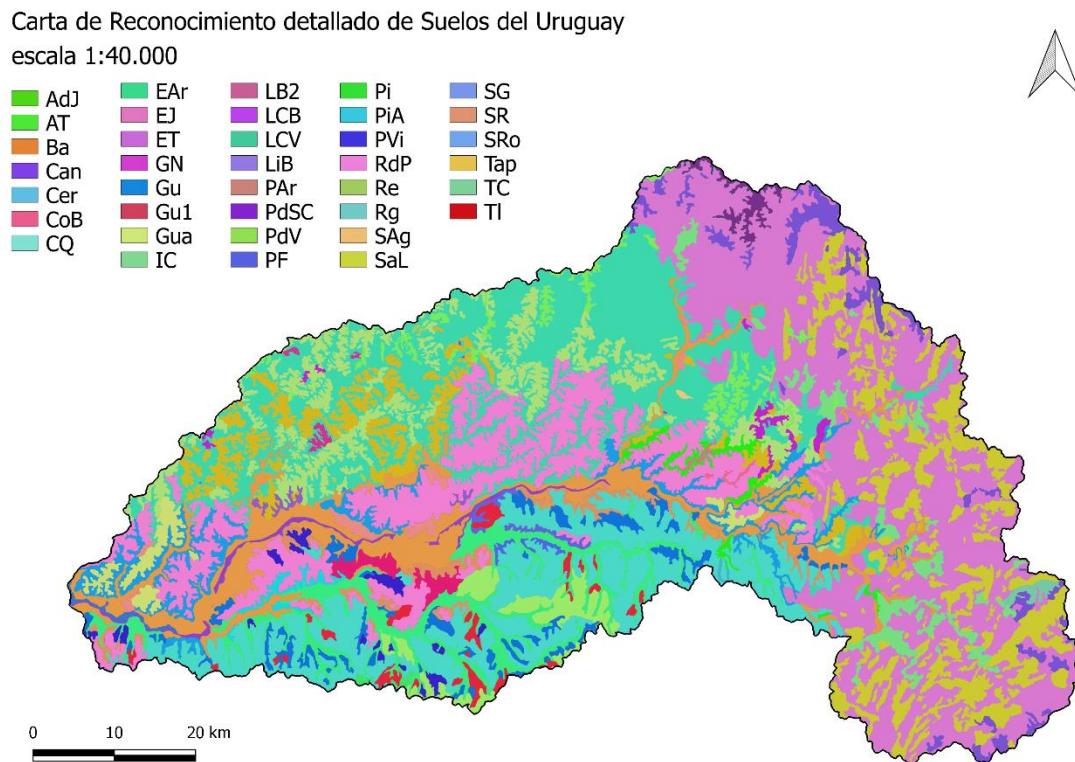


Figura 5: Mapa de suelos esc. 1:40.000 de la subcuenca río Santa Lucía usada en el modelo SWAT. Fuente: DGRN-MGAP.

En la Tabla 26 se muestra el área y porcentaje de la subcuenca ocupado por cada UM, más de 80% de la subcuenca está representada por las primeras 10 UM.

En las 37 UM, el suelo dominante es el “Brunosol”. Se trata de suelos oscuros, con contenidos elevados de materia orgánica y en general de texturas medias en los horizontes superficiales. La secuencia de horizontes más común es A-Bt-Ck. El horizonte B es en general argilúvico (Bt), aunque en algunos casos es cámbico (Bw), moderadamente diferenciado, de color oscuro y con una

estructura bien expresada, pero que no restringe excesivamente los movimientos del aire y del agua (MGAP, 1976).

Unidad	Nombre	Textura	Area (Ha)	% Cuenca
TC	Tapes Chico	Brunosol subéutrico háplico, familia arenosa, fase moderadamente profunda, superficial	101.396	19.74
Gu	Guaycurú	Brunosol subéutrico típico, familia francosa, fase profunda y moderadamente profunda	80.408	15.66
TI	Tala	Vertisol rúptico lúvico, familia limo arcillosa	50.105	9.76
Can	Canelones	Vertisol rúptico típico familia limo arcillosa	46.021	8.96
SAG	Sierra Aigua	Litosol subéutrico ócrico, familia arenofrancosa	41.479	8.08
SR	San Ramón	Planosol éutrico melánico, familia limo arcillosa	31.680	6.17
CQ	Carreta Quemada	Brunosol éutrico lúvico, familia francosa	25.606	4.99
PdV	Puntas de Valdez	Planosol subéutrico melánico, familia limo arcillosa	20.656	4.02
LCB	La Carolina Brun	Brunosol éutrico típico, familia limo arcillosa, fase vertical	18.258	3.55
SaL	Santa Lucía	Brunosol éutrico típico, familia limo arcillosa	14.102	2.75
Gu1	Guaycurú 1	Brunosol subéutrico típico, familia francosa, fase profunda y moderadamente profunda	11.540	2.25
EAr	Estación Arteaga	Brunosol subéutrico lúvico, familia francosa	9.984	1.94
Ba	Barrancas	Argisol subéutrico melánico, abráptico, familia limosa, fase vertical	9.803	1.91
Tap	Tapia	Vertisol rúptico lúvico, familia francosa	7.482	1.46
CoB	Colonia Brause	Brunosol subéutrico lúvico, familia arenofrancosa	6.335	1.23
Re	Reboledo	Brunosol subéutrico lúvico, familia francosa, fase hidromórfica	5.981	1.16
LiB	Libertad Brunosol	Brunosol éutrico típico, familia limo arcillosa fase vertical	4.958	0.97
SRo	Santa Rosa	Brunosol subéutrico lúvico, familia limo arcillosa	4.157	0.81
AT	Arroyo Tupambay	Litosol éutrico ócrico, familia francosa	3.250	0.63
ET	Estación Tapia	Brunosol subéutrico típico, familia francosa	2.809	0.55
Cer	Cerrillos	Brunosol éutrico típico, familia limo arcillosa, fase vertical	2.761	0.54
PiA	Piedra Alta	Fluvisol heterotextural melánico, familia limo arcillosa	2.311	0.45
RdP	Rincón del Pino	Planosol subéutrico melánico, familia limo arcillosa, fase sódica	2.319	0.45
SG	San Gabriel	Brunosol subéutrico háplico, familia francosa, fase superficial y moderadamente profunda	1.933	0.38
LB2	Las Brujas 2	Brunosol éutrico háplico, familia arenofrancosa, fase superficial	1.664	0.32
PF	Paso Fabini	Brunosol subéutrico típico, familia francosa	1.257	0.24
Pi	Pirarajá	Brunosol subéutrico, lúvico, familia francosa a limo arcillosa, fase vertical, sódica	957	0.19

Rg	Rraigón	Brunosol subéutrico lúvico, familia francesa	847	0.16
GN	Gaucho Negro	Gleysol lúvico melánico típico, familia limo arcillosa fase parácuica	734	0.14
LCV	La Carolina Vert	vertisol rúptico lúvico, familia limo arcillosa	727	0.14
PVi	Paso Villar	Brunosol éutrico háplico, familia arenosa, fase superficial	610	0.12
AdJ	Arroyo del Juncal	Brunosol éutrico lúvico, familia limo arcillosa	545	0.11
EJ	Estación Juanicó	Brunosol éutrico típico, familia limo arcillosa, fase vertical	435	0.08
Gua	Guayreño	Brunosol subéutrico lúvico, familia francesa	211	0.04
PdSC	Puntas del Solis Chico	Brunosol subéutrico háplico, familia arenosa	153	0.03
IC	Ismael Cortinas	Inceptisol úmbrico, familia arenofrancosa	113	0.02
Par	Paso Artigas	Argisol subéutrico melánico abráptico, familia francesa, fase hidromórfica	2	0.00

Tabla 26: Tipos de suelo y representación en la subcuenca del Río Santa Lucía

2.3.2 Características físicas de los suelos

Los parámetros físicos del suelo dominante de cada UM se ingresaron a la tabla “usersoil” de la base de datos SWAT. En la Tabla 27 se describen brevemente los parámetros requeridos para esta tabla¹.

Variable	Unidad	Definición	Comentario
NLAYERS	-	Cantidad de horizontes del perfil de suelo.	Dato calicata
HYDGRP	-	Grupo hidrológico del suelo (A, B, C, D).	Calculado/Asignado
SOL_ZMX	mm	Profundidad máxima de exploración radical	Dato calicata
ANION_EXCL	-	Fracción de la porosidad de la cual los aniones son excluidos	Se utilizó el valor por default (0.5)
SOL_CRK	-	Volumen de agrietamiento del suelo, potencial o máximo, expresado como fracción del volumen total de suelo.	Valor asignado según tipo de suelo
TEXTURE	-	Textura del suelo (descriptivo).	Dato calicata
Información requerida por cada horizonte (#)			
SOL_Z(#)	mm	Profundidad desde la superficie al piso del horizonte	Dato calicata
SOL_BD(#)	Mg/m ³	Densidad aparente.	Dato calicata
SOL_AWC(#)	mmH ₂ O/mmSuelo	Agua disponible.	Dato calicata
SOL_K(#)	m/h	Conductividad hidráulica en flujo saturado K _{sat} .	Calculado
SOL_CBN(#)	% Peso	Contenido de carbono orgánico.	Dato calicata
CLAY(#)	% Peso	Contenido de arcilla.	Dato calicata
SILT(#)	% Peso	Contenido de limo.	Dato calicata
SAND(#)	% Peso	Contenido de arena.	Dato calicata
ROCK(#)	% Peso	Contenido de fragmentos de roca.	Dato calicata

¹ Mayor información se puede encontrar en:

https://swat.tamu.edu/media/69365/ch22_input_sol.pdf

SOL_ALB(#)	-	Albedo del suelo húmedo	Calculado/Asignado
USLE_K(#)	0.013 (ton m ² h)/ (m ³ - ton cm)	Factor de erodabilidad (K) de la ecuación universal de perdida de suelo	Dato proporcionado por DGRN para cada UM
SOL_EC(#)	dS/m	Conductividad eléctrica	No activo en el modelo
SOL_CAL(#)	%	Contenido de CaCO ₃ en el suelo (0-50%)	No activo en el modelo
SOL_PH(#)	---	pH del suelo (3-10)	No activo en el modelo

Tabla 27: Parámetros físicos del suelo incluidos en la tabla usersoil (.sol) (Arnold et al., 2011)

Calicatas

Esta información fue provista por DGRN-MGAP (no publicada). Los datos que se consideraron de las calicatas fueron los siguientes:

- contenido de carbono orgánico;
- contenido de arcilla, limo, arena y roca;
- profundidad desde la superficie al piso del horizonte;
- densidad aparente y agua disponible.

Profundidad máxima de exploración radical (SOL_ZMX)

En pasturas y cultivos, aproximadamente el 80 % las raíces se concentran en los primeros 20 a 30 cm del suelo. La profundidad SOL_ZMX fue aproximada a la profundidad del horizonte A de cada perfil dado que es dónde se encuentra en general la mayor parte de las raíces.

Conductividad hidráulica saturada (Ksat)

Según el Soil survey manual (1993), citado por MGAP-RENARE (2014), Ksat es un parámetro que cuantifica la capacidad del suelo para conducir el agua en condiciones de flujo saturado y lo cuantifica asignandole un rango de valores por clase (ver Tabla 28). En este trabajo en particular se le utilizó el valor promedio del rango por clase y además se cambiaron las unidades según se presenta en la Tabla 29.

Se tomaron las clases de Ksat definidas en el diagrama de Rawls y Brakensiek (1983), citado por MGAP-RENARE (2014), donde las clases quedan determinadas según el contenido de arcilla y arena del suelo.

Clase de Ksat	Ksat ($\mu\text{m/s}$)
Alta	10-100
Moderadamente alta	1-10
Moderadamente baja	0.1-1
Baja	0.01-0.1

Tabla 28: Clases de Ksat. Fuente: Soil survey manual, 1993.

Clase	Ksat ($\mu\text{m/s}$)	Ksat (mm/h)
Alta	55	198
Mod. alta	5.5	19.8
Mod. baja	0.55	1.98
Baja	0.055	0.198

Tabla 29: Clases de Ksat, valores promedio y cambio de unidades.

A continuación (Tabla 30) se presentan los valores de Ksat obtenidos para cada horizonte de cada UM.

Unidad suelo	Horizonte 1		Horizonte 2		Horizonte 3		Horizonte 4		Horizonte 5	
	Clase	Ksat (mm/h)								
AdJ	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2	---	0.0
AT	M. alta	19.8	---	0.0	---	0.0	---	0.0	---	0.0
Ba	M. baja	2.0	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2
Can	Baja	0.2	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	---	0.0
Cer	M. baja	2.0	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2
CoB	M. alta	19.8	Alta	198.0	M. baja	2.0	M. alta	19.8	M. alta	19.8
CQ	M. alta	19.8	Baja	0.2	M. baja	2.0	M. baja	2.0	---	0.0
EAr	M. alta	19.8	M. alta	19.8	M. baja	2.0	Baja	0.2	M. alta	19.8
EJ	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2
ET	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	M. baja	2.0	---	0.0
GN	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2	---	0.0
Gu	M. alta	19.8	M. baja	2.0	M. baja	2.0	---	0.0	---	0.0
Gu1	M. alta	19.8	M. baja	2.0	M. baja	2.0	---	0.0	---	0.0
Gua	M. alta	19.8	M. baja	2.0	Baja	0.2	M. baja	2.0	M. alta	19.8
IC	Alta	198.0	Alta	198.0	Alta	198.0	---	0.0	---	0.0
LB2	M. baja	2.0	Baja	0.2	M. baja	2.0	---	0.0	---	0.0
LCB	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	M. baja	2.0	---	0.0
LCV	M. baja	2.0	---	0.0						
LiB	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2	---	0.0
Par	M. alta	19.8	Baja	0.2	M. alta	19.8	Alta	198.0	---	0.0
PdSC	Alta	198.0								
PdV	M. baja	2.0	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2
PF	M. baja	2.0	M. baja	2.0	---	0.0	---	0.0	---	0.0
Pi	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2
PiA	Baja	0.2	M. baja	2.0	M. baja	2.0	Alta	198.0	M. alta	19.8
PVi	M. alta	19.8	M. alta	19.8	M. alta	19.8	---	0.0	---	0.0
RdP	M. baja	2.0	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	M. baja	2.0
Re	M. alta	19.8	Baja	0.2	Baja	0.2	Alta	198.0	M. baja	2.0
Rg	M. alta	19.8	M. baja	2.0	Baja	0.2	M. baja	2.0	M. baja	2.0

SAg	M. alta	19.8	---	0.0	---	0.0	---	0.0	---	0.0
SaL	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2	---	0.0
SG	M. alta	19.8	Alta	198.0	---	0.0	---	0.0	---	0.0
SR	M. baja	2.0	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2
SRo	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	Baja	0.2	---	0.0
Tap	M. baja	2.0	M. baja	2.0	M. baja	2.0	Baja	0.2	---	0.0
TC	Alta	198.0	Alta	198.0	Alta	198.0	---	0.0	---	0.0
TI	M. baja	2.0	Baja	0.2	Baja	0.2	M. baja	2.0	---	0.0

Tabla 30: Valores de Ksat para cada horizonte de cada Unidad de Mapeo de suelo esc. 1: 40.000.

Grupo hidrológico del suelo (GH)

Las definiciones de las cuatro clases básicas conforme a Mockus (1972) y C. Steven Holzhey (com. per.), citado por Durán (1997), son las siguientes:

Grupo A (Bajo potencial de escurrimiento): Suelos con velocidad de infiltración relativamente alta cuando están completamente mojados y que consisten principalmente de arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos poseen una alta velocidad de transmisión del agua.

Grupo B: Suelos con velocidad de infiltración moderada cuando están completamente mojados. Estos suelos son principalmente profundos a moderadamente profundos, de drenaje moderadamente bueno a bueno y de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos poseen una velocidad de transmisión del agua moderada.

Grupo C: Suelos con velocidad de infiltración lenta cuando están completamente mojados. Estos suelos tienen generalmente una capa que impide el movimiento descendente del agua o son suelos de texturas moderadamente finas a finas. Estos suelos poseen una velocidad de transmisión del agua lenta.

Grupo D (Alto potencial de escurrimiento): Suelos con velocidad de infiltración muy lenta cuando están completamente mojados. Son generalmente arcillas con alto potencial de expansión, suelos con una napa freática alta permanente, suelos con un argipan o una capa de arcilla en o cerca de la superficie o suelos superficiales sobre material casi impermeable. Estos suelos poseen una velocidad de transmisión del agua muy lenta.

Se calcularon los GH siguiendo las recomendaciones del USDA Soil Survey, citado por Arnold (2012), dado que para la cartografía esc. 1:40.000 aún no existe un estudio publicado al respecto como es el caso de los GH de los suelos del Uruguay esc. 1:1.000.000 (Durán, 1997). El criterio adoptado fue identificar el horizonte, desde la superficie del suelo, más restrictivo en cuanto a conductividad media saturada (valores resaltados en verde en la Tabla 30), luego se compara el valor de Ksat según la Tabla 31 de referencia y se determina el GH. Esta clasificación solo considera los primeros 100cm de profundidad, además si el horizonte identificado como más restrictivo se encuentra a una profundidad entre 50-100cm entonces se incrementa un nivel de GH (por ejemplo, de C a D).

	A	B	C	D
Ksat (mm/h)	>254	84-254	8.4-84	<84

Tabla 31: Criterios para asignación de los grupos hidrológicos.

En la Tabla 32 se presentan los resultados obtenidos, y el área total ocupada por cada GH. Se puede observar que el GH predominante es el D y ocupa el 50% de la cuenca.

Unidad suelo	Clasificación suelo	Ksat min (mm/h)	GH	Area (Ha)	% Cuenca
PVi	Br-Eu-Hap-Arenosa-FaseSup	19.8	A	147001	29%
PdSC	Br-Subeu-Hap-Arenosa	198	A		
TC	Br-Subeu-Hap-Arenosa	198	A		
IC	In-Um-ArenosoFranco	198	A		
SAG	Li-Subeu-Ocr-ArenosaFranca	19.8	A		
AT	Lit-Eu-Oc-Francosa	19.8	A		
CoB	Br-Subeu-Lu-ArenoFrancosa	1.98	C	107749	21%
Gu	Br-Subeu-Tipico-Francosa	1.98	C		
Gu1	Br-Subeu-Tipico-Francosa	1.98	C		
PF	Br-Subeu-Tipico-Francosa	1.98	C		
Tap	Ver-Rup-Lu-Francosa	0.198	C		
LCV	Ver-Rup-Lu-LimoArcillosa	1.98	C		
PAr	Arg-Subeu-Mel-Abr-Francosa	0.198	D	258839	50%
Ba	Arg-Subeu-Mel-Abr-Limosa	0.198	D		
LB2	Br-Eu-Hap-ArcilloArenosa-FaseSup	0.198	D		
CQ	Br-Eu-Lu-Francosa	0.198	D		
AdJ	Br-Eu-Lu-LimoArcillosa	0.198	D		
EJ	Br-Eu-Tipico_FaseVertica	0.198	D		
LiB	Br-Eu-Tipico-Limo Arcillosa	0.198	D		
LCB	Br-Eu-Tipico-LimoArcillosa	0.198	D		
SaL	Br-Eu-Tipico-LimoArcillosa	0.198	D		
Cer	Br-Eu-Tipico-LimoArcillosa-FaseVertica	0.198	D		
SG	Br-Subeu-Hap-Francosa	0.198	D		
EAr	Br-Subeu-Lu-Francosa	0.198	D		
Gua	Br-Subeu-Lu-Francosa	0.198	D		
Re	Br-Subeu-Lu-Francosa	0.198	D		
Rg	Br-Subeu-Lu-Francosa	0.198	D		
Pi	Br-Subeu-Lu-FrancosaALimoArcillosa	0.198	D		
SRo	Br-Subeu-Lu-LimoArcillosa	0.198	D		
ET	Br-Subeu-Tipico-Francosa	0.198	D		
PiA	Fluv-HeterotextMelanico-LimoArcillosa	0.198	D		
GN	Gl-Lu-Mel-Tipico-Limo Arcillosa	0.198	D		
SR	Pl-Eu-Mel-LimoArcillosa	0.198	D		

PdV	PI-Subeu-Mel-LimoArcillosa	0.198	D		
RdP	PI-Subeu-Mel-LimoArcillosa	0.198	D		
TI	Ver-Rup-Lu-LimoArcillosa	0.198	D		
Can	Ver-Rup-Tipico-LimoArcillosa	0.198	D		

Tabla 32: Grupos hidrológicos de las Unidades de suelo y área ocupada de cada grupo en la cuenca.

Podría existir una sobreestimación del Ksat en los suelos con arcillas expansivas (vertisoles), esto implicaría un cambio en el GH para estos suelos en particular.

Volumen de agrietamiento del suelo

Se trata del volumen potencial (o máximo) de agrietamiento del perfil del suelo. Este parámetro es importante cuando los suelos dominantes poseen rasgos verticales. En Uruguay, en la década del 90, Durán en colaboración con el USDA, realizaron una serie de mediciones orientadas a determinar la capacidad máxima de los suelos de expandirse y contraerse utilizando un coeficiente denominado COEL (Coeficiente de extensibilidad lineal= largo a capacidad de campo-largo en marchitez permanente/largo en marchitez permanente). Llegaron a valores de estiramiento que oscilan en 0,18 y 0,13. A la luz de esos resultados se resolvió asignarle un valor de SOL_CRK de 0.15 a los vertisoles, de 0 a los arenosoles y a todos los otros suelos representativos, un valor por defecto de 0.1.

Albedo del suelo húmedo

El albedo del suelo húmedo representa la fracción de radiación solar que es reflejada por el suelo cuando el suelo está cercano a capacidad de campo. SWAT calcula un valor diario de albedo teniendo en cuenta el albedo del suelo, el albedo de la cobertura vegetal y la cobertura de nieve (en caso de corresponder).

En este trabajo el cálculo del albedo se hizo, a partir del color del suelo estimado con la tabla Munsell, según la siguiente fórmula:

$$\text{albedo} = 0.069 * (\text{value suelo seco}) - 0.114 \text{ (USDA-NRCS)}^2$$

2.3.3 Características químicas de suelo

Con el fin de simular adecuadamente el componente de calidad de agua, es necesario incorporar al modelo SWAT las características químicas de los suelos (tabla chm en la base de datos Access). Solo se consideran los parámetros de nutrientes en el suelo, el modelo usa estos valores para iniciar los balances en los suelos. Otros parámetros que hacen referencia a productos fitosanitarios no fueron considerados.

² Disponible en:

https://www.nrccs.usda.gov/wps/portal/nrccs/detail/national/nedc/training/soil/?cid=nrccs142p2_054253

Los parámetros químicos asociados a cada Unidad se ingresaron a la tabla “chm” de la base de datos SWAT. En la Tabla 33 se resumen con una breve descripción los parámetros que fueron ingresados³.

Variable	Unidad	Definición	Comentario
Información requerida por cada horizonte (#)			
SOL_NO3 (#)	mgN/kg	Concentración inicial de nitratos (NO_3^-)	Calculado
SOL_ORGN (#)	mgN/kg	Concentración inicial de Nitrógeno orgánico	Dato en calicatas
SOL_LABP (#)	mgP/kg	Concentración inicial de Fosforo lúbil (soluble)	Dato en calicatas (P Bray)
SOL_ORGP (#)	mgP/kg	Concentración inicial de Fosforo orgánico	Calculado
PPERCO_SUB (#)	10m ³ /Mg	Coeficiente de percolación del fósforo	Se utilizó el valor por default (10) (Arnold et al., 2012)

Tabla 33: Parámetros incluidos en la tabla .chm (Arnold et al., 2012)

SOL_NO₃

La concentración de nitratos no se encuentra dentro de los datos disponibles de las calicatas de suelo. Se consultó al experto en suelos Ing. Agr. Andrés Beretta quien indicó que este parámetro es muy variable con el momento del año, fertilización, etc. y sugirió considerar como dato promedio de suelos en Uruguay un valor de 13 ppm en superficie.

A partir de este valor en superficie se estimó para la concentración de NO_3^- (mgN/kg) para cada horizonte según la regresión propuesta por Neitsch (2011).

$$\text{NO}_3 = 13 e^{\frac{-z}{1000}}$$

Donde, z es la profundidad del piso de cada horizonte.

SOL_ORGN

La concentración de Nitrogeno orgánico no se encuentra dentro de los datos disponibles de las calicatas de suelo, por ello se calculó considerando que es aproxiadamente 98% del Nitrógeno total (Perdomo et al., sin año). El valor de Nitrógeno total fue tomado de los datos disponibles de las calicatas.

SOL_SOLP

El método Bray Nº1 es el método utilizado para evaluar el P asimilable de suelos debilmente ácidos y es el método utilizado mayoritariamente en Uruguay (Rabuffeti, 2017). La concentración de fósforo Bray Nº1 fue tomada de los datos disponibles de las calicatas de suelos. En los casos de datos faltantes fueron completados con el dato por default de SWAT de 5mgP/kg (Arnold et al., 2012).

³ Mayor información se puede encontrar en:

https://swat.tamu.edu/media/69365/ch22_input_sol.pdf

Este valor de 5mgP/kg podría en algunos casos sobreestimar en los horizontes más profundos que el horizonte A, sin bien no se consideró que esto fuera relevante puede ser objeto de estudios futuros.

SOL_ORGP

Según Hernandez et al (1995)⁴ el fósforo total se puede estimar a partir de la siguiente regresión en función del contenido de arcilla del suelo. Por otra parte, P orgánico se puede aproximar al 50% del P total.

$$Ptot \text{ (mg/kg)} = 7.0432 * \% \text{ Arc} + 78.845$$

$$Porg \text{ (mg/kg)} = 0.5 * Ptot$$

⁴ Los datos a partir de los cuales se realiza la regresión son presentados en el boletín citado, la ecuación de la regresión se presenta por Marcelo Ferrando en las notas del curso de Fertilidad (2013) de Facultad de Agronomía, UdelaR. Link: <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/Fosforo.pdf>

2.4 Datos climáticos

Precipitación

Dentro de la subcuenca del río Santa Lucía, INUMET recoge datos de precipitación de varias estaciones pluviométricas y meteorológicas que son convencionales o automáticas, entre los años 1981 y 2018. Esta información fue utilizada para representar la variabilidad de las precipitaciones dentro de la subcuenca.

La Tabla 34 y Figura 6 resumen las 28 estaciones INUMET de las cuales recibimos datos así como su localización dentro de la subcuenca.

id	id (INUMET)	Nombre	Latitud	Longitud	% Faltante
p1	2748A	25 de Agosto	-34.41200	-56.39800	2.0
p2	2549	Barriga Negra	-33.96000	-55.06000	3.6
p3	2588	Casupa_fr	-34.10200	-55.65200	1.4
p4	2634	Casupa_lv	-34.14000	-55.48200	1.9
p5	2753B	Cazot_AFE	-34.44000	-55.96000	87.2
p6	2498A	Cerro Colorado	-33.88000	-55.53000	2.5
p7	2786	Chacra Policial	-34.47000	-56.25000	37.4
p8	2673A	Chamizo_fr	-34.24000	-55.92000	3.6
p9	2725	Coronilla	-34.35000	-54.79000	3.7
p10	2757	Est. Solís	-34.37000	-55.45000	57.2
p11	2757B	Estación Solís_AFE	-34.37000	-55.96000	89.6
p12	2583	Florida	-34.08843	-56.18692	23.0
p13	2632A	Fray Marcos	-34.19500	-55.77300	5.8
p14	2683	Marmaraja	-34.26000	-54.95500	1.7
p15	2826	Mataojo	-34.63500	-55.04900	3.7
p16	2867	Aeropuerto Melilla	-34.78772	-56.26333	0.5
p17	2670	Mendoza	-34.28000	-56.21000	2.8
p18	2759	Minas	-34.37800	-55.23700	19.4
p19	2759A	Minas (Campanero)	-34.33000	-55.25000	16.2
p20	2452	Polanco	-33.89000	-55.16000	2.3
p21	2543	Reboledo	-33.99900	-55.65000	18.8
p22	2543B	Reboledo_AFE	-33.99000	-55.65000	87.3
p23	2752	San Antonio	-34.45000	-56.07900	2.2
p24	2586	San Gabriel	-34.03700	-55.88300	2.4
p25	2680	Sta. Lucía (La Calera)	-34.22000	-55.17000	10.5
p26	2715	Tala	-34.34400	-55.76100	2.4
p27	2710A	Villa Cardal	-34.29100	-56.39600	3.7
p28	2718	V. Rosario	-34.31000	-55.47000	66.6

Tabla 34: Estaciones pluviométricas de la subcuenca del río Santa Lucia

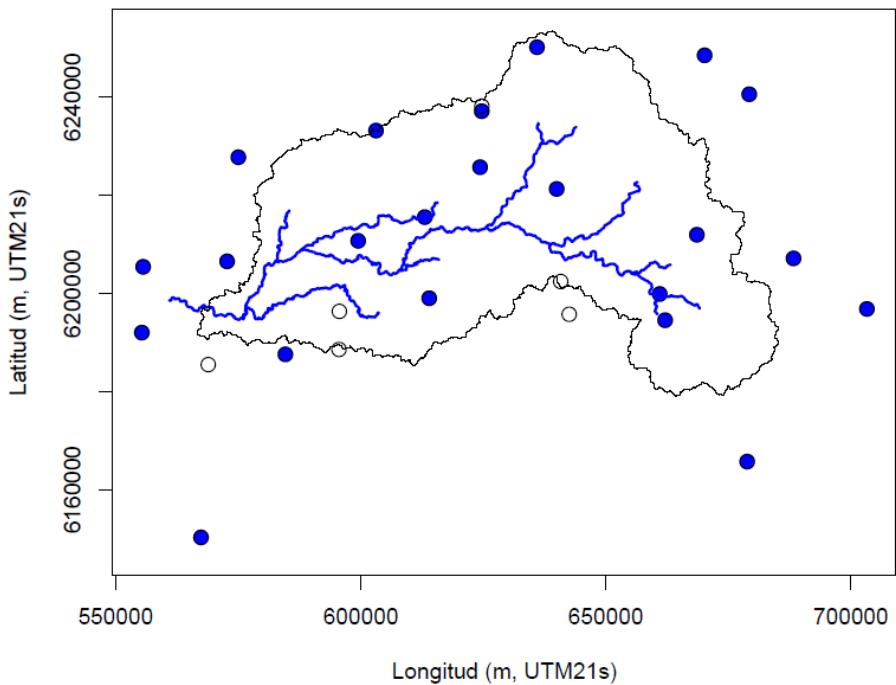


Figura 6: Pluviómetros con más del 75% del registro completo (círculos azules) y pluviómetros con más del 25% de datos faltantes (círculos blancos)

A partir de los pluviómetros que tienen al menos las tres cuartas partes del registro completo, se calculó la precipitación media diaria (PMD) para cada subcuenca del río Santa Lucía según la subdivisión nivel 3 y nivel 5 de la Dirección Nacional de Medio Ambiente.

La metodología detallada para procesar la información puntual de estaciones y estimar el set de datos de precipitación media areal está descrita en el Anexo I.

Temperatura

Los datos de temperatura usados en el modelo SWAT provienen de la estación meteorológica de INIA Las Brujas. Estos datos son accesibles y se puede descargar con el enlace siguiente:
<http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>

Radiación

Los datos de radiación usados en el modelo SWAT provienen de la estación meteorológica de INIA Las Brujas. Estos datos son accesibles y se puede descargar con el enlace siguiente:
<http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>

Humedad

Los datos de humedad usados en el modelo SWAT provienen de la estación meteorológica de INIA Las Brujas. Estos datos son accesibles y se puede descargar con el enlace siguiente:
<http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>

Velocidad de viento

Los datos de velocidad de viento usados en el modelo SWAT provienen de la estación meteorológica de INIA Las Brujas. Estos datos son accesibles y se puede descargar con el enlace siguiente:
<http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>

2.5 Fuentes puntuales de contaminación

Los datos de fuentes puntuales de contaminación dentro de la subcuenca del río Santa Lucía (efluentes de origen doméstico e industrial) surgen de los Informes Ambientales de Operación presentados a la División Control y Desempeño Ambiental de DINAMA, así como también de los datos registrados en dicha División en las instancias de inspección. La Figura 7 muestra la localización de las industrias con vertido a curso de agua registradas ante DINAMA.

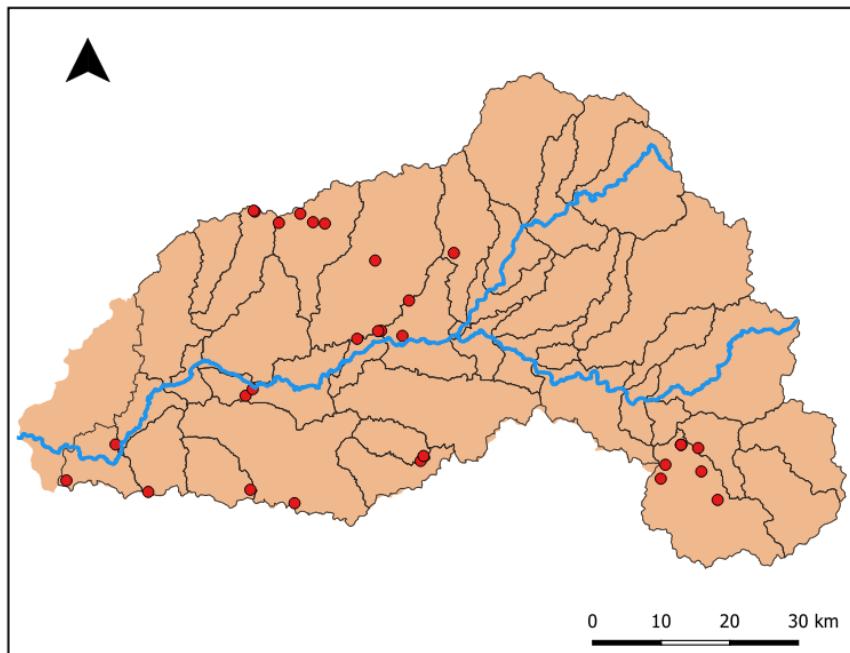


Figura 7: Ubicación industrias con vertido a curso de agua registradas ante DINAMA en la cuenca de estudio.

La Tabla 35 resume la información de los puntos de vertido utilizados en la modelación.

Fuente Puntual	Tipo de vertido	Periodo de datos disponibles
1	Efluente doméstico	2010 a 2018
2	Industria Láctea	2013 a 2018
3	Efluente doméstico	2013 a 2016
4	Industria cervecera	2018
5	Efluente doméstico	2010 a 2018
7	Frigorífico	2018

Tabla 35: Descripción de los puntos de contaminación

En el modelo SWAT, estos valores de vertidos fueron también extrapolados para los años anteriores entre 2000 y 2010 donde no se cuentan con registros. Al momento de la calibración, si es necesario, se puede rectificar estos valores por el hecho que había menos industrias antes del año 2010. A su vez, en el caso de los meses que no se cuenta con dato reportado, los mismos son completados con valores promedio del período analizado.

También, para simplificar la simulación del modelo SWAT, se sumaron los valores de contaminación de los puntos 1, 2,3 que estarán localizados en una misma subcuenca. Se consideró la suma de estos valores al lugar del punto 2.

Además de las industrias, se consideró como aporte puntual los efluentes provenientes de tambos. Se cuenta con la ubicación de los tambos en la cuenca del Santa Lucía para el 2011 (Figura 8) y el número de cabezas de ganado en cada establecimiento.

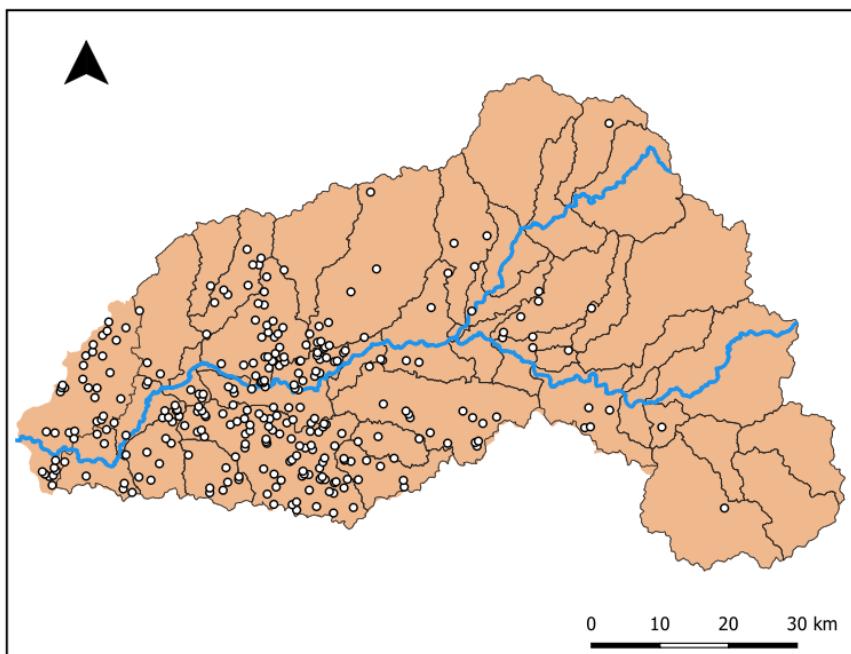


Figura 8: Ubicación de tambos en cuenca de estudio. FUENTE: DINAMA, 2018.

Se determinan los aportes realizados por los establecimientos lecheros durante el período de permanencia de los animales en la sala de ordeñe. Dichos aportes se estiman en función de la cantidad de animales por establecimiento y a partir de datos teóricos de generación diaria de

caudal, DBO5, NT y PT. La estimación teórica de los parámetros anteriores son los planteados por MVOTMA-DINAMA (2008). Los valores utilizados fueron:

- DBO: 0,912 kg/vaca.día (durante todo el día)
- N: 0,218 kg/vaca.día (durante todo el día).
- P: 0,091 kg/vaca.día (durante todo el día).
- Tiempo de estadía de los animales en sala de ordeñe: 14 % del día.
- Q: 60 L/día

El criterio utilizado en los cálculos fue que en los establecimientos con menos de 100 vacas no realizan ningún tratamiento a sus efluentes, mientras que el resto realiza un tratamiento de lagunas que remueve un 80 % de DBO5 y un 50 % de Nitrógeno total.

Para cada subcuenca se sumaron las cargas de cada componente de los efluentes de los tambos y las industrias presentes en la misma con el fin de ingresarlas al modelo como un único point source por subcuenca.

Para cada productor, se verificó si posee más o menos de 100 vacunos y se calcula la carga de contaminante en cada caso como:

Menos de 100 vacunos: $C \text{ (kg/d)} = n \times \text{carga} \times t$

Más de 100 vacunos: $C \text{ (kg/d)} = n \times \text{carga} \times t \times (1 - R)$

Donde, C es la carga de contaminante (NT, PT, DBO5), carga es el dato de carga por vacuno de la tabla xx, t es el porcentaje del día que la vaca está en el tambo y R es el porcentaje de remoción del contaminante en el tratamiento.

Los datos de las fuentes puntuales de contaminación han sido colocados en el formato SWAT dentro de la carpeta compartida del Google Drive: ...\\SWAT-SubSantaLucia\\2-Input data\\1-PointSources. Dentro de esta carpeta se encuentran los archivos point source considerando sólo las industrias (point_source) y considerando industrias y tambos (point_source con tambos), para este último caso, se debe modificar la tabla OpSchedule de la base de datos del proyecto por la tabla *OpSchedule_LECH-14%* que se encuentra en \\SWAT-SubSantaLucia\\8-Excel table-Access\\Excel table-Access_conLECH. En esta tabla, se le resta al uso de suelo LECH el aporte del 14% del día en el que se considera que el ganado se encuentra en el tambo.

4 Identificar las debilidades de los datos de entrada para planear actividades futuras de fortalecimiento de datos

De manera general en cuanto a información de entrada, se cuenta con información suficiente para una implementación adecuada del modelo. Sin embargo se identificaron algunos puntos en los que se podría mejorar.

4.1 Uso del suelo y manejo

El mapa base de uso del suelo LCCS2000 se hizo con una metodología de clasificación de imágenes satelitales por varias personas de varias instituciones. De esta manera, pueden haber sucedido confusiones al momento de la clasificación entre unas categorías (por ej. Entre agricultura y herbáceo natural) y que cada persona usó detalles de clasificaciones distintos.

Para que este mapa sea más realista, se incluyeron los Planes lecheros así como criterios para definir los usos LECH, AGRP y AGRC y que el mapa sea más realista y homogéneo, después de haber hecho una salida de campo.

Además, se simplificó la diversidad de rotaciones existentes en la cuenca eligiendo rotaciones más típicas.

Otro punto a resaltar es que se usaron fuentes con escala diferente añadiendo los Planes lecheros al mapa LCCS 2000.

Por lo tanto, sabemos que todavía podrían existir diferencias entre este mapa de uso del suelo y la realidad. Habrá que estudiar el costo tiempo-beneficio de tener un mapa más complejo respecto a los resultados SWAT.

4.2 Suelo

El mapa de suelo usado proviene de 2 fuentes distintas. Lo ideal sería tener el mapa de suelo 1:40000 del MGAP-DGRN para toda la subcuenca del río Santa Lucia. Por lo tanto, el método del número de curva reconoce 4 tipos de suelos (basados en la tasa de infiltración) y son clases bastante amplias.

Un punto importante si queremos estudiar aspectos de calidad de agua es obtener datos de cantidad de nitrógeno y fósforo en el suelo. Parece que no hay registro sistemático de estos parámetros en los suelos.

4.3 Datos climáticos

El registro de precipitación que se está usando es particularmente denso y rico en información. La zona de estudio cuenta con 28 estaciones pluviométricas con registros de datos diarios digitalizados a partir de 1981. Cabe destacar que la obtención de los registros de precipitación pasó por un estricto control de calidad por parte del INUMET lo que por una parte ralentizó el trabajo, y por otra

se aseguró de que el input de precipitación fuera confiable. En un futuro sería recomendable la automatización del control de calidad para agilizar la consulta de datos pluviométricos.

Adicional a la precipitación, se dispone de una estación climática (Las Brujas) con registro completo de todas las variables agroclimáticas (temperatura, viento, radiación, humedad, precipitación, presión atmosférica), disponible en formato diario desde 1972. Un punto que se podría mejorar sería obtener valores de estas variables en varios lugares dentro de la cuenca de estudio (por ejemplo: mediante productos satelitales).

4.4 Fuentes puntuales de contaminación

La desventaja de la información disponible de vertidos de industrias es la baja frecuencia en los datos, dependiendo de la industria se cuenta con frecuencias mensuales, semestrales o anuales. Para un modelo de paso diario lo ideal es tener registro de vertidos diario.

Para el vertido de los tambos la suposición de tratamiento de efluente para aquellos de mayor porte es una estimación muy gruesa. Lo ideal es hacer un relevamiento de los tambos existentes en la cuenca y ver como son los vertidos en cada caso. Además sólo se cuenta con la ubicación de los tambos del censo agropecuario del 2011, para actualizar el número de animales y la incorporación de nuevos establecimientos se cuenta con los datos de DICOSE, pero éstos sólo cuentan con número de animales por área de enumeración y no con la ubicación exacta del establecimiento.

5 Implementación del modelo SWAT con los datos de entrada preparados anteriormente

5.1 Proceso de implementación

Se trabajó en 2 grupos en los cuales se implementó el modelo SWAT según 2 subdivisiones de la subcuenca del río Santa Lucía (Figura 9):

- Subdivisión “nivel 3”: nivel de subcuenca igual al nivel usado para la implementación del modelo Aquatool por DINAMA (similar al nivel 3).
- Subdivisión “nivel 5”: nivel similar al nivel 5 de la subdivisión de DINAMA

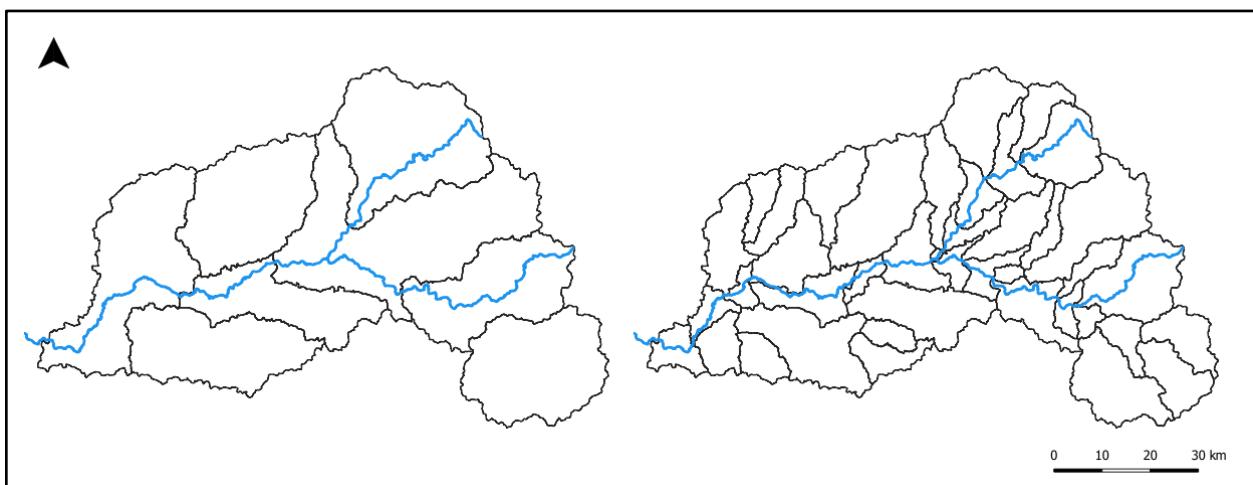


Figura 9: Niveles de subdivisión de subcuenca según DINAMA Nivel 3 (izquierda) y Nivel 5 (derecha)

5.2 Database Access

En las bases de datos Access (QSWATRef2012.mdb, NombredelProyecto.mdb), hay que importar los archivos Excel que se generaron a partir de los datos de entrada. Estas tablas se encuentran en la carpeta Google Drive (SWAT-SubSantaLucia\2-Input data\8-Excel table-Access\Excel table-Access_conLECH).

Las tablas son las siguientes:

- **Crop**: tabla con los parámetros de cultivos
- **landuses_substantalucia**: tabla relacionada con el mapa de uso del suelo (tabla de atributo)
- **soil_substantalucia**: tabla relacionada con el mapa de suelo (tabla de atributo)
- **usersoil**: tabla con los parámetros de suelos
- **Opschedules**: tabla con las rotaciones de cultivos

5.3 STEP 1 Delineate Watershed

La Figura 10 representa los parámetros y fuentes de datos que se usaron para implementar el STEP 1 del modelo SWAT a nivel 5 y nivel 3 (con distintos archivos drawoutlets.shp según los puntos de cierre que correspondan). Se añadieron las localizaciones de las estaciones de caudal en los sitios correspondientes usando la herramienta “Draw inlets/outlets”. Este paso es muy importante ya que garantizará que la subdivisión de subcuenca coincida con las estaciones de caudal, lo que permitirá realizar la calibración del modelo.

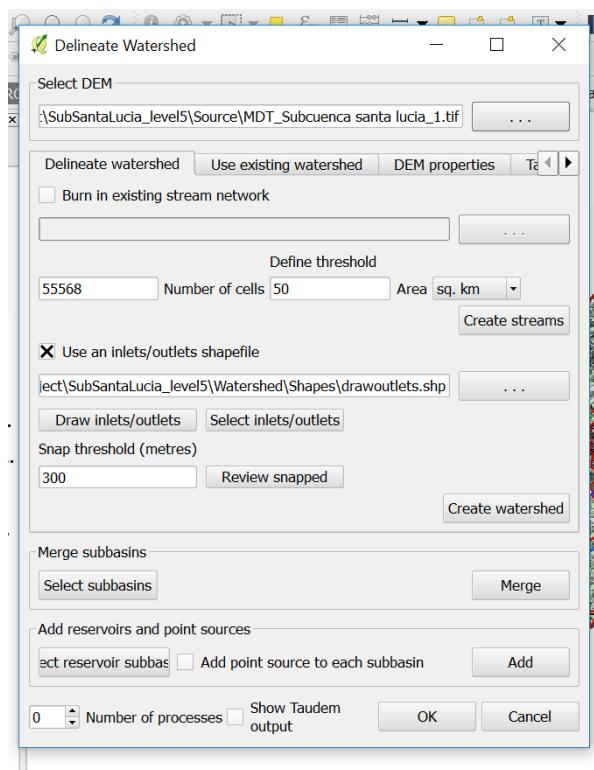


Figura 10: STEP 1 Delineate Watershed

Una vez que se crearon las subcuenca con el modelo SWAT (“Create Watershed”), se usó la herramienta “Merge subbasins” para fusionar algunas de las subcuenca con el fin de tener una división de subcuenca similar al nivel 5 y nivel 3 (Figura 11 y Figura 12) que coincide con las estaciones de caudal. Nótese que en algunos casos la subdivisión de cuencas oficial no coincide con las estaciones de caudal. En total, el número de subcuenca fueron 41 para nivel 5 y 8 para nivel 3.

Con “Add reservoirs and point sources”, se añadieron los puntos de contaminación puntuales.

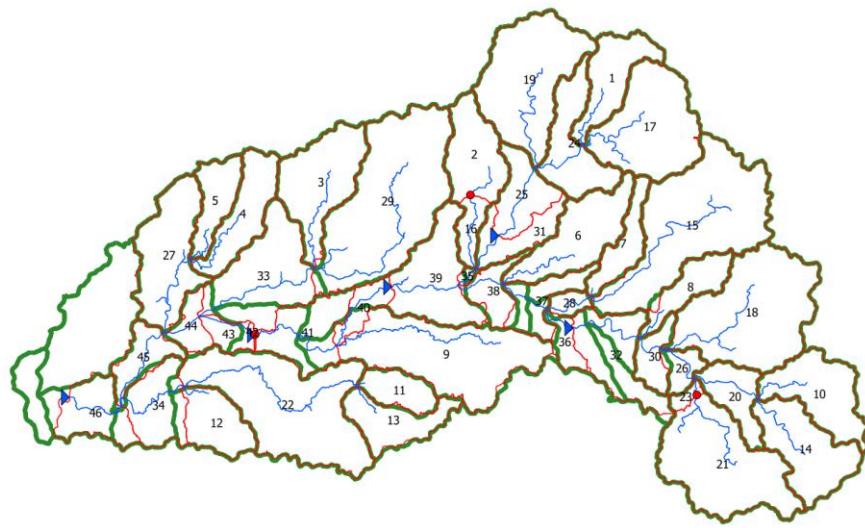


Figura 11: Comparación de la división de las subcuencas SWAT después de la fusión (en rojo) y de las subcuencas nivel 5 (en verde)

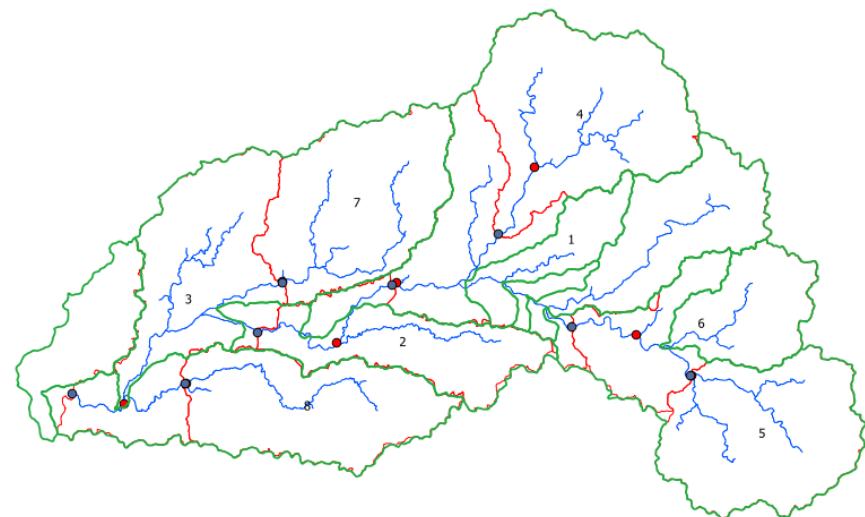


Figura 12: Comparación de la división de las subcuencas SWAT después de la fusión (en rojo) y de las subcuencas nivel 3 (en verde)

5.4 STEP 2 Create HRUs

Para el STEP 2 de la implementación SWAT se usaron el mapa de uso del suelo y el mapa de suelo creados anteriormente. La Figura 13 muestra los parámetros y fuentes de datos que se usaron para el STEP 2.

Se usaron los mismos datos y parámetros para las versiones “nivel 3” y “nivel 5”.

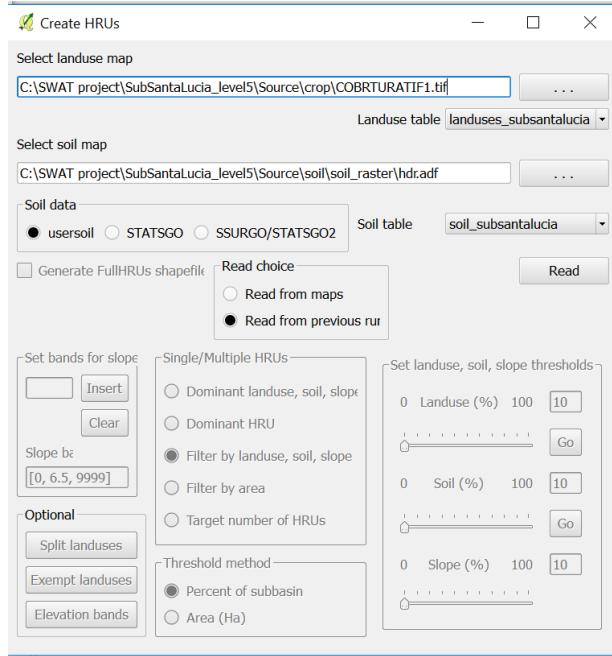


Figura 13: STEP 2 Create HRUs

Por lo tanto, los resultados a nivel 3 y 5 son diferentes por el hecho que las subcuenca no tienen el mismo tamaño. A nivel 5, el número de HRUs es mucho más grande que a nivel 3.

Para definir las bandas de pendiente, se trabajó con 2 clases. La pendiente promedia en la subcuenca río Santa Lucía es de 4.45% y la pendiente máxima es de 68.8%, entonces se eligió usar como "umbral" $4.45/68.8 = 6.5\%$.

Para disminuir el número total de HRUs y facilitar el trabajo, se usó el filtro “Filter by landuse, soil, slope” donde se atribuyó un filtro de 10% a cada categoría (valor generalmente usada) para orden 5 y filtros de 2%, 2% y 5% respectivamente para orden 3.

Nivel 5

Después del filtro, se obtiene un total de 472 HRUs.

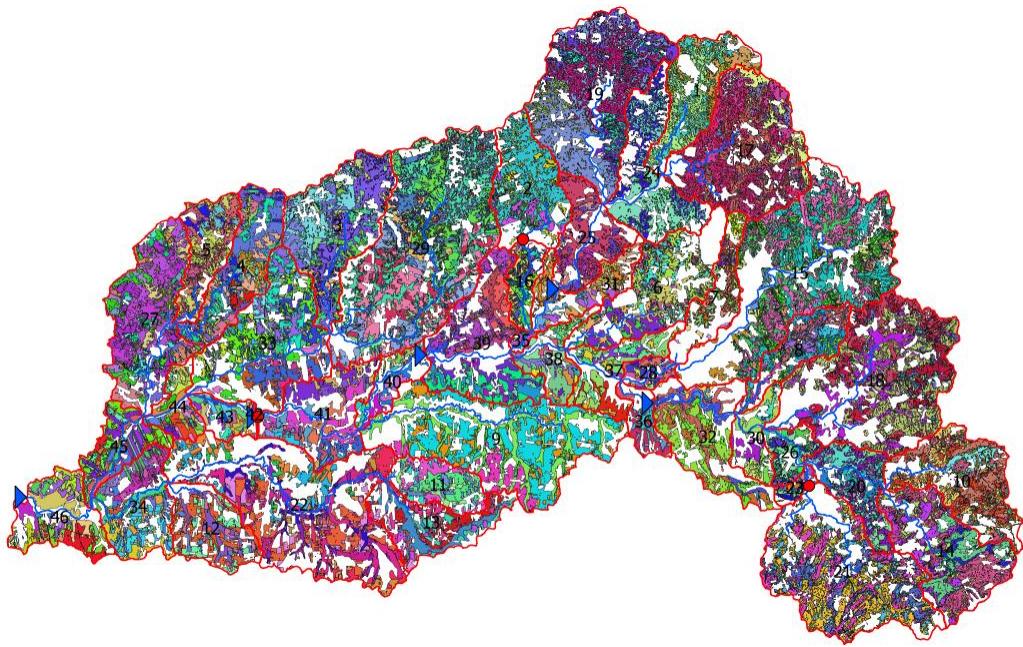


Figura 14: HRUs después del filtro para nivel 5

La Tabla 36 nos muestra las primeras líneas de la tabla HRUs después del filtro.

HRUs	Uso del suelo/Suelo/Pendiente	Area [ha]	%Cuenca	%Subcuenca
1	GRAS/TC/0-6.5	3172.86	0.65	34.7
2	GRAS/TC/6.5-9999	3362.25	0.69	36.77
3	GRAS/Gu1/0-6.5	2070.9	0.42	22.65
4	GRAS/Gu1/6.5-9999	538.3	0.11	5.89

Tabla 36: Descripción de los HRUs contenidos en la subcuenca 1

Nivel 3

Después del filtro, se obtiene un total de 721 HRUs.

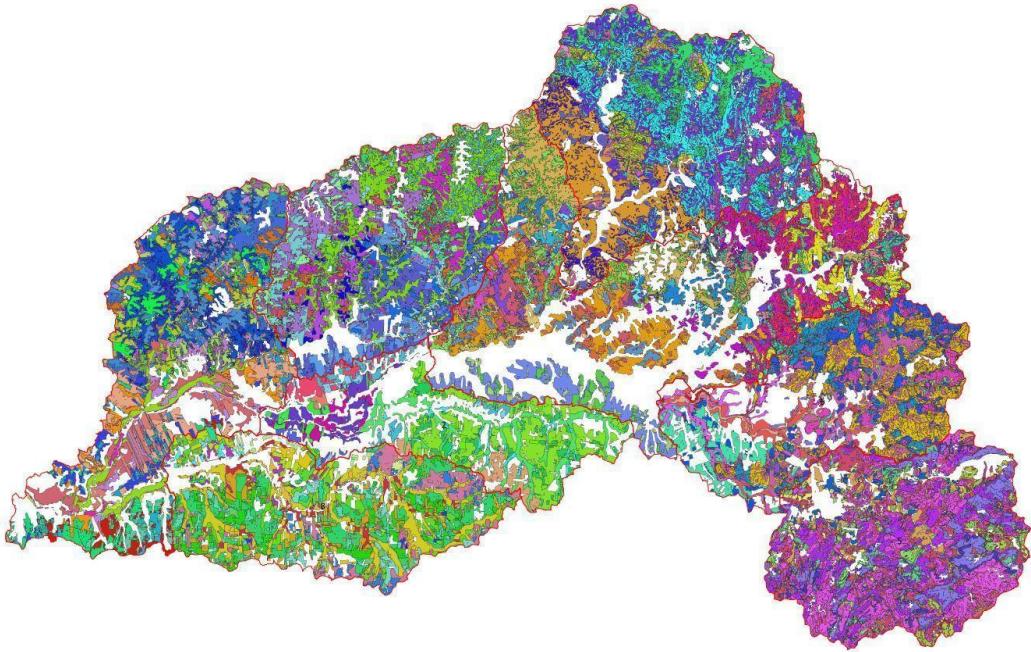


Figura 15: HRUs después del filtro para nivel 3

La Tabla 37 nos muestra las primeras líneas de la tabla HRUs después del filtro.

HRUs	Uso del suelo/Suelo/Pendiente	Área [ha]	%Cuenca	%Subcuenca
1	GRAS/TI/0-6.5	2445	0.50	2.46
2	GRAS/CQ/0-6.5	986	0.20	0.99
3	GRAS/CQ/6.5-9999	83	0.02	0.08
4	GRAS/Gu/0-6.5	1157	0.24	1.16

Tabla 37: Descripción de los HRUs contenidos en la subcuenca 1

5.5 STEP 3 Edit Input and Run SWAT

El STEP 3 es el mismo a nivel 3 o a nivel 5.

Conexión base de datos Access

El STEP 3 abre el SWAT Editor. La primera etapa es de conectar las diferentes bases de datos Access (.mdb). Hay que asegurarse que la SWAT Soils Database usada es la SWAT2012.mdb (Figura 16).

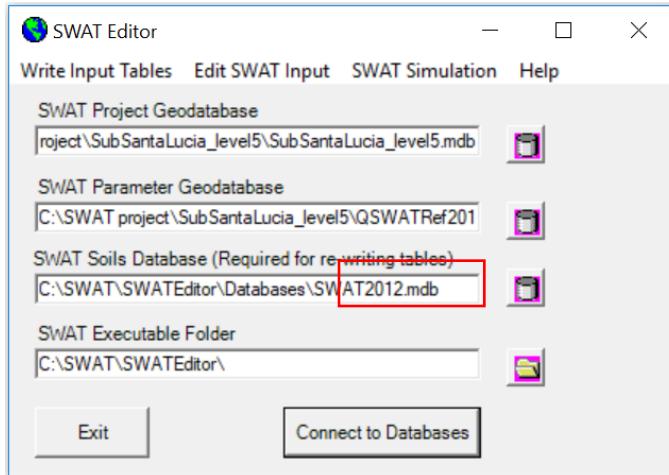


Figura 16: SWAT Editor

Importación datos de clima

Luego, hay que importar los datos de clima al modelo SWAT: “Write Input Tables” > “Weather Stations”.

Importamos los archivos txt que se preparó según la metodología descrita en 2.4.

Edit SWAT input

a. Point Source Discharges

Se importa los datos de las fuentes puntuales de contaminación abriendo la sección “Edit Point Source Inputs”. La Figura 17 muestra cómo importar los datos de fuentes puntuales de contaminación dentro del modelo.

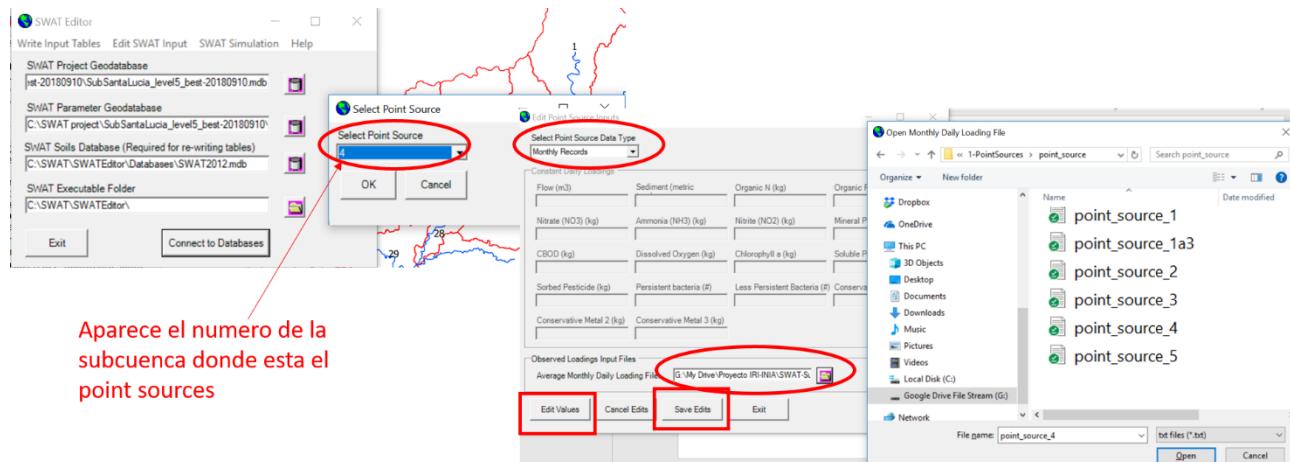


Figura 17: Importación de los “point sources” en SWAT

Una vez que se importaron estos datos, hay que “re-escribir” la tabla point sources/inlet. La Figura 18 indica cómo hacerlo.

Edit SWAT Input → Rewrite SWAT Input Files → point source/inlets
 ➔ write files

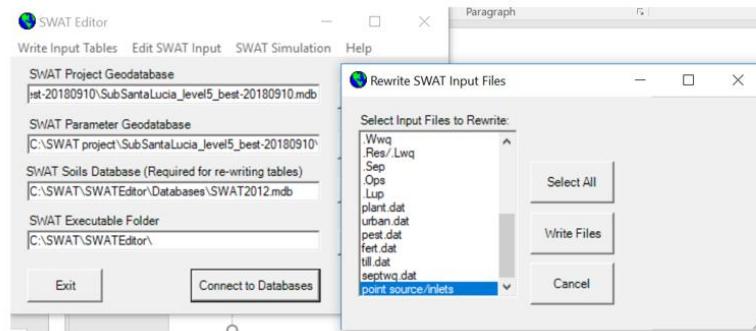


Figura 18: Rewrite point sources in SWAT Input Files

La definición de los parámetros que están en los archivos txt se encuentra en el documento siguiente: https://swat.tamu.edu/media/69392/ch31_input_meas.pdf. Los archivos txt fueron preparados en el formato SWAT como se explicó en 2.5.

b. Subbasin Data : Management

Para importar las rotaciones de cultivos generadas, hay que ir en la sección “Subbasin data” y seleccionar “Management (.Mgt)” en la “SWAT Input Table”.

Tenemos que importar y extender las rotaciones siguientes (definidas en Opschedules):

- **Landuse GRAS:** Extender la rotación GRASP a todas las subcuencas que tienen como uso de suelo GRAS, all soil and all slope.
- **Landuse AGRC:** Extender la rotación AGRC a todas las subcuencas que tienen como uso de suelo AGRC, all soil and all slope.
- **Landuse AGRP**
 - o AGRP1: Extender la rotación AGRP1 a las subcuencas impares que tienen como uso de suelo AGRP, all soil and all slope.
 - o AGRP2: Extender la rotación AGRP1 a las subcuencas pares que tienen como uso de suelo AGRP, all soil and all slope.
- **Landuse LECH**
 - o LECH1: Extender la rotación LECH1 a las subcuencas impares que tienen como uso de suelo LECH, all soil and all slope.
 - o LECH2: Extender la rotación LECH2 a las subcuencas pares que tienen como uso de suelo LECH, all soil and all slope.

La Figura 19 muestra la importación de la rotación LECH1. En “General Parameters”, es necesario definir el “Initial Land Cover” y añadir valores para LAI_INIT, BIO_INIT y PHU_PLT así como BIO_MIN para “Pasture” y “Grassland”. Estos valores están descritos en el capítulo 2.2.2 Rotación.

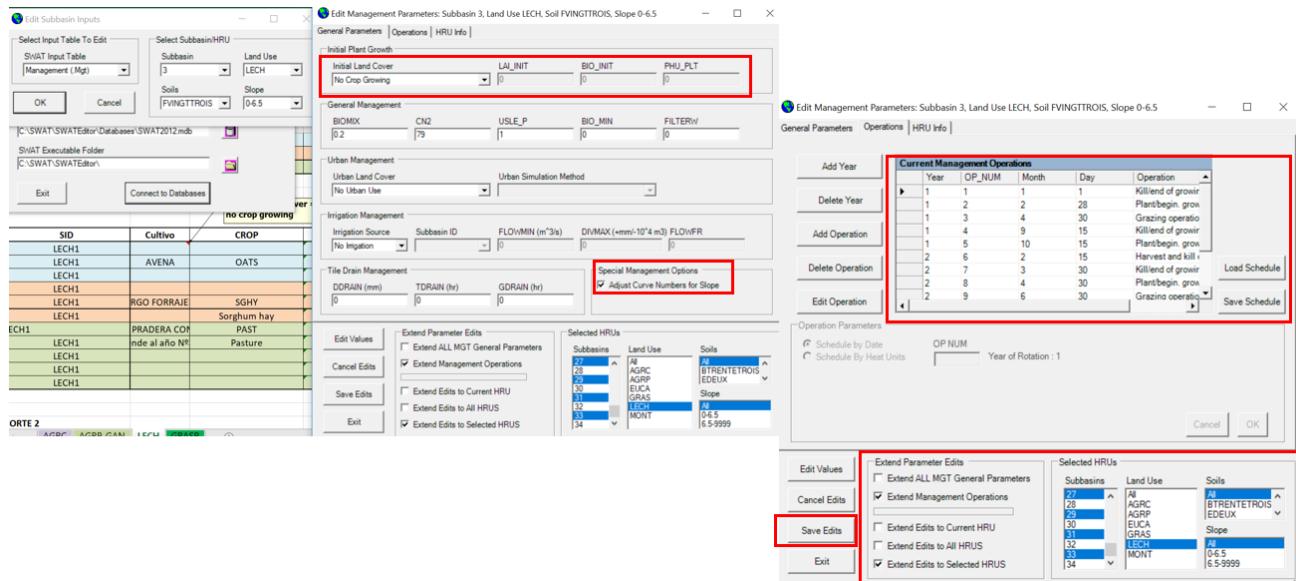


Figura 19: Importación de la rotación LECH1 en el modelo SWAT

Una vez que se importó estos datos, hay que “re-escribir” la tabla .Mgt. La Figura 20 indica cómo hacerlo.

Re-write SWAT input files .MGT after rotations

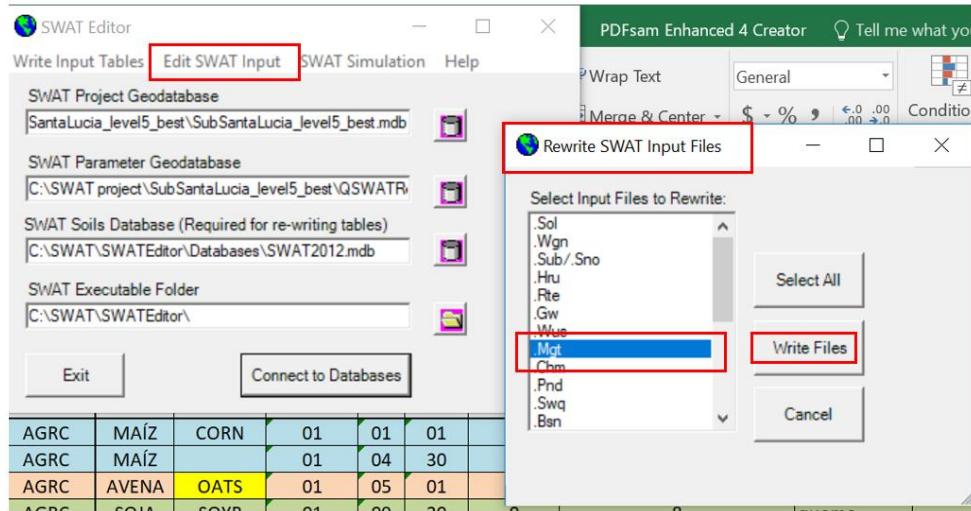


Figura 20: Re-escribir la tabla .Mgt después de importar las rotaciones

c. Subbasin Data : HRU – Maximum canopy storage

El parámetro de capacidad máxima del dosel (CANMX por “Maximum Canopy Storage”) es un parámetro bastante importante en el balance hídrico. En el SWAT, el valor de este parámetro es igual a cero por defecto. Según Kozak et al (2007) se puede estimar el CANMX con el índice de área foliar (LAI por “Leaf Area Index”). La ecuación es la siguiente: $CANMX = 0,935 + (0,498 LAI) - 0.00575 LAI^2$.

Para eucalipto, se estima un LAI entre 2 y 3 en la cuenca de Santa Lucía. El valor calculado de CANMX sería entre 1.9 mm H₂O y 2.4 mm H₂O. Con una primera calibración de este parámetro, se definió para eucalipto un CANMX de 2.4 mm H₂O.

Para los cultivos, pasturas y campo natural, se definió otro valor de CANMX. Con una primera calibración del parámetro y teniendo en cuenta valores encontrados en la tesis de Yuestas, 2014, se definió un CANMX de 1.5 mm H₂O para GRAS y las rotaciones AGRC, AGRP, LECH.

Las Figura 21 y Figura 22 indican cómo poner estos valores de CANMX dentro del modelo SWAT.

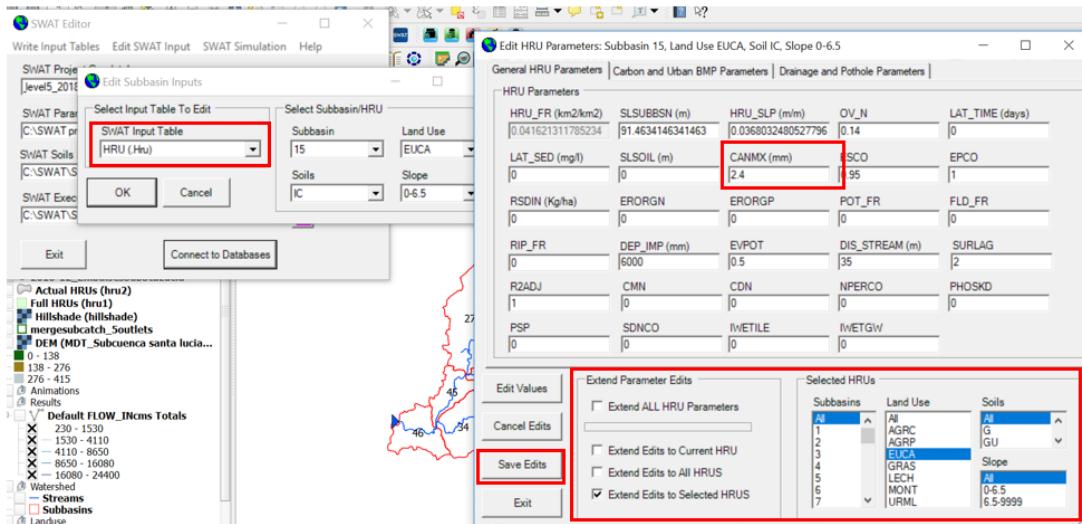


Figura 21: Editar el valor de CANMX

Rewrite SWAT input files .Hru

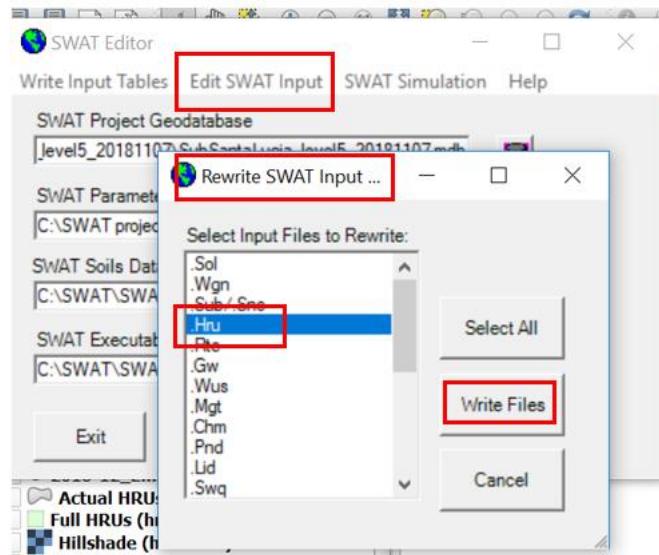


Figura 22: Re-escribir la tabla .Hru después de indicar un valor a CANMX

d. Subbasin Data : chm

Para importar los datos químicos de suelos, existen 2 maneras:

- 1) Ir en Edit SWAT inputs > Edit subbasin Inputs > .chm > manualmente editar los valores químicos. Este método es bastante lento.
- 2) Exportar la tabla .chm de la database con el nombre del proyecto
Editar la tabla chm con los valores definidos en la sección 2.3.1 Características químicas de suelo
Importar la tabla chm completada en la database con el nombre del proyecto
Del SWAT Editor, Re-write SWAT Input Files > Re-escribir .chm

5.5.1 SWAT Simulation

Una vez que tenemos todos estos datos importados en el modelo, podemos hacer una simulación SWAT. En la ventana del SWAT Editor, hay que ir a “SWAT Simulation” y luego “Run SWAT”. En la Figura 23 se muestra los parámetros definidos para la simulación SWAT.

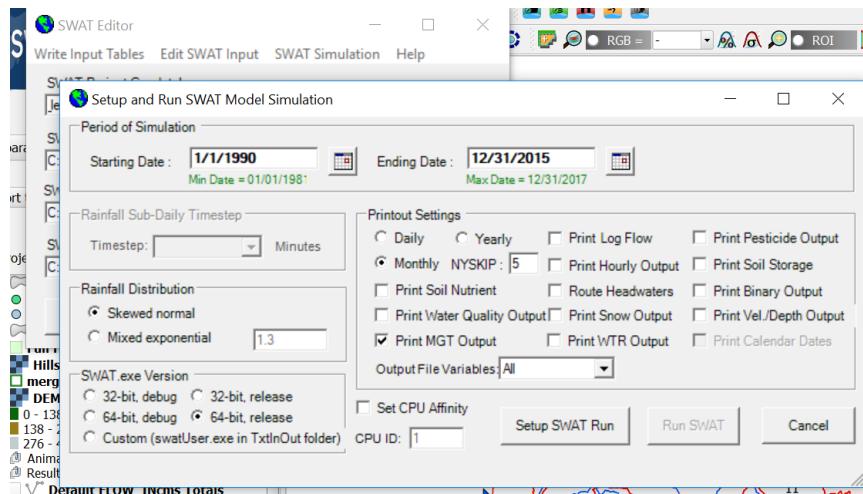


Figura 23: Definición de la simulación SWAT

Se realiza la simulación entre 1990 y 2015 con 5 años de calentamiento del modelo (NYSKIP =5), los resultados se verán en la carpeta: \NombredelProyectoSWAT\Scenarios\Default\TxtInOut.

5.5.2 Análisis SWAT Output

Antes de pasar a la calibración de los resultados obtenidos de la simulación SWAT, se realizaron unas verificaciones.

Parámetros generales

Los parámetros importantes del balance hídrico se pueden encontrar en el archivo output.std.

La Tabla 38 indica valores obtenidos después de la simulación SWAT sin calibración. Estos valores son valores promedio sobre la simulación SWAT que se realizó entre 1990 y 2015.

PRECIP	1317.0 MM
SNOW FALL	0.00 MM
SNOW MELT	0.00 MM
SUBLIMATION	0.00 MM
SURFACE RUNOFF Q	279.90 MM
LATERAL SOIL Q	40.31 MM
TILE Q	0.00 MM
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	283.07 MM
GROUNDWATER (DEEP AQ) Q	16.12 MM
REVAP (SHAL AQ > SOIL/PLANTS)	21.10 MM
DEEP AQ RECHARGE	16.01 MM
TOTAL AQ RECHARGE	320.11 MM
TOTAL WATER YLD	619.39 MM
PERCOLATION OUT OF SOIL	320.29 MM
ET	674.3 MM
PET	1054.9MM
TRANSMISSION LOSSES	0.00 MM
SEPTIC INFLOW	0.00 MM
TOTAL SEDIMENT LOADING	60.98 T/HA
TILE FROM IMPOUNDED WATER	0.000 (MM)
EVAPORATION FROM IMPOUNDED WATER	0.000 (MM)
SEEPAGE INTO SOIL FROM IMPOUNDED WATER	0.000 (MM)
OVERFLOW FROM IMPOUNDED WATER	0.000 (MM)

Tabla 38: Parámetros generales de salida SWAT

Discutiendo con el grupo de trabajo se hizo una tabla con valores de referencia para Uruguay (Tabla 39).

Hydrology			
Precipitation	1300	mm/yr	
Evaporation and transpiration	600-750	mm/yr	
PET	1050-1150	mm/yr	
Surface runoff	400-500	mm/yr	
Water balance ratios			
Streamflow/Precipitation	30-40	%	
Baseflow/Total flow	20	%	
Surface runoff/Total flow	80	%	
Percolation/Precipitation	10	%	

Deep Recharge/Precipitation	1	%
ET/Precipitation	45 - 50	%

Tabla 39: Valores de referencia para Uruguay

Los valores de precipitación, evapotranspiración y evapotranspiración potencial están en el rango de valores realistas para el Uruguay.

Parámetros de cultivos

Se analizaron los valores de biomasa obtenidos de la simulación SWAT para ver si estos valores son realistas, mirando el orden de magnitud.

Se escribieron scripts en R para automatizar el análisis de los resultados SWAT.

a. Output.mgt

El archivo Output.mgt contiene los scripts R y análisis de valores de biomasa para los cultivos integrados al modelo SWAT.

La Figura 24 muestra valores de biomasa del cultivo sorgo al momento de la cosecha. A través de los años de simulaciones, los valores de biomasa oscilan entre 14 y 18 t/ha. Estos valores son considerados como realistas. Un punto de atención es que el SWAT considera que la biomasa incluye las raíces lo cual es muy difícil de medir.

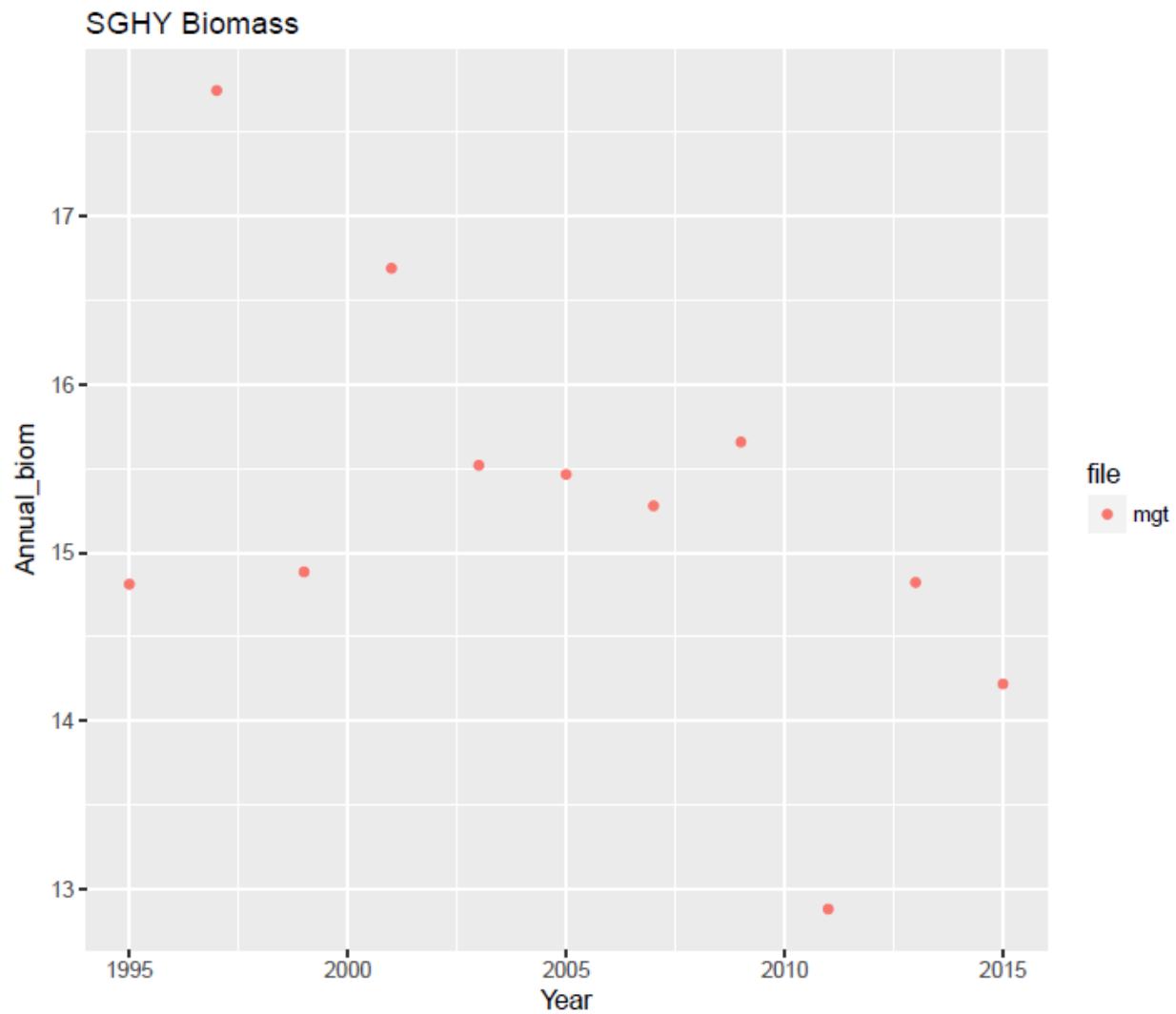


Figura 24: Valores simulados de biomasa de sorgo al momento de la cosecha

La Figura 25 muestra valores de biomasa del cultivo maíz al momento de la cosecha. A través de los años de simulaciones, los valores de biomasa oscilan entre 10 y 21 t/ha. Estos valores son considerados como realistas.

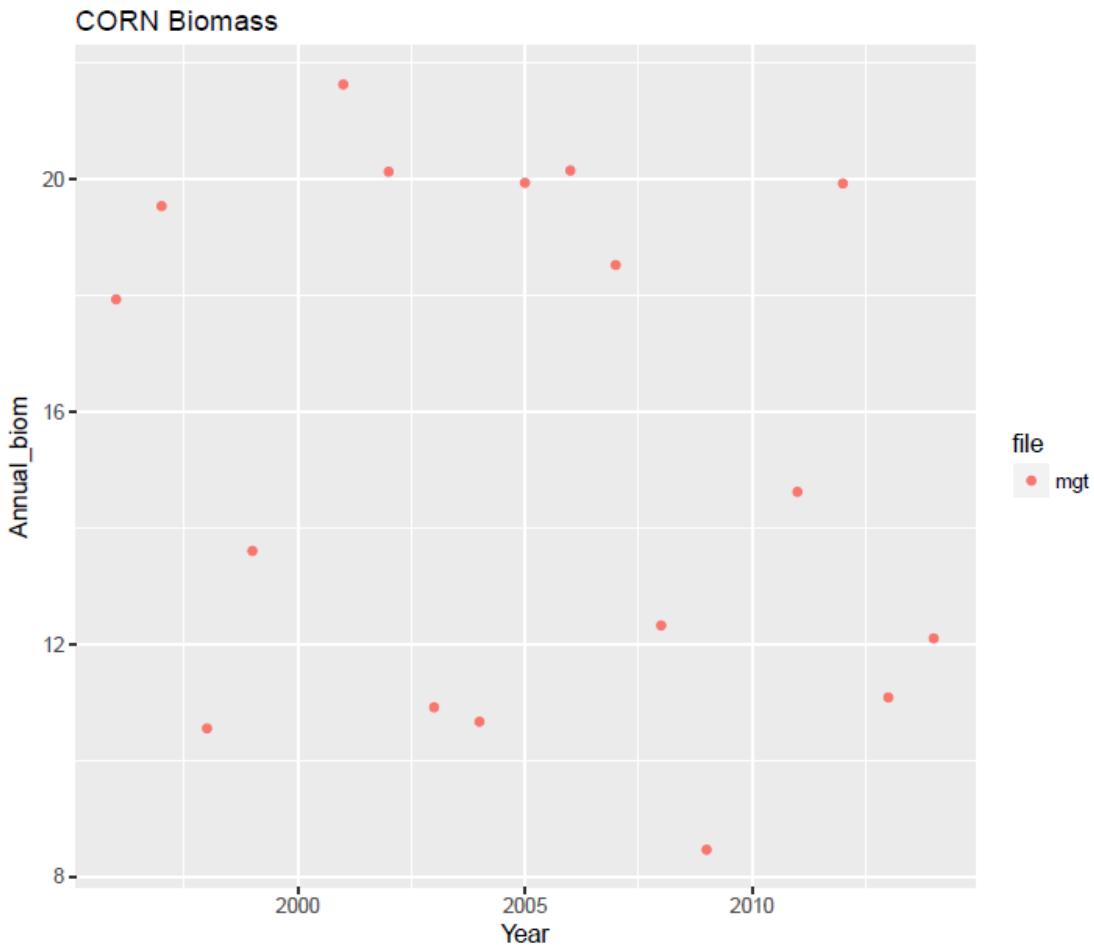


Figura 25: Valores simulados de biomasa de maíz al momento de la cosecha

Para mayor análisis de biomasas para otros usos de suelo hay que referirse al documento Output.mgt.

b. Output.hru

El archivo OutputSWAT_output.hru contiene también los scripts R y análisis de resultados de evolución de biomasa y evapotranspiración así como también de índices de área foliar. Se muestran unos ejemplos de análisis que se hizo respecto a la evolución de la biomasa, índice foliar y evapotranspiración para el cultivo soja.

La Figura 26 muestra la evolución de la biomasa simulada entre 2000 y 2015. Cada mes da un valor simulado de biomasa de soja que incluye la biomasa de las raíces.

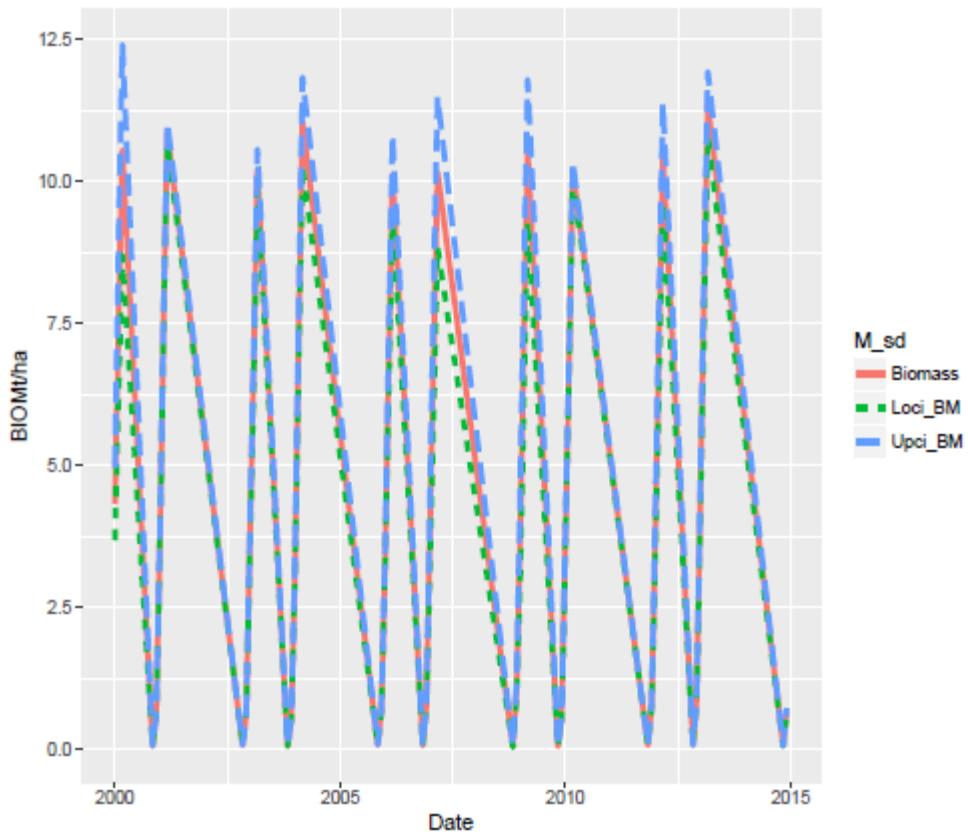


Figura 26: Evolución de la biomasa simulada de la soja entre 2000 y 2015

La Figura 27 muestra la evolución del índice foliar simulado para la soja entre los años 2000 y 2015.

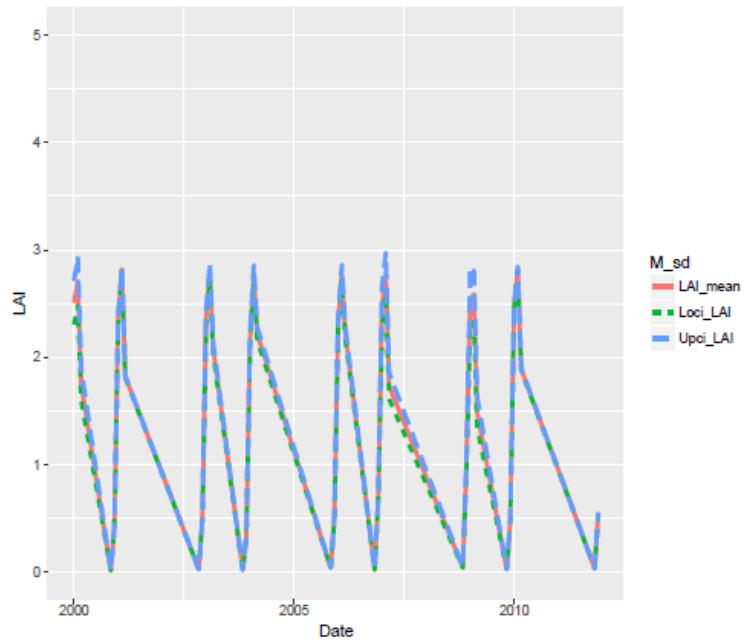


Figura 27: Evolución del índice de área foliar de la soja

La Figura 28 muestra cómo evoluciona la evapotranspiración de la soja entre los años 1995 y 2015.

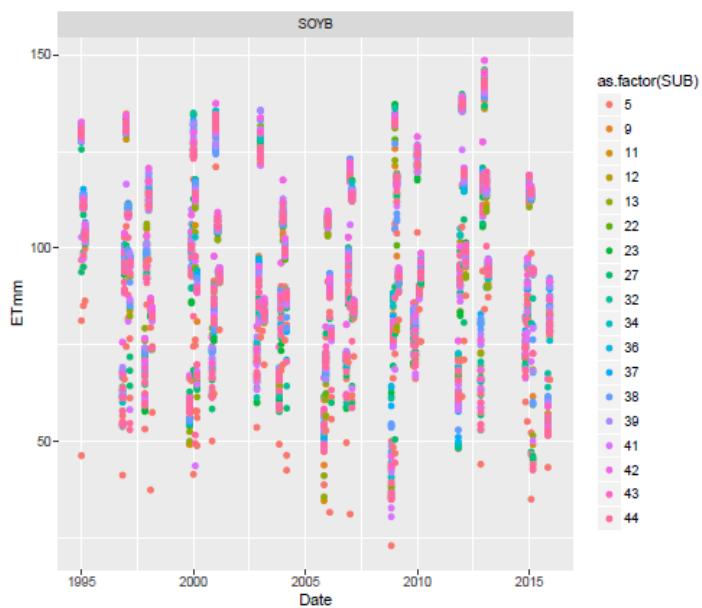


Figura 28: Evolución de la evapotranspiración de la soja

Para mayor análisis de biomasas para otros cultivos y usos de suelo hay que referirse al documento Output.hru.

6 Bibliografía

- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., Neitsch, S. L.. 2012. Soil & Water Assessment Tool, input / output documentation version 2012. Texas Water Resources Institute.
- Baeza, S., Paruelo, J.M., Ayala, W. 2011. Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. *Agrociencia Uruguay* **15** n°2,48-59.
- Biabani, A., Etesami, M., Rahemi Karizaki, A., Gholizadeh, A., Sabouri, H. Response on light interception and radiation use efficiency of selected winter cereals at optimum N fertilizers. *Agronomy Research* **16**.
- Birch, C.J., Hammer, G.L., Rickert, K.G. 1999. Dry matter accumulation and distribution in five cultivars of maize (*Zea mays*): relationships and procedures for use in crop modelling. *Australian Journal of Agricultural Research* **50**, 513-27.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H. 2003. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Research* **87**, 117–129.
- Confalone, A. and Navarro Dujmovich, M. 1999. Influencia do “Déficit” Hídrico sobre a Eficiência da Radiação Solar em Soja. *Rev. Bras de Agrociência* **5** n°3, 195-198.
- De Oliveira Ponte de Souza, P.J., Ribeiro, A., Paulino da Rocha, E.J., Bouça Farias, J.R., Silva Loureiro, R., Capela Bispo, C., Sampaio, L. 2009. Solar radiation use efficiency by soybean under field conditions in the Amazon region. *Pesq. agropec. bras* **44**, 1211-1218.
- Durán, A.. 1997. Clasificación hidrológica de los suelos del Uruguay. Agrociencia. Vol 1. Nº 1. pag 15-29
- Ferrando, M, 2013. Fósforo. Notas del curso de Fertilidad. Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica. Disponible en: <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/Fosforo.pdf>
- Grigera, G., Oesterheld, M., Pacín, F. 2007. Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agricultural Systems* **94**, 637–648.
- Henskens, F.L., Battaglia, M., Cherry, M.L., Beadle, C.L. 2001. Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*. *Trees* **15** n°6, 365–377.
- Hernandez, J., Otegui, O., Zamalvide, J. 1995. Formas y contenidos de fosforo en algunos suelos del Uruguay. Boletín de investigación N°43. Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica.
- Kozak, J.A., Ahuja, L.R, Green, T.R. and Ma, L. 2007. Modelling crop canopy and residue rainfall interception effects on soil hydrological components for semi-arid agriculture. *Hydrological Processes* **21**, 229–241
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1: 1.000.000. MGAP, 1976.

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca – Dirección General de Recursos Naturales Renovables (MGAP-RENARE). 2014. Manual de descripción, muestreo de suelos y análisis de laboratorio; compilación del Departamento de Estudios Básicos de Suelos. Disponible en:
<http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-de-recursos-naturales/suelos/estudios-basicos-de-suelos/manual>

Molfino, J.H. and Califra, A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay. Segunda aproximación. División Suelos y Aguas Dirección General de Recursos Naturales Renovables Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. 2011. Soil & Water Assessment Tool, theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report N°406.

Perdomo, C., Barbazán, M., Durán, J. M. Nitrógeno. Fascículo de la cátedra de Fertilidad de la Facultad de Agronomía. Disponible en:

http://agros.fagro.edu.uy/moodle/pluginfile.php/75167/mod_resource/content/4/Tomo_N.pdf

Petrova Chimonyo, V.G., Thembinkosi Modi, A., Mabhaudhi, T. 2018. Sorghum radiation use efficiency and biomass partitioning in intercrop systems. *South African Journal of Botany* **118**, 76–84.

Piñeiro, G., Oesterheld, M., Paruelo, J.M. 2006. Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. *Ecosystems* **9**, 357–373.

Piotrowska, W., Pietkiewicz, S., Wyszyński, Z., Michalska, B. Photosynthetic radiation use efficiency of different oat cultivars under differentiated nitrogen fertilization. 2008. *AGRONOMIJAS VĒSTIS* **10**, 161-167.

Rabuffeti, A. 2017. La fertilidad del suelo y su manejo, volumen 2. Montevideo, (Uruguay): Hemisferio Sur.

Vassallo, M.M., Dieguez, H.D., Garbulsky, M.F., Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M. 2012. Grassland afforestation impact on primary productivity: a remote sensing approach. *International Association for Vegetation Science. Applied Vegetation Science*, 1-14.

Yuestas David. 2014. Using field measured parameters with the SWAT hydrological model to quantify runoff at the sub-watershed level. Thesis for graduate program in geography, York University, Toronto.

ANEXO I - Precipitacion media para las subcuenca de nivel 3 y 5 de la cuenca del río Santa Lucía

Precipitación media para las subcuenca de nivel 3 y 5 de la cuenca del río Santa Lucía

Rafael Navas

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - Uruguay

2018-07-20

1 Introducción

El presente documento tiene como objetivo mostrar el cálculo de la precipitación media para las sub-cuenca del río Santa Lucía según la subdivisión nivel 3 y nivel 5 del Director Nacional de Medio Ambiente (DINAMA - MVOTMA, Figure 1). El producto de precipitación media se realiza para ser probado como una alternativa que busca mejorar la entrada de precipitación en la modelación lluvia - escorrentía con el modelo SWAT.

El resultado de este trabajo es la precipitación media diaria para cada subcuenca (PMD). La PMD ha sido colocada en el formato de precipitación SWAT dentro de la carpeta compartida de dropbox: SWAT-SubSantaLucia/2-Input data/4-Clima/PMD/. Desde el punto de vista del SWAT, cada archivo PMD representa un pluviómetro “virtual”, cuyas coordenadas han sido definidas con los centroides de cada subcuenca. De esta manera se forzará a que el modelo SWAT trabaje con una entrada de precipitación previamente procesada.

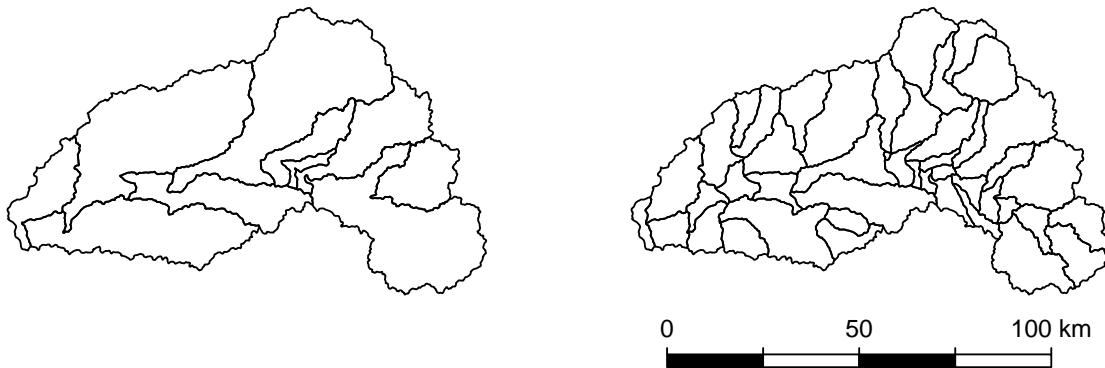


Figure 1: Niveles de subdivisión de subcuenca segun DINAMA. Nivel 3 (izquierda) y Nivel 5 (derecha).

2 Selección de datos y período de registro

La región cuenta con los 28 pluviómetros que se muestran en la Table 1. La red para el computo del krigeado está compuesta por los pluviómetros que tienen al menos las tres cuartas partes del registro completo. Esto se realizó con el fin de tener una red pluviométrica relativamente homogénea y estática a lo largo del período 1981 - 2016. En otras palabras, los pluviómetros Cazot_AFE, Chacra Policial, Est. Solís, Estación Solís_AFE, Reboledo_AFE, V. Rosario, han sido descartados. La posición geográfica de los pluviómetros puede verse en la Figure 2.

Table 1: Estaciones pluviométricas de la cuenca del río Santa Lucía.

id	id (INUMET)	Nombre	Latitud	Longitud	% Faltante
p1	2748A	25 de Agosto	-34.41200	-56.39800	2.0
p2	2549	Barriga Negra	-33.96000	-55.06000	3.6
p3	2588	Casupa_fr	-34.10200	-55.65200	1.4
p4	2634	Casupa_lv	-34.14000	-55.48200	1.9
p5	2753B	Cazot_AFE	-34.44000	-55.96000	87.2
p6	2498A	Cerro Colorado	-33.88000	-55.53000	2.5
p7	2786	Chacra Policial	-34.47000	-56.25000	37.4
p8	2673A	Chamizo_fr	-34.24000	-55.92000	3.6
p9	2725	Coronilla	-34.35000	-54.79000	3.7
p10	2757	Est. Solís	-34.37000	-55.45000	57.2
p11	2757B	Estación Solís_AFE	-34.37000	-55.96000	89.6
p12	2583	Florida	-34.08843	-56.18692	23.0
p13	2632A	Fray Marcos	-34.19500	-55.77300	5.8
p14	2683	Marmaraja	-34.26000	-54.95500	1.7
p15	2826	Mataojo	-34.63500	-55.04900	3.7
p16	2867	Aeropuerto Melilla	-34.78772	-56.26333	0.5
p17	2670	Mendoza	-34.28000	-56.21000	2.8
p18	2759	Minas	-34.37800	-55.23700	19.4
p19	2759A	Minas (Campanero)	-34.33000	-55.25000	16.2
p20	2452	Polanco	-33.89000	-55.16000	2.3
p21	2543	Reboledo	-33.99900	-55.65000	18.8
p22	2543B	Reboledo_AFE	-33.99000	-55.65000	87.3
p23	2752	San Antonio	-34.45000	-56.07900	2.2
p24	2586	San Gabriel	-34.03700	-55.88300	2.4
p25	2680	Sta. Lucía (La Calera)	-34.22000	-55.17000	10.5
p26	2715	Tala	-34.34400	-55.76100	2.4
p27	2710A	Villa Cardal	-34.29100	-56.39600	3.7
p28	2718	V. Rosario	-34.31000	-55.47000	66.6

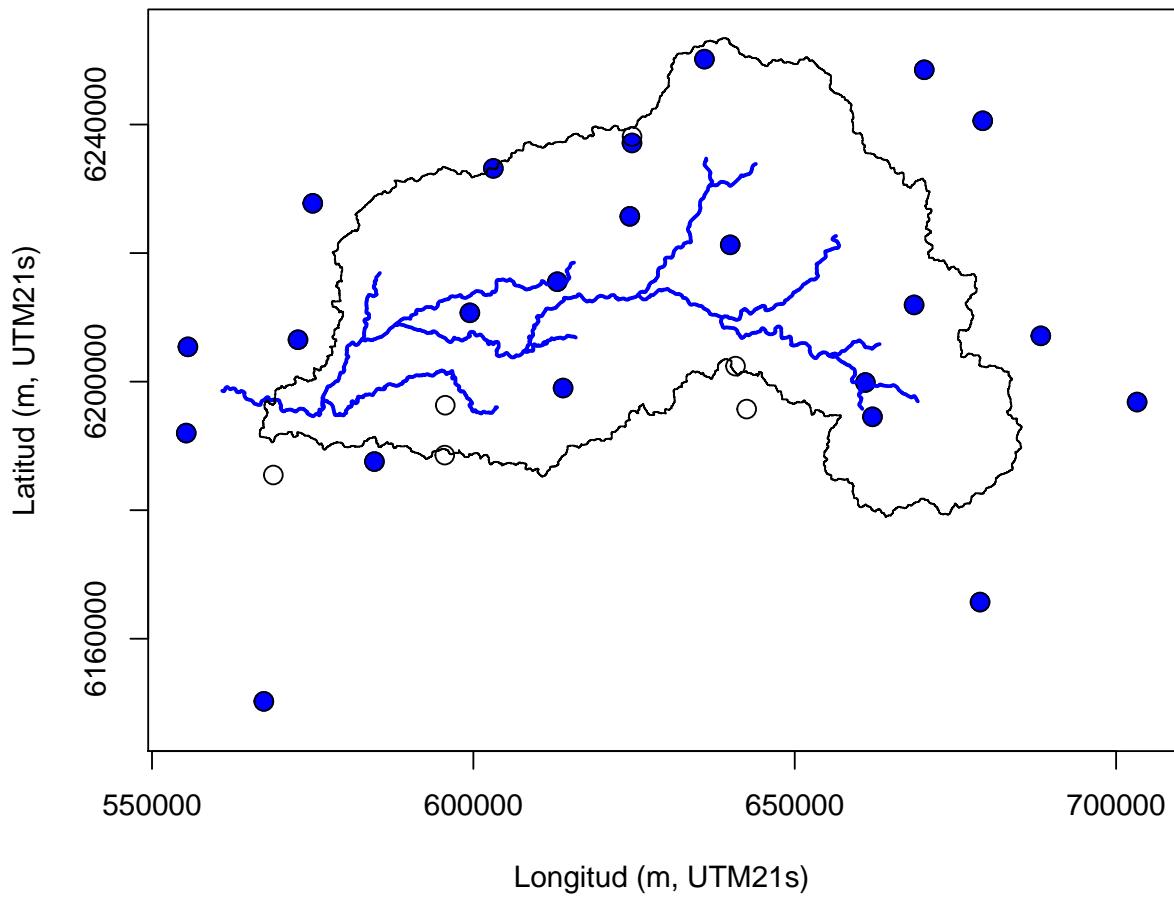


Figure 2: Pluviómetros con mas del 75% del registro completo (círculos azules) y pluviómetros con mas del 25% de datos faltantes de la red del Santa Lucía.

3 Krigeado

Se realizó el krigeado utilizando el paquete gstat (<https://cran.r-project.org/web/packages/gstat>). La función “krige” fue parametrizada para que utilizara solamente los 5 pluviómetros mas cercanos al punto de estimación. Se utilizó un variograma de tipo esférico estimado para cada día de lluvia (un día de lluvia está definido cuando ocurre precipitación en al menos una estación).

Adicionalmente se verificó el performance de la estimación mediante validación cruzada. Se observó de forma general un coeficiente R2 igual a 0.73 y sesgo igual a 1.01. La figura 3 muestra el coeficiente R2 y el sesgo en función del mes. Se observa que los meses de verano (especialmente enero y febrero) el performance de la estimación desciende. Este resultado se puede explicar ya que estos meses están caracterizados por eventos de tipo convectivo los cuales tienen mayor variabilidad espacial.

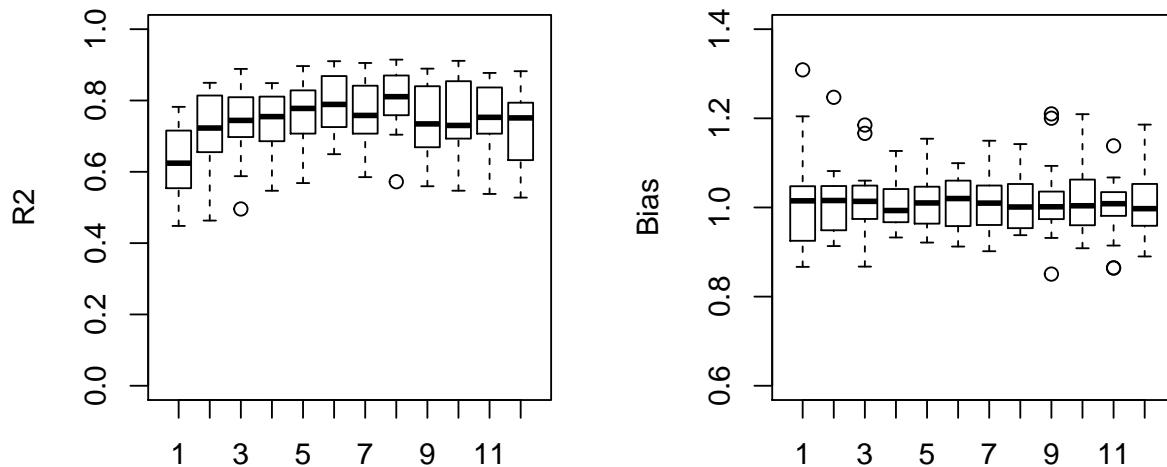


Figure 3: Coeficiente R2 (izquierda) y sesgo (derecha) obtenidos mediante validación cruzada en función del mes de estimación.

4 Anexo

A continuación se anexa el script de calculo en lenguaje R.

```
rm(list=ls())
library(maptools)
library(raster)
shp_dir = "C:/Users/Rafael Navas/Documents/shapefiles/"
dec = CRS("+init=epsg:4326")
utm = CRS("+proj=utm +zone=21 +south +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m +no_defs")
channels = readShapeLines("C:/Users/Rafael Navas/Documents/shapefiles/
                           caucesSL200.shp", proj4string=utm)
sb_3 = readShapePoly("C:/Users/Rafael Navas/Documents/SWAT/
                      SWAT-SubSantaLucia/2-Input data/0-Cuencas/Shape/
                      cuencashidrograficasnivel3_subcuencasantalucia.shp",
                      proj4string=dec)
sb_5 = readShapePoly("C:/Users/Rafael Navas/Documents/SWAT/
                      SWAT-SubSantaLucia/2-Input data/0-Cuencas/Shape/
                      cuencashidrograficasnivel5_subcuencasantalucia.shp",
                      proj4string=dec)
sb_total = readShapePoly("C:/Users/Rafael Navas/Documents/shapefiles/
                           subcuencas_SL_pasopache.shp", proj4string=utm)

#delete ~empty polygons
area_sb = round(area(sb_3)/1000000,2)
sb_3 = sb_3[area_sb>40,]
area_sb = round(area(sb_5)/1000000,2)
sb_5 = sb_5[area_sb>2,]
sb_3 = spTransform(sb_3,utm)
sb_5 = spTransform(sb_5,utm)

xy = read.csv("C:/Users/Rafael Navas/Documents/SWAT/SWAT-SubSantaLucia/
               2-Input data/4-Clima/Inumet/INUMET_2018-03-16/
               Pcp_subsantalucia.csv")
xy_dec = data.frame(x=xy$x, y=xy$y)
xy_dec = SpatialPoints(xy_dec, proj4string=dec)
xy_utm = spTransform(xy_dec,utm)

#lectura de precipitacion
prec_dir = paste("C:/Users/Rafael Navas/Documents/cursos/201807_ModHidro/
                  interpolacion/precipitacion/",sep="")
rg_file = "tab.RDATA"
load(paste(prec_dir,rg_file,sep="")) #tab

#datos faltantes
na.count = is.na(tab[,2:29])
na.count.pdt = apply(na.count,1,sum) #datos faltantes en funcion del tiempo
na.count.rg = apply(na.count,2,sum) #datos faltantes por estación

p.count = round(na.count.rg/nrow(tab)*100,1)
p.thr = 3500/nrow(tab)*100

thr = 3500

rg = (1:28)[na.count.rg<=thr]
rg.OK = xy_utm[rg]
```

```

library(gstat)
t1 = Sys.time()
pa3 = matrix(ncol=(nrow(sb_3)+1), nrow=0)
pa5 = matrix(ncol=(nrow(sb_5)+1), nrow=0)
Pcer03 = cbind(x=coordinates(sb_3)[,1],y=coordinates(sb_3)[,2],var1.pred=0,var1.var=NA)
Pcer05 = cbind(x=coordinates(sb_5)[,1],y=coordinates(sb_5)[,2],var1.pred=0,var1.var=NA)

p_val = data.frame(x=vector(length=0),y=vector(length=0),fecha=vector(length=0),
                     sim=vector(length=0),obs=vector(length=0))

anhos = as.numeric(format(tab[, "date"], "%Y"))
anhos = (anhos>=1981) & (anhos<=2016)
anhos = (1:nrow(tab))[anhos]

for(pdt in anhos){

  fecha = tab[pdt,"date"]
  xyz = data.frame(x=coordinates(rg.OK)[,1],y=coordinates(rg.OK)[,2],
                    z=as.numeric(tab[pdt,rg+1]))
  xyz = xyz[!is.na(xyz[, "z"])],]

  if(!all(xyz[, "z"]==0)){
    #variograma
    xyz.vgm = variogram(y~1,location = ~x+y,data=xyz)
    xyz.fit = fit.variogram(xyz.vgm,
                            model=vgm(psill=1.,model="Sph",range=60000,nugget=0.),
                            fit.sills = TRUE, fit.ranges = FALSE,fit.method = 6)
    #krigeado
    xyz.sp = xyz
    coordinates(xyz.sp) <- ~x + y
    crs(xyz.sp) = utm

    #nivel 3
    krig_sb = krige(z~1,xyz.sp,newdata=sb_3,model=xyz.fit,nmax=5)
    pa3 = rbind(pa3, data.frame(fecha=fecha,data.frame(krig_sb)))

    #nivel 5
    krig_sb = krige(z~1,xyz.sp,newdata=sb_5,model=xyz.fit,nmax=5)
    pa5 = rbind(pa5, data.frame(fecha=fecha,data.frame(krig_sb)))

    #cross-validation
    krig_cv = krige.cv(z~1,xyz.sp,model=xyz.fit,nmax=5)
    p_val = rbind(p_val,data.frame(x=coordinates(krig_cv)[, "x"],
                                    y=coordinates(krig_cv)[, "y"],
                                    fecha=fecha,
                                    sim=krig_cv$var1.pred,
                                    obs=krig_cv$observed))
  }else{
    pa3 = rbind(pa3, data.frame(fecha=fecha,Pcer03))
    pa5 = rbind(pa5, data.frame(fecha=fecha,Pcer05))
  }
}

t2 = Sys.time()

```

*#pa3 y pa5 son la precipitacion media para cada subcuenca segun los niveles 3 y 5
#p_val es el resultado de la validacióno cruzada*

Calculo de la precipitacion media areal.Codigos R.

Version 2

Rafael Navas

April 4, 2019

Calculo de variogramas

Se aplica la función automap para estimar de manera automática el variograma en cada día. Los resultados se guardan en una variable de tipo lista.

```
C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/SLprecipitacion/VariogramasEsfericos_script.R  
#variogramas santa lucía
```

```
rm(list = ls())  
library(raster)  
library(zoo)  
library(automap)  
library(gstat)  
  
#sistemas de coordenadas  
dec = CRS("+init=epsg:4326")  
utm = CRS("+proj=utm +zone=21 +south +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m +no_defs")  
  
#lectura de datos de precipitacion  
load("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/SLprecipitacion/tab.RDATA")  
xy = read.csv("C:/Users/Rafael Navas/Documents/SWAT/SWAT-SubSantaLucia/2-Input data/  
        4-Clima/Inumet/INUMET_2018-03-16/Pcp_substantalucia.csv")  
xy_dec = data.frame(x=xy$x, y=xy$y)  
xy_dec = SpatialPoints(xy_dec, proj4string=dec)  
xy_utm = spTransform(xy_dec,utm)  
  
vario = list()  
  
for(j in 1:13149){  
  
    p = tab[j,paste0("p",1:28)]  
    na = is.na(p)  
  
    p_dia = p[!na]  
    xy_dia = data.frame(xy_utm)[!na,]  
  
    if(any(p_dia!=0)){  
        dat2krig = data.frame(xy_dia,p_dia)  
        coordinates(dat2krig) = ~ x + y  
        crs(dat2krig) = utm  
        vario[[paste0(tab[j,1])]] = autofitVariogram(p_dia~1,dat2krig,  
                                                model = "Sph")$var_model  
    }  
}
```

```
saveRDS(vario, "C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/SLprecipitacion/
VariogramasEsfericos.RDS")
```

Interpolación

Los cambios con respecto al código anterior es que ahora se lee un variograma para cada día y los archivos shapefiles han sido sacados del modelo SWAT y no de las capas del MVOTMA. Estos nuevos shapefiles han sido ligeramente modificados para coincidir las salidas de algunas subcuenca con las estaciones de caudal.

```
C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/SLprecipitacion/out_server/interp_xval_Esfericos_Rcode.R
#interpolacion santa lucía
```

```
rm(list = ls())
library(raster)
library(zoo)
library(automap)
library(gstat)
library(maptools)

load("C:/Users/rnavas/Documents/SL_precipitacion/krige_xval_datainEsfericos.RDATA")

#1981~2016
for(j in 1:13149){

  p = tab[j,paste0("p",1:28)]
  na = is.na(p)

  p_dia = p[!na]
  xy_dia = data.frame(xy_utm)[!na,]

  if(any(p_dia!=0)){
    print(format(tab[j,1],"%Y%m%d"))
    VarioModel = vario[[paste0(tab[j,1])]]
    dat2krig = data.frame(xy_dia,p_dia)
    coordinates(dat2krig) = ~ x + y
    crs(dat2krig) = utm

    #krigeado
    k_n3 = krige(p_dia~1,dat2krig, newdata=sb_3, model = VarioModel, nmax = 5)
    k_n5 = krige(p_dia~1,dat2krig, newdata=sb_5, model = VarioModel, nmax = 5)

    p_n3 = cbind(p_n3,data.frame(k_n3)[,"var1.pred"])
    colnames(p_n3)[ncol(p_n3)] = format(tab[j,1],"%Y%m%d")
    p_n5 = cbind(p_n5,data.frame(k_n5)[,"var1.pred"])
    colnames(p_n5)[ncol(p_n5)] = format(tab[j,1],"%Y%m%d")

    #validación cruzada
    xval_dia = cbind(fecha=tab[j,1],
                      data.frame(krige.cv(p_dia~1,dat2krig,model=VarioModel, nmax = 5)))
    xval = rbind(xval,xval_dia)
```

```

} else{
  p_n3 = cbind(p_n3,0)
  colnames(p_n3)[ncol(p_n3)] = format(tab[j,1],"%Y%m%d")
  p_n5 = cbind(p_n5,0)
  colnames(p_n5)[ncol(p_n5)] = format(tab[j,1],"%Y%m%d")
}
}

saveRDS(p_n3,"C:/Users/rnavas/Documents/SL_precipitacion/p_n3_esfericos.RDS")
saveRDS(p_n5,"C:/Users/rnavas/Documents/SL_precipitacion/p_n5_esfericos.RDS")
saveRDS(xval,"C:/Users/rnavas/Documents/SL_precipitacion/xval_esfericos.RDS")

```

El código se ejecutó en el servidor. Los datos de entrada han sido tratados usando el siguiente código:

```

rm(list = ls())
library(raster)
library(zoo)
library(automap)
library(gstat)
library(maptools)

#sistemas de coordenadas
dec = CRS("+init=epsg:4326")
utm = CRS("+proj=utm +zone=21 +south +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m +no_defs")

#lectura de datos de precipitacion
load("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/
      SLprecipitacion/tab.RDATA")
xy = read.csv("C:/Users/Rafael Navas/Documents/SWAT/SWAT-SubSantaLucia/2-Input data/
               4-Clima/Inumet/INUMET_2018-03-16/Pcp_subsantalucia.csv")
xy_dec = data.frame(x=xy$x, y=xy$y)
xy_dec = SpatialPoints(xy_dec, proj4string=dec)
xy_utm = spTransform(xy_dec,utm)

#Lectura de variogramas
vario = readRDS("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/
                 SLprecipitacion/VariogramasEsfericos.RDS")

#Lectura de shapefiles
sb_3 = readShapePoly("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/
                      SLprecipitacion/SL_sub_nivel3.shp",
                      proj4string=utm)

sb_5 = readShapePoly("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/
                      SLprecipitacion/SL_sub_nivel5.shp",
                      proj4string = utm)

p_n3 = coordinates(sb_3)
p_n5 = coordinates(sb_5)
colnames(p_n3) = c("x","y")
colnames(p_n5) = c("x","y")
v = vector(length = 0)

```

```

xval = data.frame(fecha=v,var1.pred=v,var1.var=v,observed=v,residual=v,
                  zscore=v,fold=v,x=v,y=v, optional=v)

#save.image("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/
SLprecipitacion/krige_xval_datainEsfericos.RDATA")

```

Formato SWAT

Las salidas de la interpolación se han puesto en formato SWAT usando el siguiente código:

```

rm(list=ls())
library(mapproj)
library(raster)

n = 3

p = readRDS(paste0("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/
                    SLprecipitacion/out_server/p_n",n,"_esfericos.RDS"))

#Valores negativos a cero
p[p<0] = 0

#Escritura de coordenadas
dec = CRS("+init=epsg:4326")
utm = CRS("+proj=utm +zone=21 +south +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m +no_defs")
xy = SpatialPoints(p[,c("x","y")], proj4string=utm)
xy = spTransform(xy,dec)
xy = data.frame(xy)

p=p[,c(-1,-2)]

ID = 1:nrow(xy)
NAME = paste0("p", ID)
LAT = round(xy$y,3)
LONG = round(xy$x,3)
ELEVATION = rep(50,nrow(xy))
txt.out = data.frame(ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION)

write.table(txt.out,
            file = paste0("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/
                           SLprecipitacion/out_server/nivel",
                           n,"/SLnivel",n,".txt"),
            sep=",",
            row.names = FALSE, quote = FALSE)

#Escritura de lluvia por estacion

for(j in 1:nrow(xy)){
  txt.out2 = round(cbind(p[j,]),3)
  colnames(txt.out2) = colnames(p)[1]
  write.table(txt.out2,

```

```

    file = paste0("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/
                  SLprecipitacion/out_server/nivel",n,"/p_",j,".txt"),
    sep=",",
    row.names = FALSE, quote = FALSE)
}

```

Validacion

Los resultados se pueden verificar mediante el siguiente código. Acá hay dos maneras de representar lo que debería ser el mismo gráfico. No obstante, los gráficos no son iguales. En este punto me inclino por presentar los resultados sin utilizar las funciones de tidyverse.

```

rm(list = ls())
require(zoo)
require(tidyverse)
require(lubridate)

#Lectura de variogramas
xv = readRDS("C:/Users/Rafael Navas/Documents/precipitacion/SantaLucia/SLprecipitacion/
              out_server/xval_esfericos.RDS")
xv$mes = as.numeric(substr(xv$fecha,6,7))
xv$ano = as.numeric(substr(xv$fecha,1,4))
xv$dia = as.numeric(substr(xv$fecha,9,10))

#functions
R2.fun <- function(x, y) {summary(lm(y~x))$r.squared}

bias.fun <- function(x,y){
  s_in = y>0
  x = x[s_in]
  y = y[s_in]
  out = sum(x)/sum(y)
  return(out)}

#Bias and R-squared of daily precipitation (grouped by month and gauge)

as.tibble(xv)%>%
  group_by(year=ano,month=mes, est=x)%>%
  summarise(R2 = R2.fun(var1.pred,observed)) %>%
  ggplot(aes(x=as.factor(month), y=R2)) + geom_boxplot()

as.tibble(xv)%>%
  group_by(year=ano,month=mes, est=x)%>%
  summarise(BIAS = bias.fun(var1.pred,observed)) %>%
  ggplot(aes(x=as.factor(month), y=BIAS)) +
  geom_boxplot() +
  ylim(0,2) + theme(axis.text = element_text(size=12)) +
  labs(x = "Month", y = "Precipitation (mm)")

```

```

#same but taking the long ride

library(abind)

meses = 1:12
xy_est = unique(xv[,c("x","y")])

for(est in 1:nrow(xy_est)){                      #seleccion por estacion
  x = xy_est[est,"x"]
  y = xy_est[est,"y"]
  cond = (xv[,"x"]==x) & (xv[,"y"]==y)
  aux = xv[cond,]
  xv.mes = as.numeric(format(aux[,"fecha"], "%m"))

  r2.mes = vector(length=0)
  bias.mes = vector(length=0)
  n.mes = vector(length=0)
  for(mm in meses){                            #seleccion por año
    cond = xv.mes == mm
    aux2 = aux[cond,]
    r2.mes = c(r2.mes,R2.fun(aux2[,"var1.pred"],aux2[,"observed"]))
    bias.mes = c(bias.mes,sum(aux2[,"var1.pred"])/sum(aux2[,"observed"]))
    n.mes = c(n.mes,nrow(aux2))
  }
  st = cbind(coef.r2=r2.mes,bias=bias.mes,n=n.mes)
  if(est==1){
    cv.rg.mes = st
  }else{
    cv.rg.mes = abind(cv.rg.mes,st,along=3)
  }
}

#Bias and R-squared of daily precipitation (grouped by month and gauge)
par(mfrow=c(1,2))
boxplot(t(cv.rg.mes[,1,]),ylab="R2",ylim=c(0,1))
boxplot(t(cv.rg.mes[,2,]),ylab="Bias",ylim=c(0.6,1.4))

```