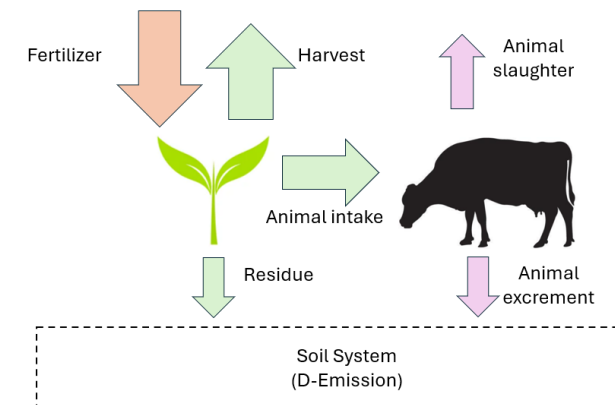


Modelo de transporte de nutrientes desde la principal fuente de abastecimiento de agua en Uruguay

L. BESSONE, P. GAMAZO

DEPARTAMENTO DEL AGUA, CENUR LITROAL NORTE
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA, URUGUAY

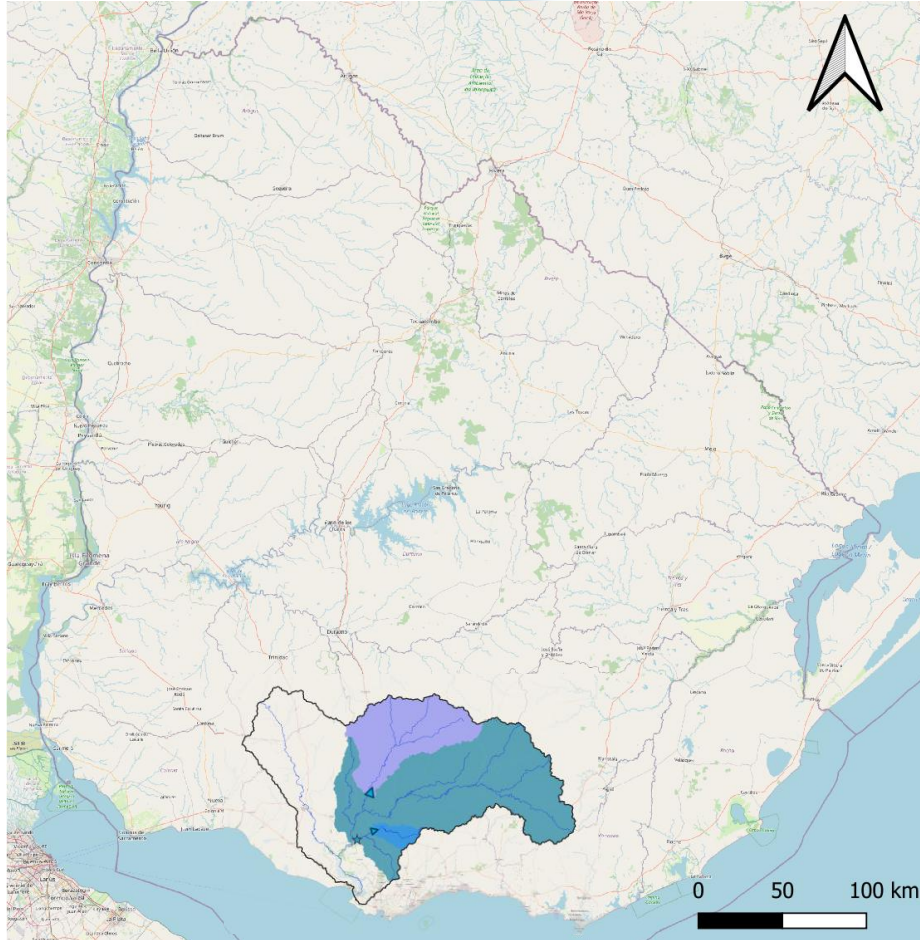


CUENCA SANTA LUCÍA

Area: 13.485 km²

Suministra agua a 1,7 millones de personas (50% de la población uruguaya).

Apoya la actividad agroindustrial: principal región productora de alimentos de Uruguay.



CUENCA SANTA LUCÍA



- En marzo de 2013, una floración de cianobacterias causó sabor y olor en el agua potable durante varios días.

- En 2023, durante varios meses, 1,7 millones de personas recibieron agua no potable (con concentraciones de cloruro y sodio superiores a lo normal).
- Debido a una sequía extraordinaria y a un volumen de almacenamiento insuficiente, el agua del río se mezcló con agua salada del Río de la Plata..



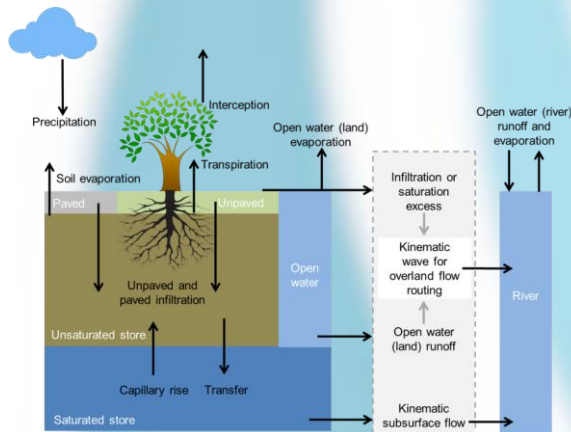
CUENCA SANTA LUCÍA



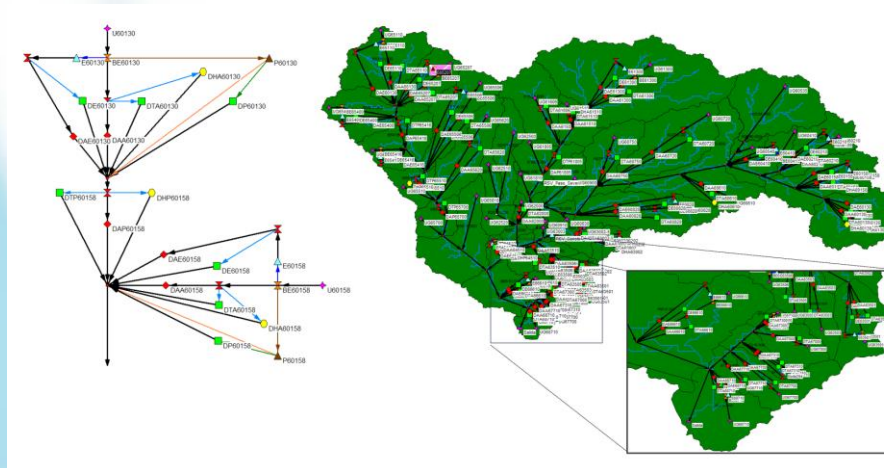
“Adaptación en Acción - Cuenca Santa Lucía”
financiado por el programa Euroclima+ (2021)
El proyecto tuvo 3 productos principales:



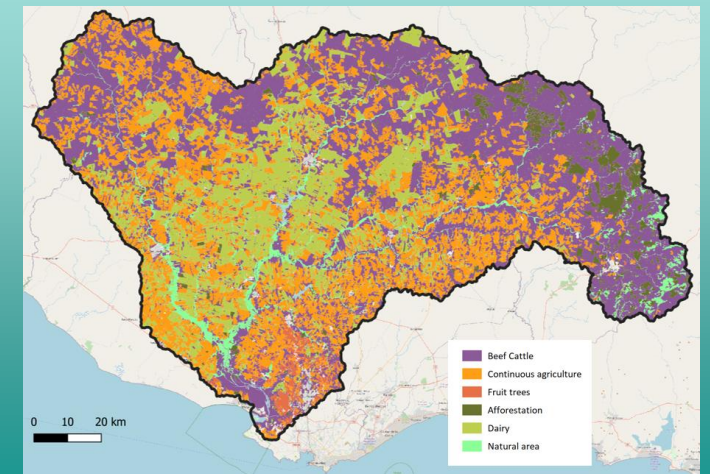
i) Modelo hidrológico para la predicción de inundaciones



ii) Modelo de gestión como herramienta para la planificación y análisis de los recursos hídricos

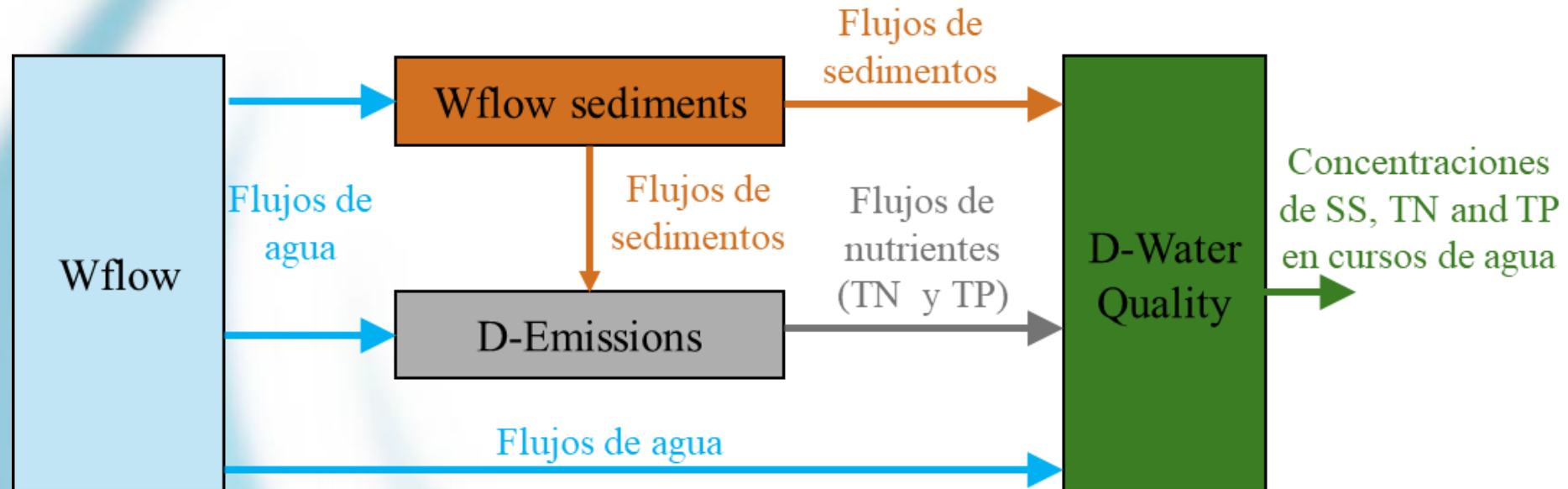


iii) Modelo de emisiones y transporte hidrológico para simular el transporte de nutrientes



DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO

Utilizamos el código Delwaq de DELTARES

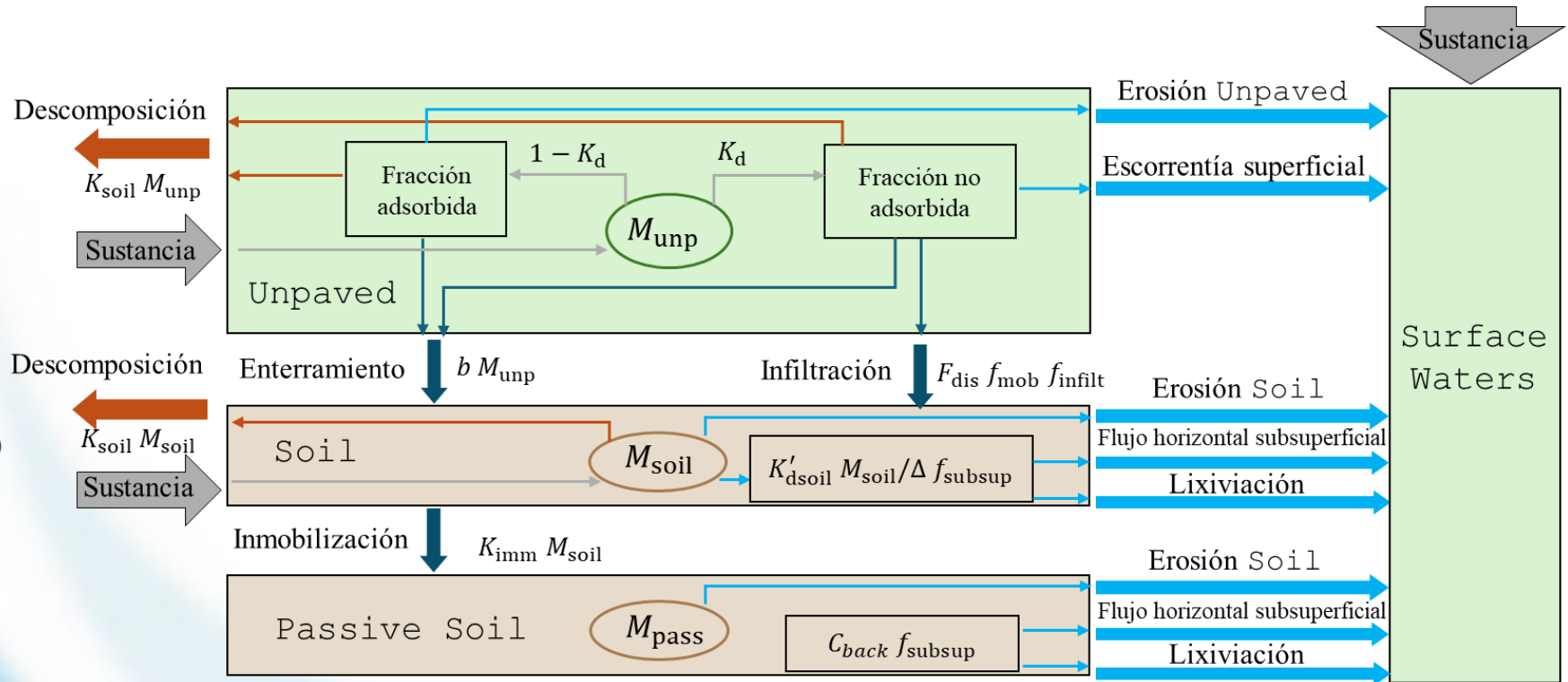
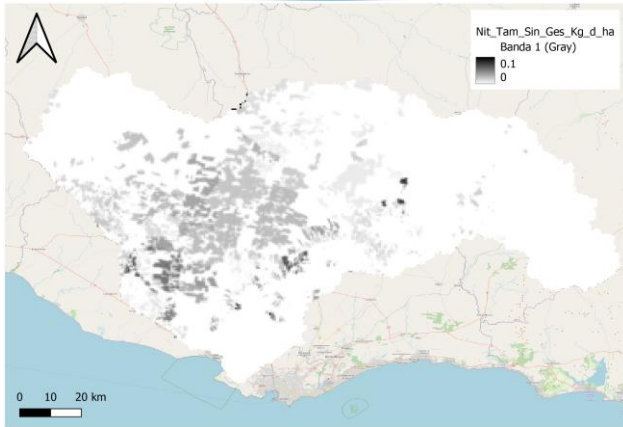


- Modelo distribuido
- Tamaño de la cuadrícula: 35 ha (20 segundos de arco, ~550 m x 650 m)
- Modelo de generación y transporte de nitrógeno y fósforo
- Intervalo de tiempo = 1 día
- Periodo simulado: 01/01/2009 a 31/12/2019
- En este caso no se modeló la formación de algas

MÓDULO D-EMISSIONS

Las emisiones distribuidas se pueden generar combinando información estática distribuida espacialmente y escalares que varían en el tiempo.

i) información estática distribuida espacialmente

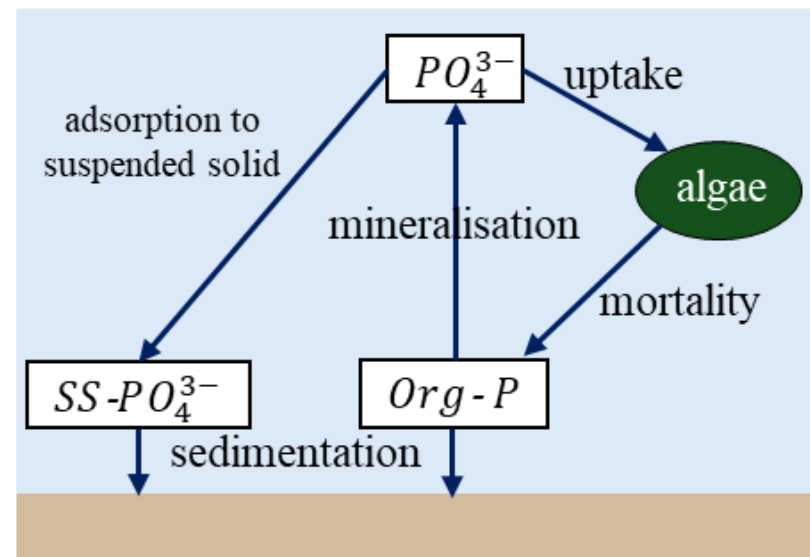
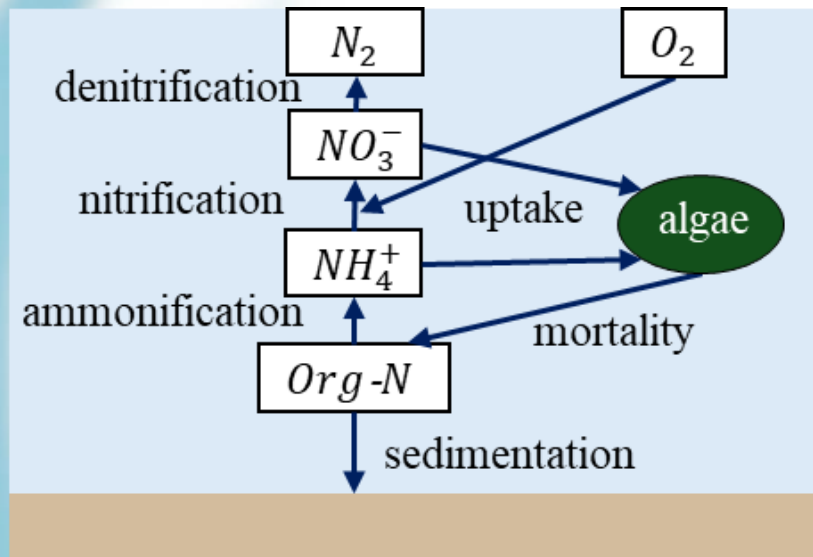


ii) Escalares variables en el tiempo



MÓDULO DE CALIDAD DEL AGUA

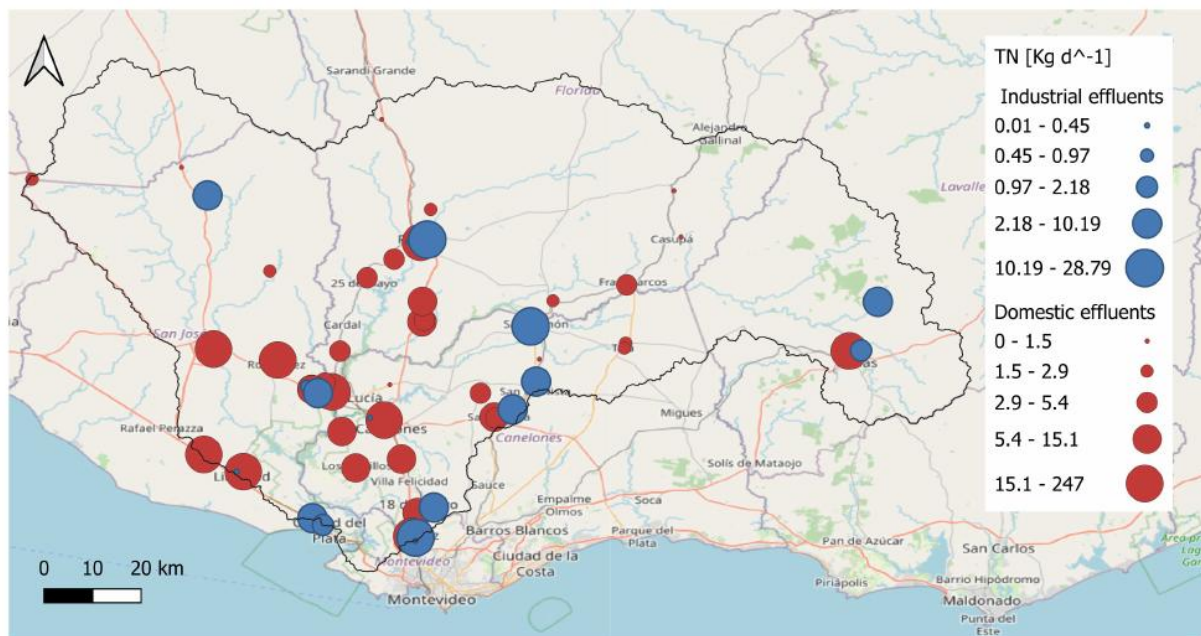
$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{flujo advectivo} + \text{flujo difusivo} + \text{fuente/sumidero}$$



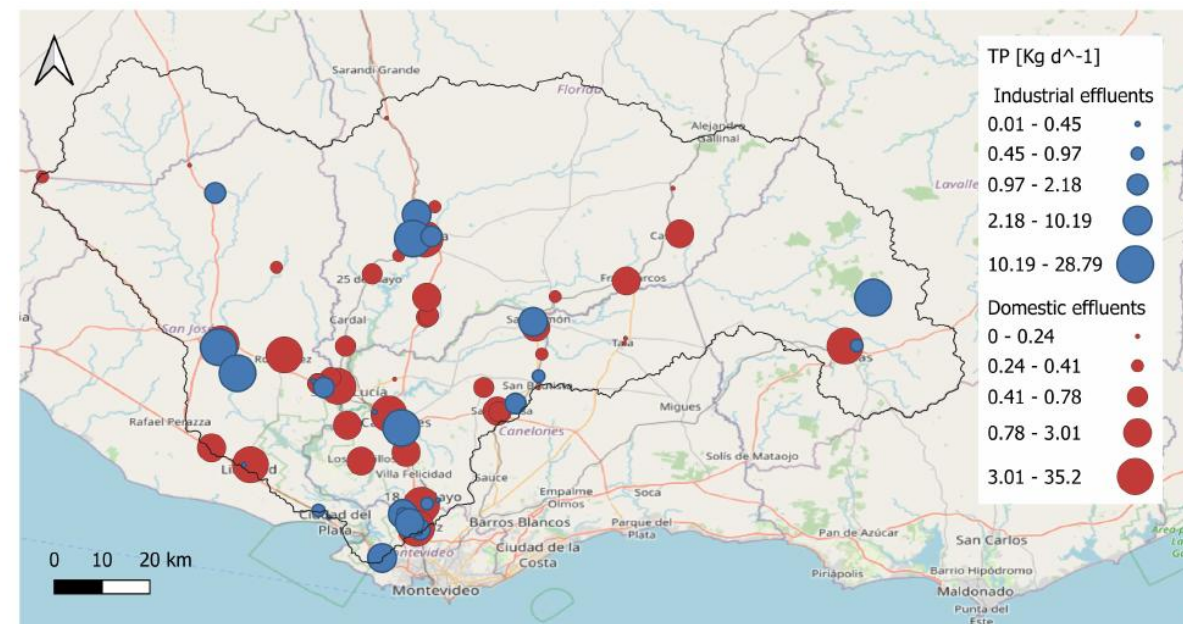
DATOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR EL MODELO

Efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y efluentes industriales (OSE y DINACEA)

Nitrógeno total

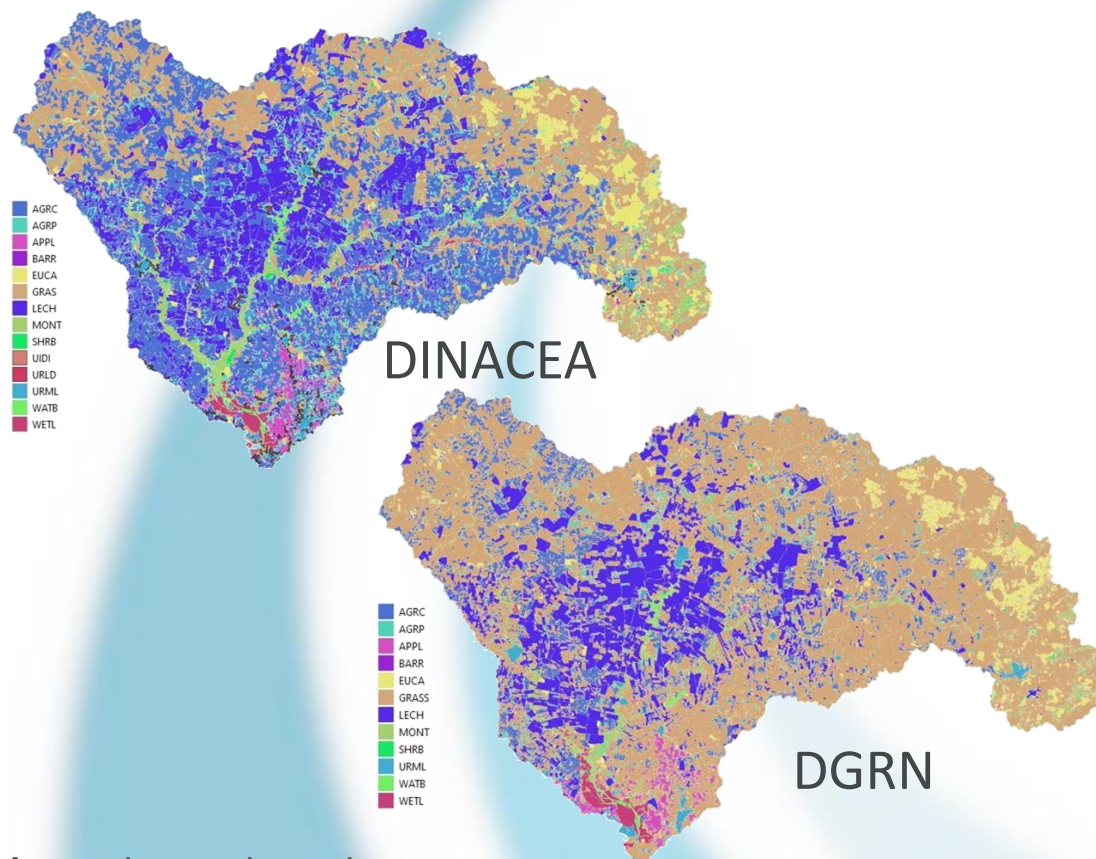


Fósforo total

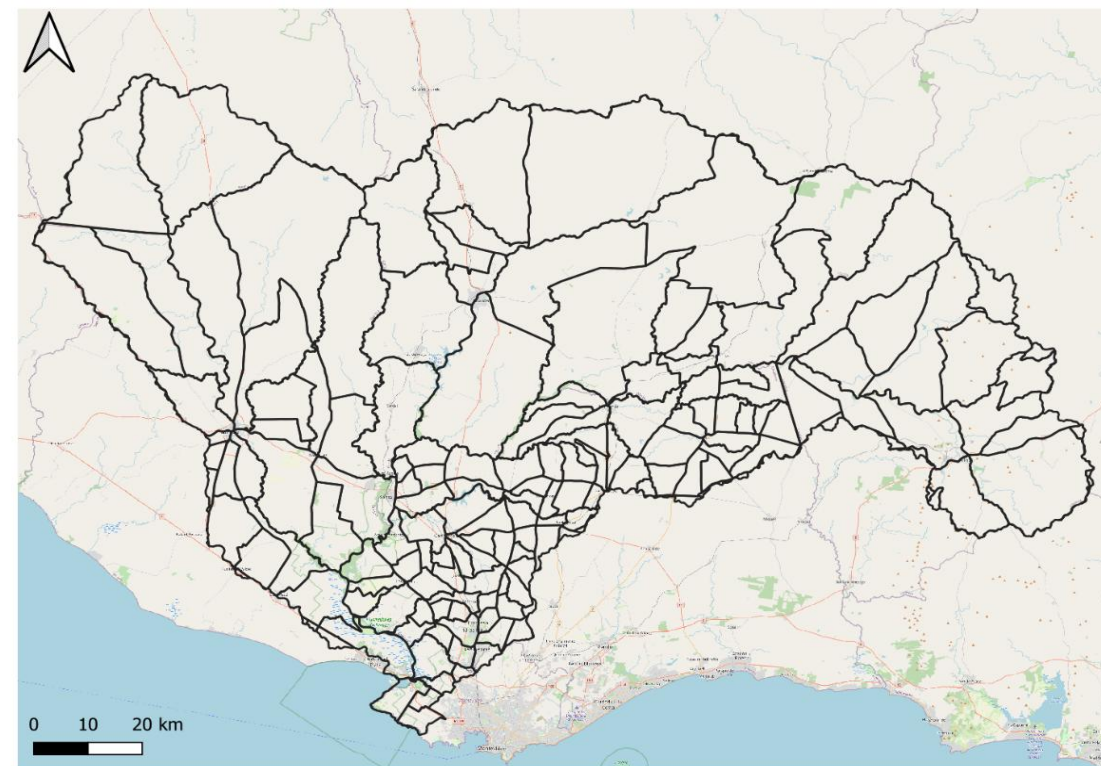


DATOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR EL MODELO

Uso de suelo



Mapas de densidad: ganado lechero y ganado vacuno de carne



DGRN - MGAP

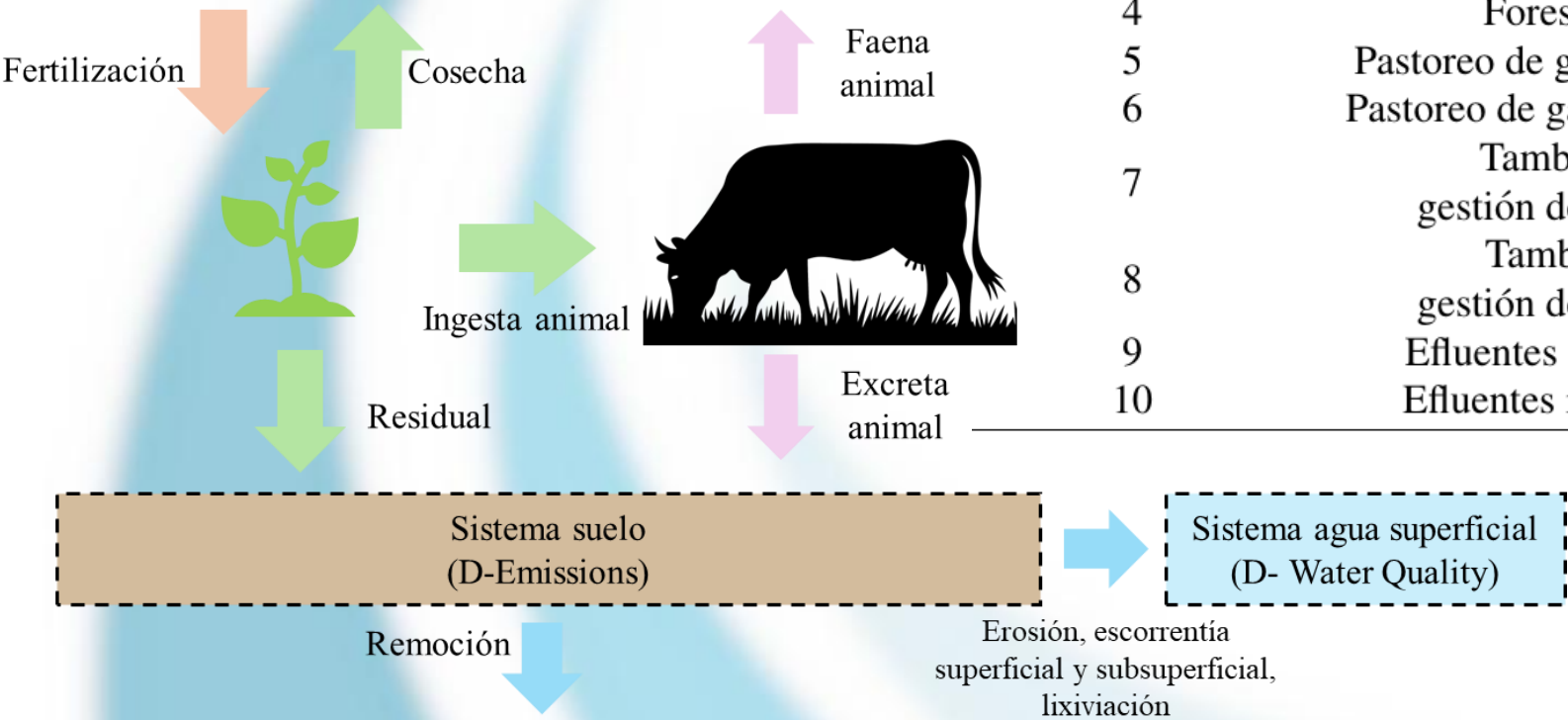
Mapas de uso de suelo:

- Mapa 2015, editado por DINACEA a partir de DINOT – MVOTMA
- Mapa de uso del suelo generado por la DGRN para este proyecto, basado en: *Actualización de Cobertura y Uso del Suelo del Uruguay al año 2020/2021*

DATOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR EL MODELO

■ Balance para el cálculo de emisiones de diferentes usos

N.º de fuente de emisión	Descripción	Código de uso del suelo	Tipo de emisión
1	Agricultura con pastura	AGRP	Fertilización
2	Agricultura continua	AGRC	Fertilización
3	Lechería	LECH	Fertilización
4	Forestación	EUCA	Fertilización
5	Pastoreo de ganado lechero	LECH	Animal en el campo
6	Pastoreo de ganado de carne	AGRP, GRAS	Animal en el campo
7	Tambos con gestión de efluentes	LECH	Animal en el tambo
8	Tambos sin gestión de efluentes	LECH	Animal en el tambo
9	Efluentes domésticos	Fuente puntual	Doméstico
10	Efluentes industriales	Fuente puntual	Industrial

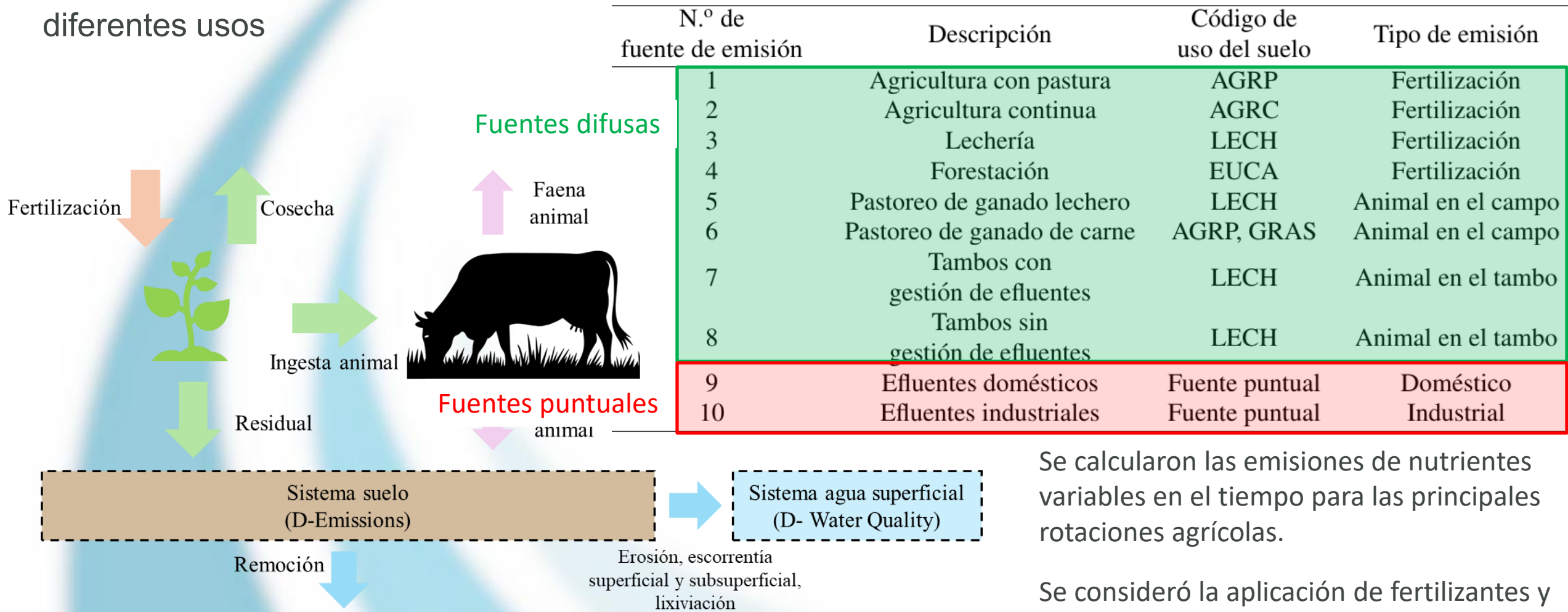


Se calcularon las emisiones de nutrientes variables en el tiempo para las principales rotaciones agrícolas.

Se consideró la aplicación de fertilizantes y la eliminación de nutrientes de los cultivos.

DATOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR EL MODELO

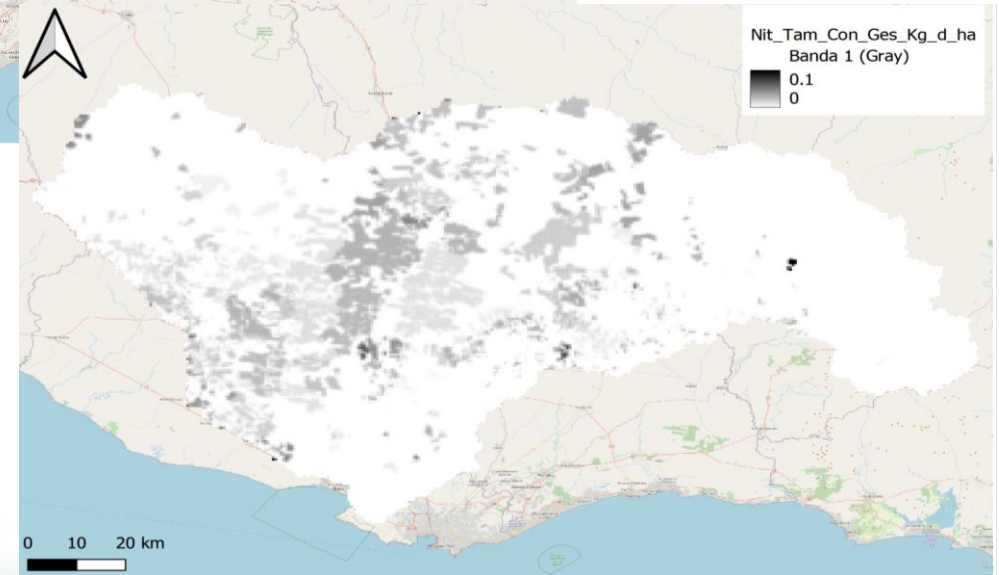
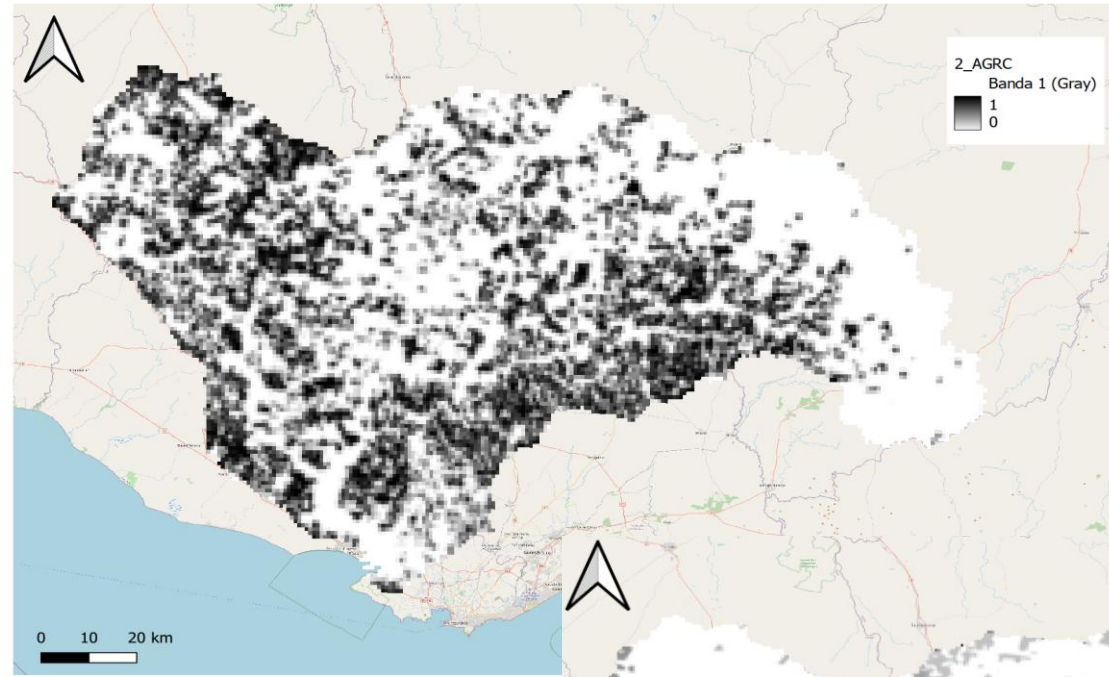
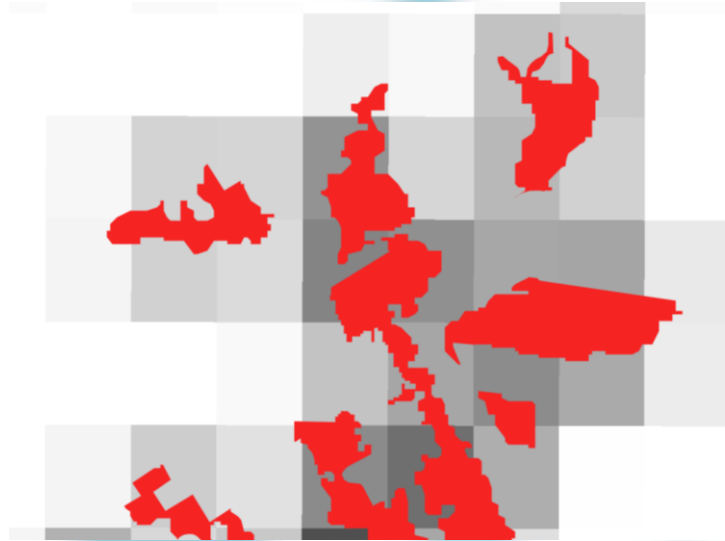
■ Balance para el cálculo de emisiones de diferentes usos



Se calcularon las emisiones de nutrientes variables en el tiempo para las principales rotaciones agrícolas.

Se consideró la aplicación de fertilizantes y la eliminación de nutrientes de los cultivos.

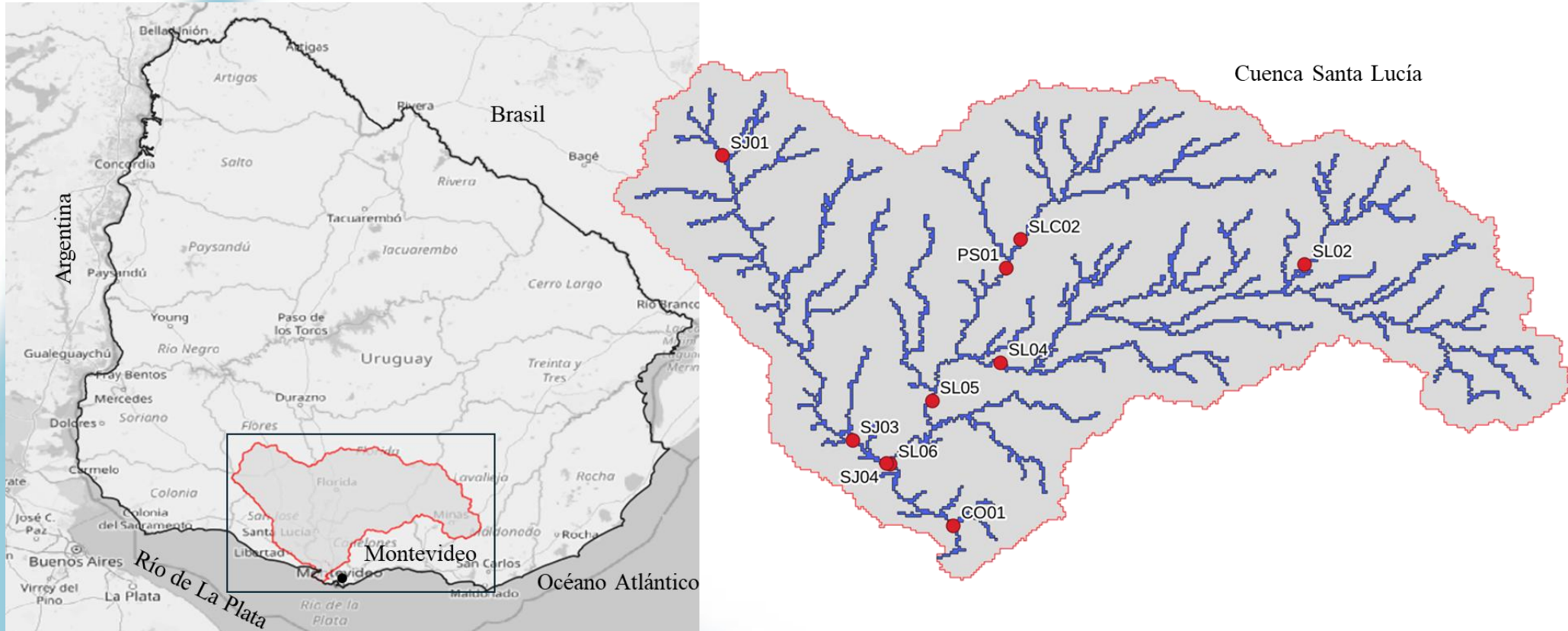
DATOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR EL MODELO



Se establecieron valores de emisión en el programa para cada celda del dominio.
Los valores se ajustaron en función del área asociada a cada fuente por celda.

DATOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR EL MODELO

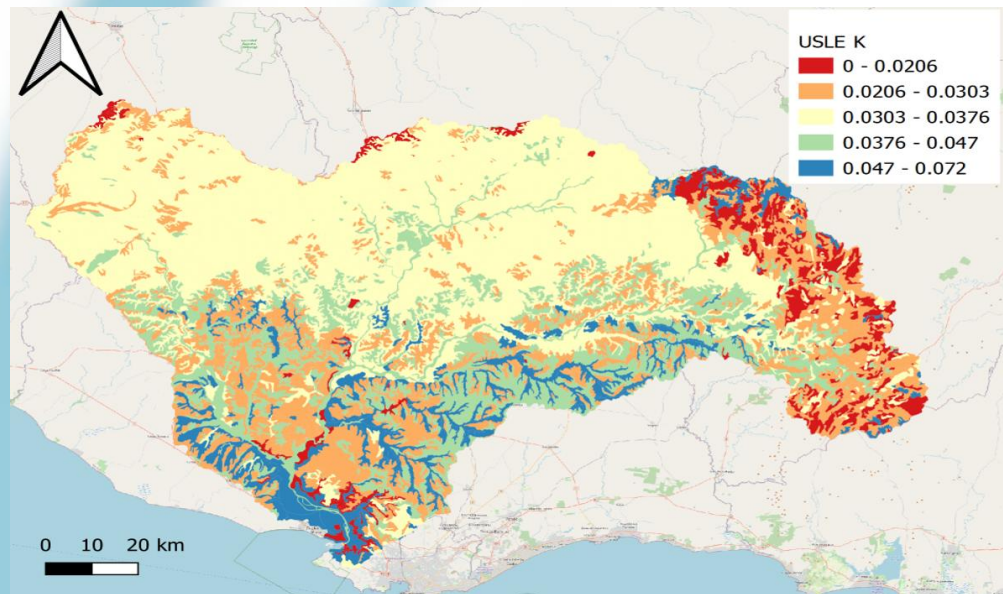
- Se utilizaron datos de 10 estaciones de monitoreo distribuidas en la cuenca. Seleccionadas por su cobertura y consistencia.



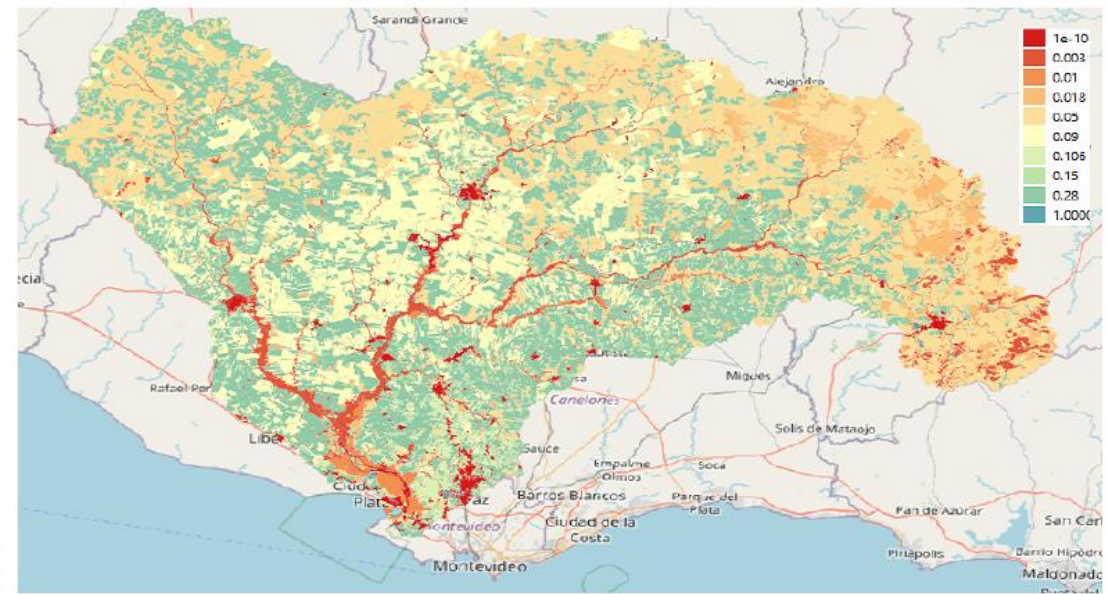
- Los datos de fósforo total (TP) y nitrógeno total (TN) se usaron para calibrar y validar el modelo.

CALIBRACIÓN

- Escorrentía superficial: realizada por el equipo que desarrolló el modelo en Wflow (equipo IMFIA)
- Transporte de sedimentos: variación del parámetro C (modelo USLE) buscando reproducir las estimaciones de la DGRN sobre pérdidas de suelo para diferentes usos



Factor K (Erodabilidad de suelos (GeoJSON, WGS84). Conjunto de datos obtenido del Catálogo Nacional de Datos Abiertos.



USLE C (calibrado)

CALIBRACIÓN

- Escorrentía superficial: realizada por el equipo que desarrolló el modelo en Wflow (equipo IMFIA)
- Transporte de sedimentos: variación del parámetro C (modelo USLE) buscando reproducir las estimaciones de la DGRN sobre pérdidas de suelo para diferentes usos



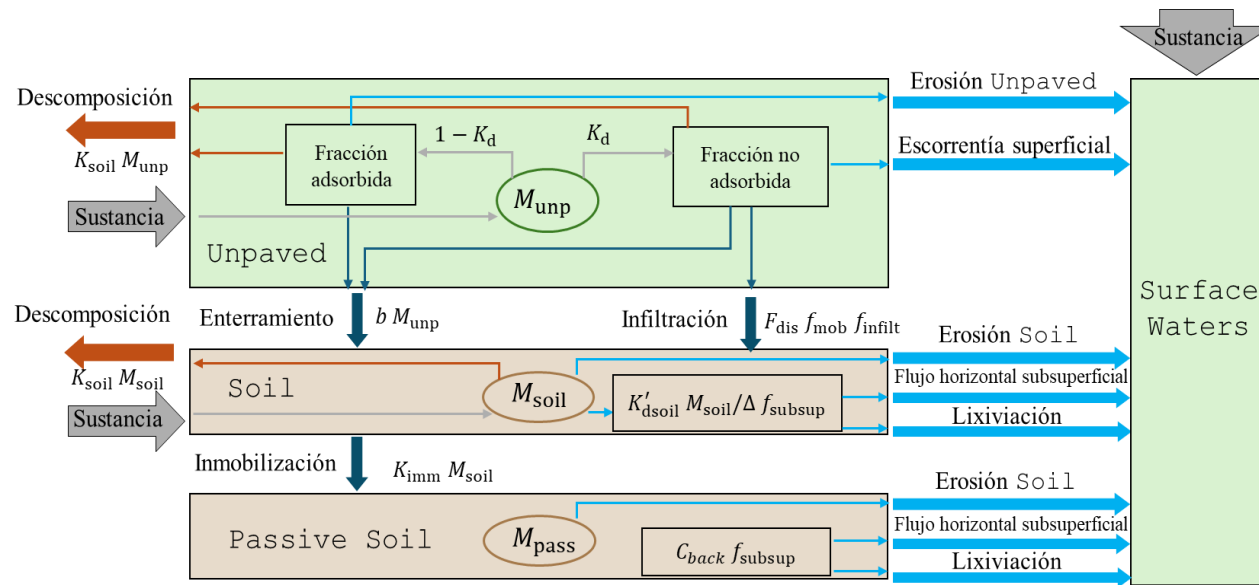
Pérdida de suelo promedio t/ha/año

Uso del suelo	Código	C_{USLE}		Erosión ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)	
		Ref. local	Calibrado	Wflow Sediment	DGRN
Pastizal natural	GRAS	0.010	0.050	1.816	1.86
Lechería	LECH	0.020	0.090	1.714	1.69
Agricultura continua	AGRC	0.36	0.28	2.744	2.74
Forestación	EUCA	0.006	0.018	0.922	0.89
Bosque nativo	MONT	0.006	0.003	2.102	0.99
Agricultura con pastura	AGRP	0.134	0.15	2.742	2.74
Horticultura y frutales	APPL	0.106	0.106	1.583	—
Área urbana	URML	0.000	0.000	0.466	—
Humedales	WETL	0.010	0.010	0.525	—
Zonas inundables naturales	WATB	0.000	0.000	1.951	—
Matorrales	SHRB	0.010	0.010	1.088	—
Suelo desnudo o áreas erosionadas	BARR	1.000	1.000	9.223	115.0

CALIBRACIÓN

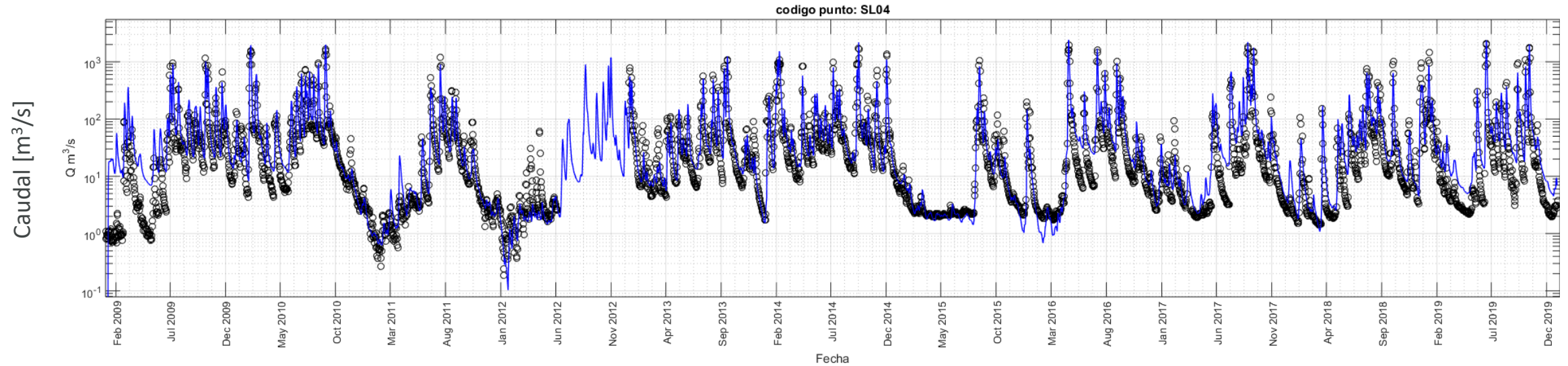
- Parámetros finales del modelo D-Emissions definidos para TN y TP

Código EM	Parámetro	Nutriente		Descripción
		TN	TP	
DecUnp	K_{soil}	0.006	0.05	Tasa de degradación (<i>Unpaved</i>)
DecSoi	K_{soil}	0.006	0.01	Tasa de degradación (<i>Soil</i>)
KdUnpa	K_d	0.95	0.30	Porcentaje de sustancia disuelta y adsorbida ($1 - K_d$) (<i>Unpaved</i>)
kBurial	b	0.95	0.60	Tasa de enterramiento (<i>Unpaved</i>)
KdSoi	K'_{dsoil}	0.45	0.50	Porcentaje de sustancia disponible para flujos subterráneos (<i>Soil</i>)
ImmoSoi	K_{imm}	0.001	0.002	Tasa de inmovilización desde la fracción activa del suelo hacia la pasiva (<i>Soil</i> → <i>Passive Soil</i>)
Cback	C_{back}	0.00	0.60	Concentración de fondo en la humedad del suelo asociada a <i>Passive Soil</i>

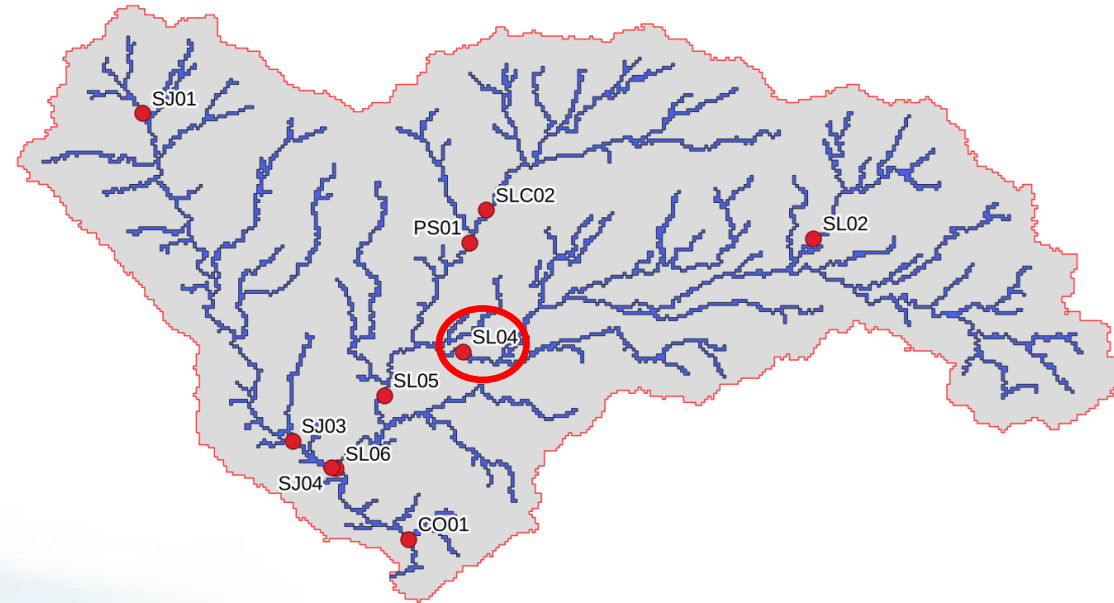


CALIBRACIÓN

- Modelo Hidrológico Wflow de paso diario (IMFIA FING)



- Comparación de caudales simulados versus observados en el punto SL04

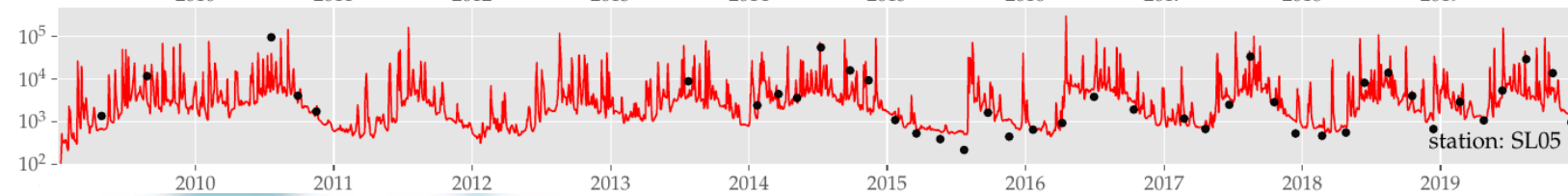
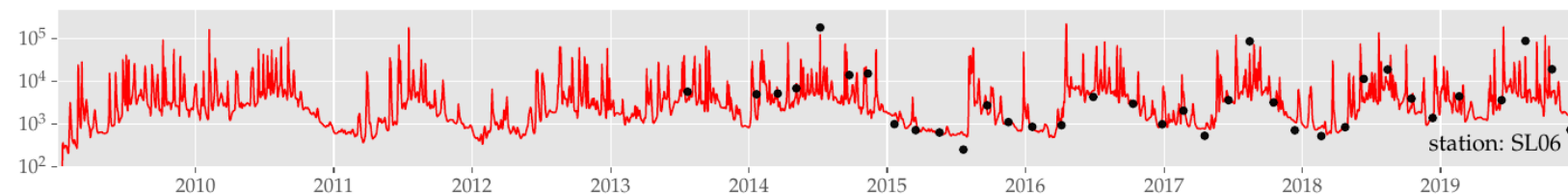


CALIBRACIÓN

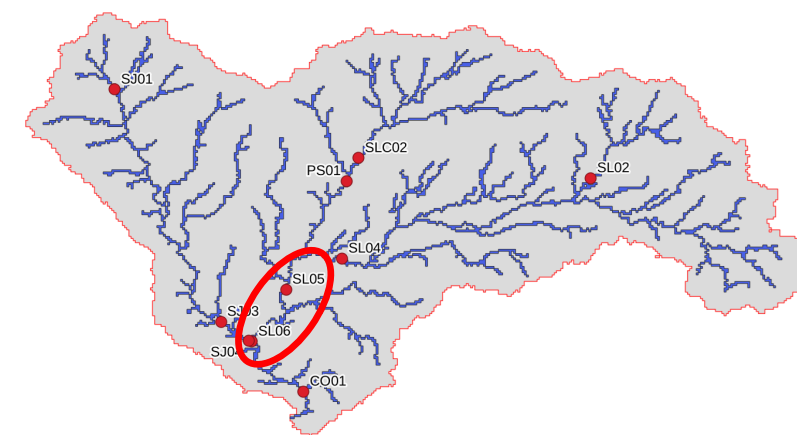
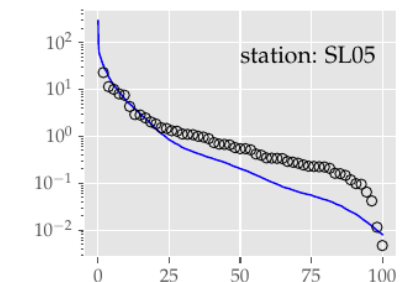
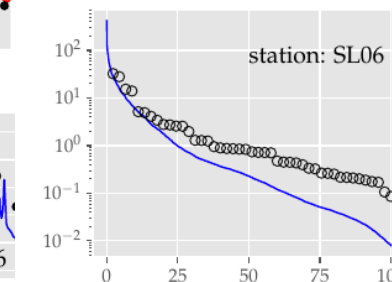
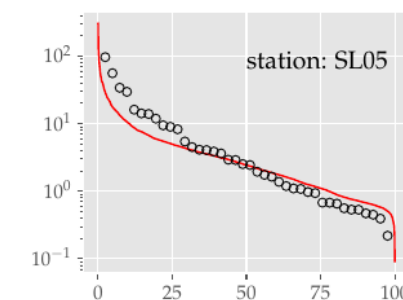
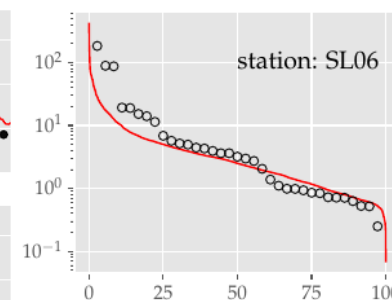
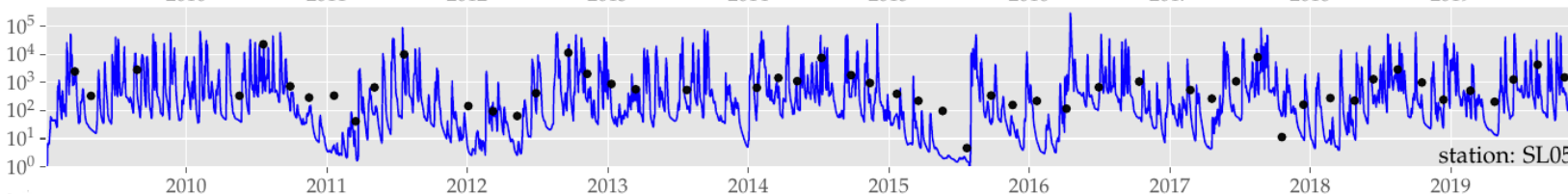
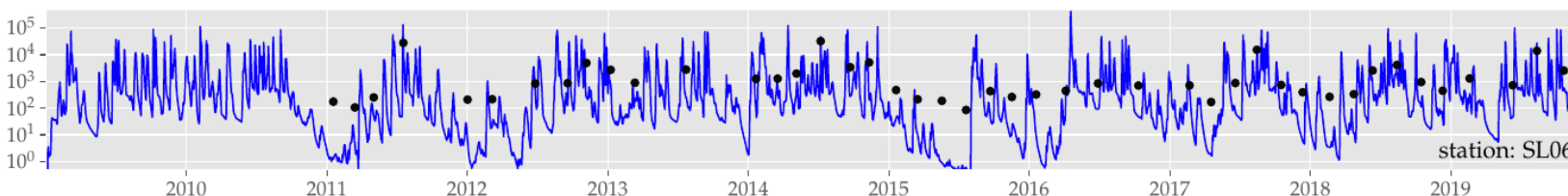
- Comparación de cargas de nutrientes en los puntos SL05 y SL06

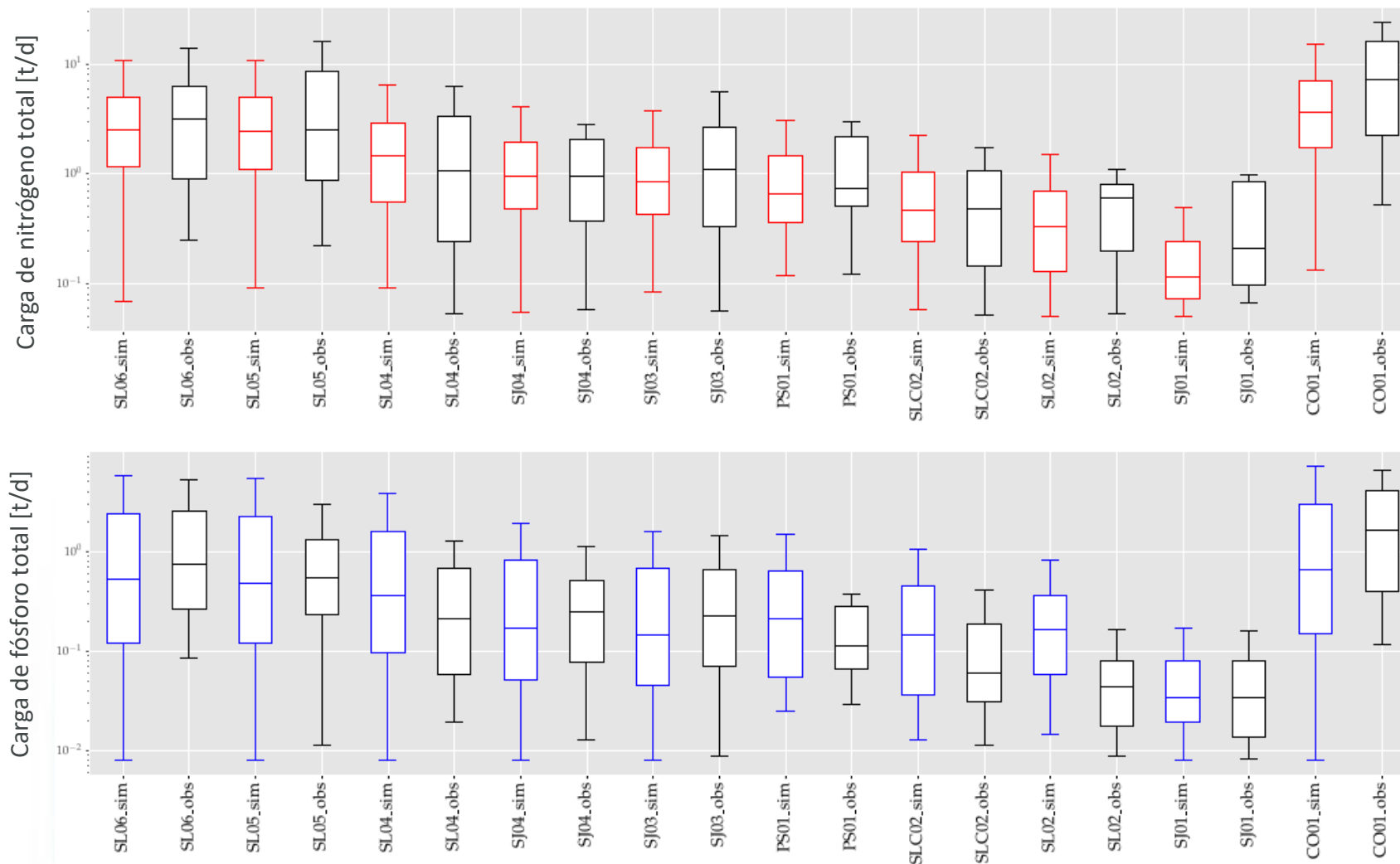
- Curvas de permanencia

Carga de nitrógeno total [t/d]

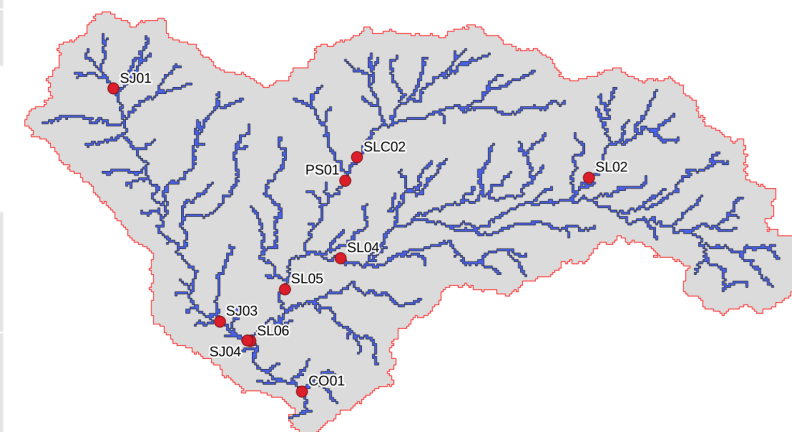


Carga de fósforo total [t/d]





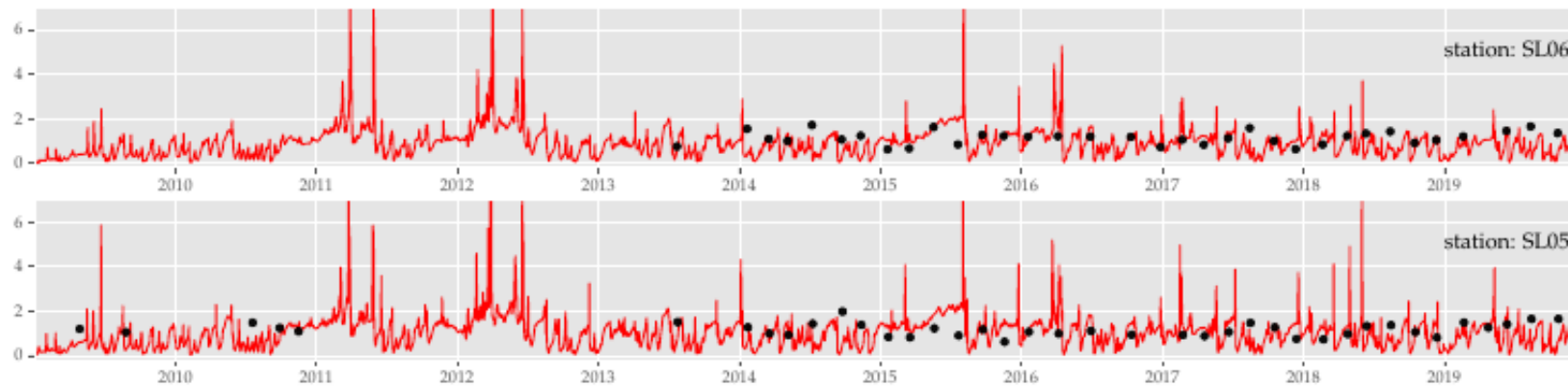
- Valores ordenados por área de aporte de la subcuenca



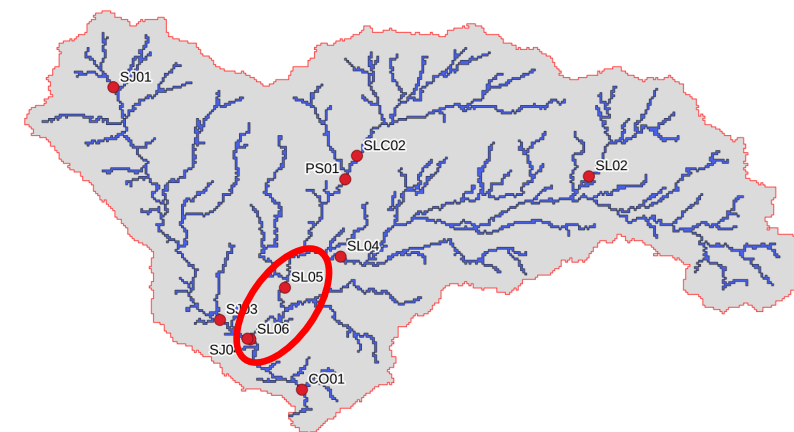
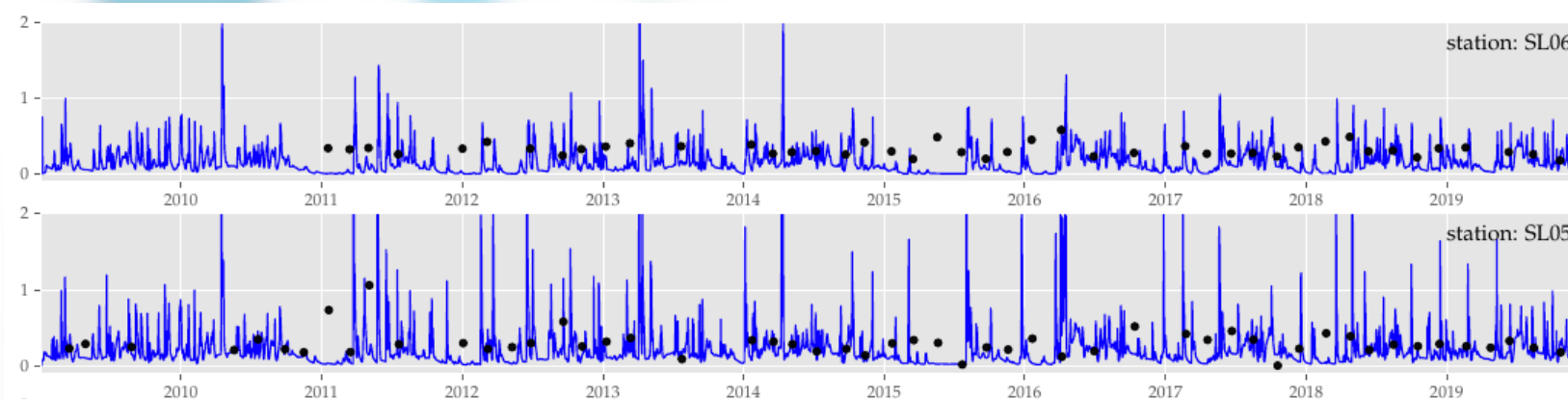
RESULTADOS

■ Concentraciones de nutrientes

Concentración de nitrógeno total [mg/l]



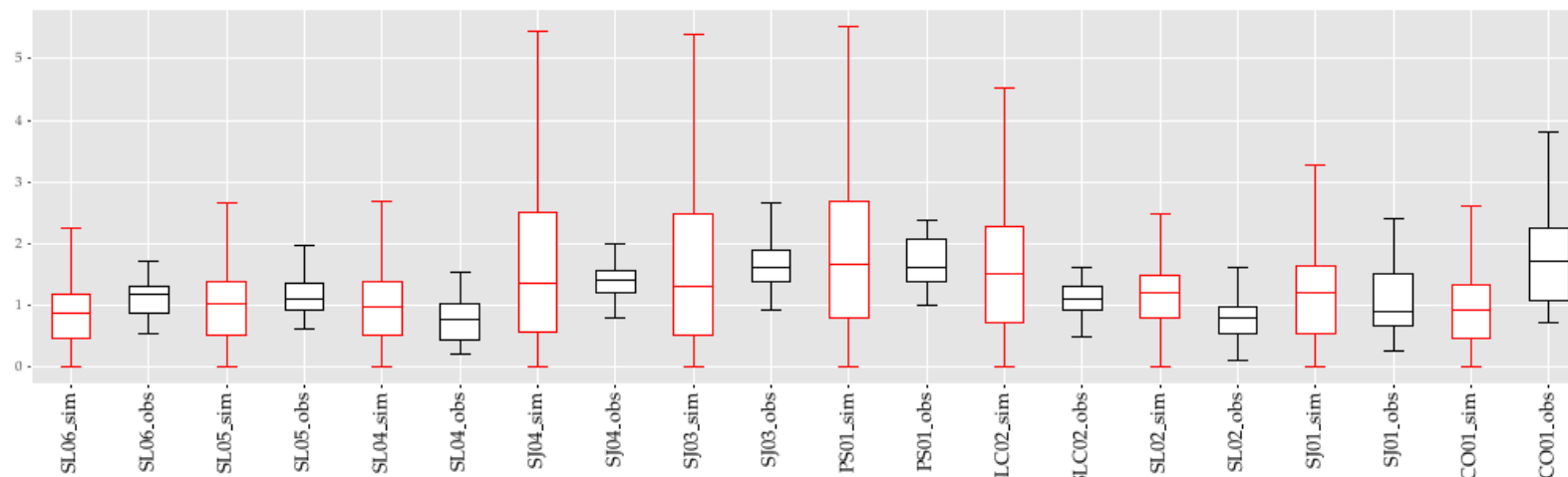
Concentración de fósforo total [mg/l]



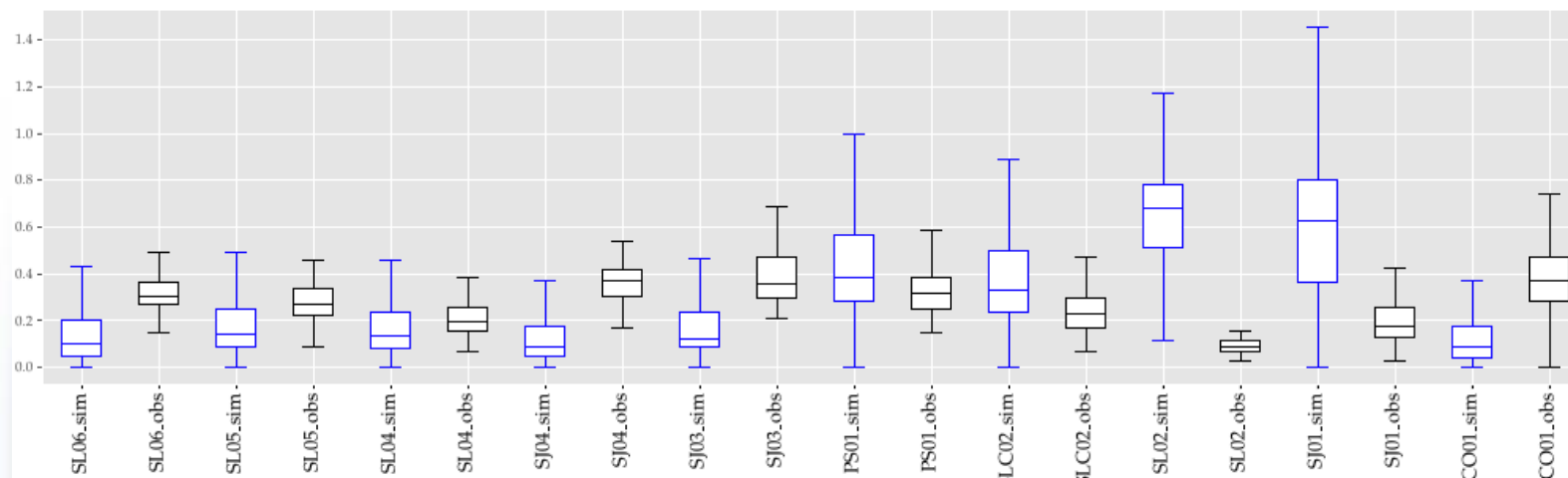
RESULTADOS

■ Boxplot de concentraciones de nutrientes

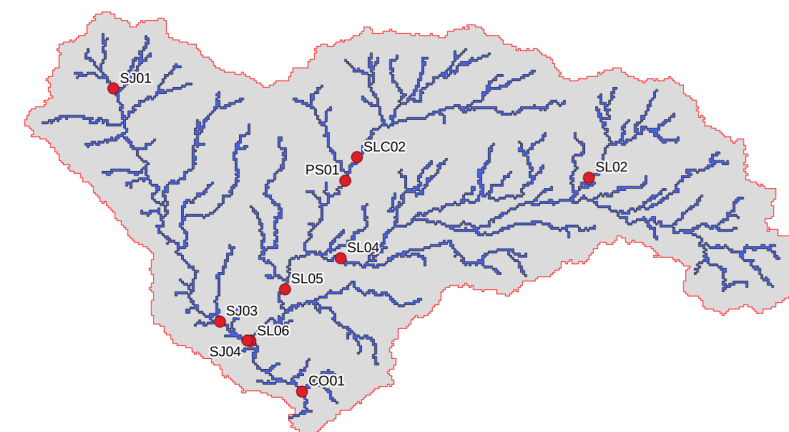
Concentración de nitrógeno total [mg/l]



Concentración de fósforo total [mg/l]



■ Valores ordenados por área de aporte de la subcuenca



RESULTADOS: BALANCE DE MASA EN MODELO D-EMISSIONS

(TÉRMINOS PRINCIPALES)

Porcentaje relativo a las emisiones netas.

EM Code	Descripción	Balance de Masa Nitrogeno		Balance de Masa Fósforo	
		t/año		t/año	
_dRelB01Unp	Agricultura con pastura	2.61E+03	3.2%	1.06E+03	2.6%
_dRelB02Unp	Agricultura continua	1.93E+04	23.7%	1.48E+04	36.1%
_dRelB03Unp	Lechería	0.00E+00	0.0%	1.25E+04	30.4%
_dRelB04Unp	Forestación	2.10E+02	0.3%	2.38E+01	0.1%
_dRelB05Unp	Pastoreo de ganado lechero	1.27E+04	15.6%	2.09E+03	5.1%
_dRelB06Unp	Pastoreo de ganado de carne	4.20E+04	51.5%	9.81E+03	23.9%
_dRelB07Unp	Tambos con gestión de efluentes	2.13E+03	2.6%	3.44E+02	0.8%
_dRelB08Unp	Tambos sin gestión de efluentes	1.36E+03	1.7%	2.19E+02	0.5%
_dRelB09Sfw	Efluentes domésticos	3,26E+02	0,4%	6,23E+01	0,2%
_dRelB10Sfw	Efluentes industriales	2,29E+02	0,3%	4,05E+01	0,1%

Principales fuentes de emission de Nitrógeno

- Pastoreo de ganado de carne: 52%
- Agricultura continua: 24%
- Pastoreo de ganado lechero: 16%

Principales fuentes de emission de Fósforo

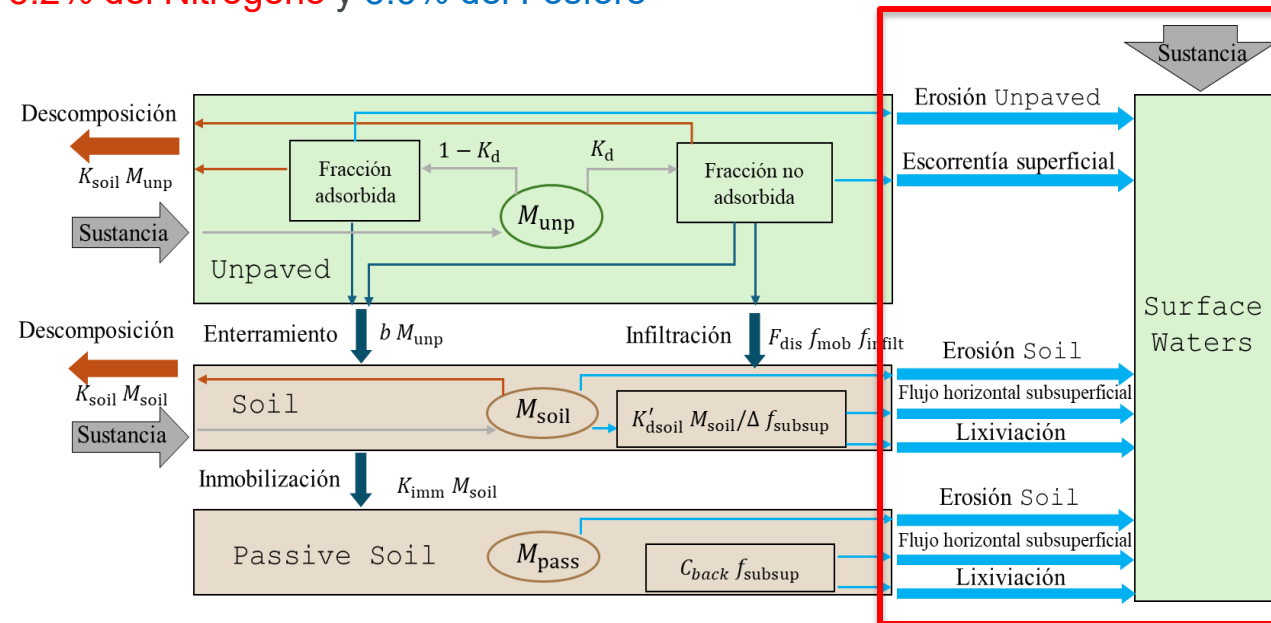
- Agricultura continua: 36%
- Lechería: 30%
- Pastoreo de ganado de carne: 24%

De las emisiones totales, alcanzan los cauces principales: el 3.2% del Nitrógeno y el 5.6% del Fósforo

RESULTADOS: BALANCE DE MASA EN MODELO D-EMISSIONS

(TÉRMINOS PRINCIPALES) Alcanzan los cauces principales: 3.2% del Nitrógeno y 5.6% del Fósforo

Código EM	Descripción	Contribución relativa de masa al WQ	
		TN	TP
_dRelB08Sfw	Tambos sin gestión de efluentes	21,8%	4,1%
_dRelB09Sfw	Efluente doméstico	12,2%	2,7%
_dRelB10Sfw	Efluente industrial	8,6%	1,8%
_dunp2sfwer	Erosión en áreas sin pavimentar	0,5%	47,5%
_dunp2sfwro	Escorrentía en áreas sin pavimentar	6,7%	10,5%
_dsoi2sfwex	Exfiltración desde el suelo	49,8%	12,5%
_dsop2sfwex	Exfiltración desde suelo pasivo	0,0%	20,8%
_dsoi2sfwer	Erosión desde el suelo	0,1%	0,0%
_dsop2sfwer	Erosión desde suelo pasivo	0,2%	0,1%
_dswf2exp	Flujo total hacia WQ	100%	100%

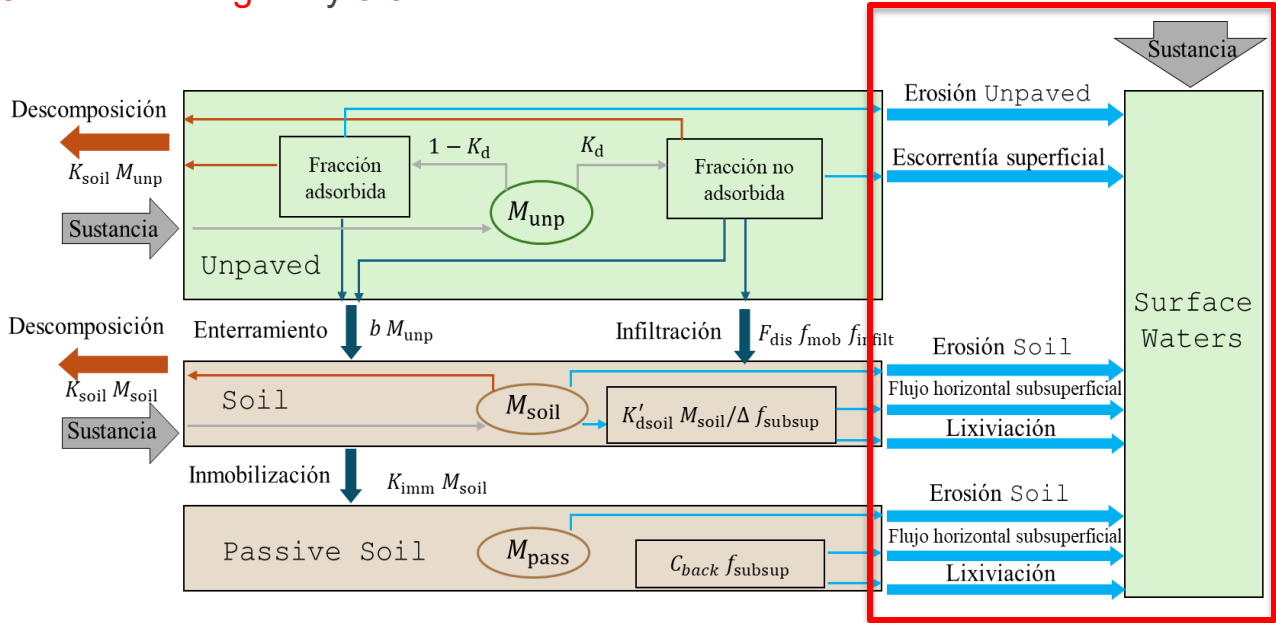


El transporte de Nitrógeno a las aguas superficiales se debe principalmente a procesos subterráneos (50%) y descargas directas (42%) de algunas fuentes (tambos sin gestión de efluentes y vertidos)

RESULTADOS: BALANCE DE MASA EN MODELO D-EMISSIONS

(TÉRMINOS PRINCIPALES) Alcanzan los cauces principales: 3.2% del Nitrógeno y 5.6% del Fósforo

Código EM	Descripción	Contribución relativa de masa al WQ	
		TN	TP
_dRelB08Sfw	Tambos sin gestión de efluentes	21,8%	4,1%
_dRelB09Sfw	Efluente doméstico	12,2%	2,7%
_dRelB10Sfw	Efluente industrial	8,6%	1,8%
_dunp2sfwer	Erosión en áreas sin pavimentar	0,5%	47,5%
_dunp2sfwro	Escorrentía en áreas sin pavimentar	6,7%	10,5%
_dsoi2sfwex	Exfiltración desde el suelo	49,8%	12,5%
_dsop2sfwex	Exfiltración desde suelo pasivo	0,0%	20,8%
_dsoi2sfwer	Erosión desde el suelo	0,1%	0,0%
_dsop2sfwer	Erosión desde suelo pasivo	0,2%	0,1%
_dswf2exp	Flujo total hacia WQ	100%	100%



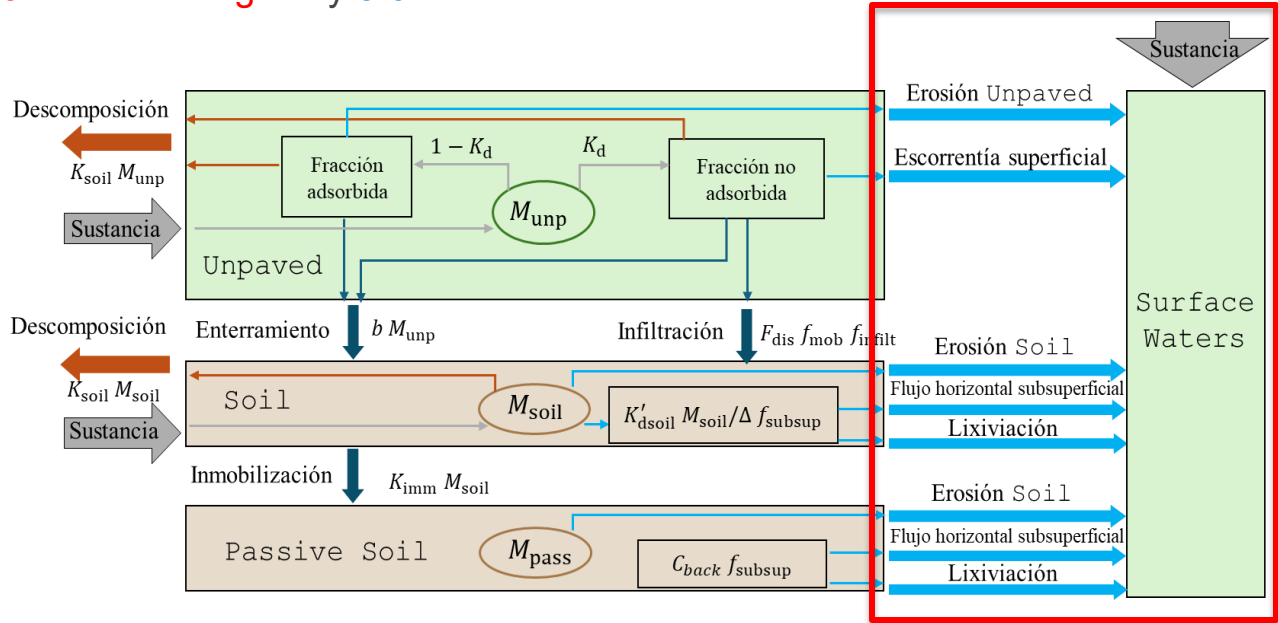
El transporte de Nitrógeno a las aguas superficiales se debe principalmente a procesos subterráneos (50%) y descargas directas (42%) de algunas fuentes (tambos sin gestión de efluentes y vertidos)

El transporte de Fósforo a las aguas superficiales se debe principalmente a procesos superficiales (58%) procesos subterráneos (33%) y descargas directas (8.6%)

RESULTADOS: BALANCE DE MASA EN MODELO D-EMISSIONS

(TÉRMINOS PRINCIPALES) Alcanzan los cauces principales: 3.2% del Nitrógeno y 5.6% del Fósforo

Código EM	Descripción	Contribución relativa de masa al WQ	
		TN	TP
_dRelB08Sfw	Tambos sin gestión de efluentes	21,8%	4,1%
_dRelB09Sfw	Efluente doméstico	12,2%	2,7%
_dRelB10Sfw	Efluente industrial	8,6%	1,8%
_dunp2sfwer	Erosión en áreas sin pavimentar	0,5%	47,5%
_dunp2sfwro	Escorrentía en áreas sin pavimentar	6,7%	10,5%
_dsoi2sfwex	Exfiltración desde el suelo	49,8%	12,5%
_dsop2sfwex	Exfiltración desde suelo pasivo	0,0%	20,8%
_dsoi2sfwer	Erosión desde el suelo	0,1%	0,0%
_dsop2sfwer	Erosión desde suelo pasivo	0,2%	0,1%
_dswf2exp	Flujo total hacia WQ	100%	100%



BALANCE DE MASA EN MODELO D-WATER QUALITY

Valores promedio (t/año)

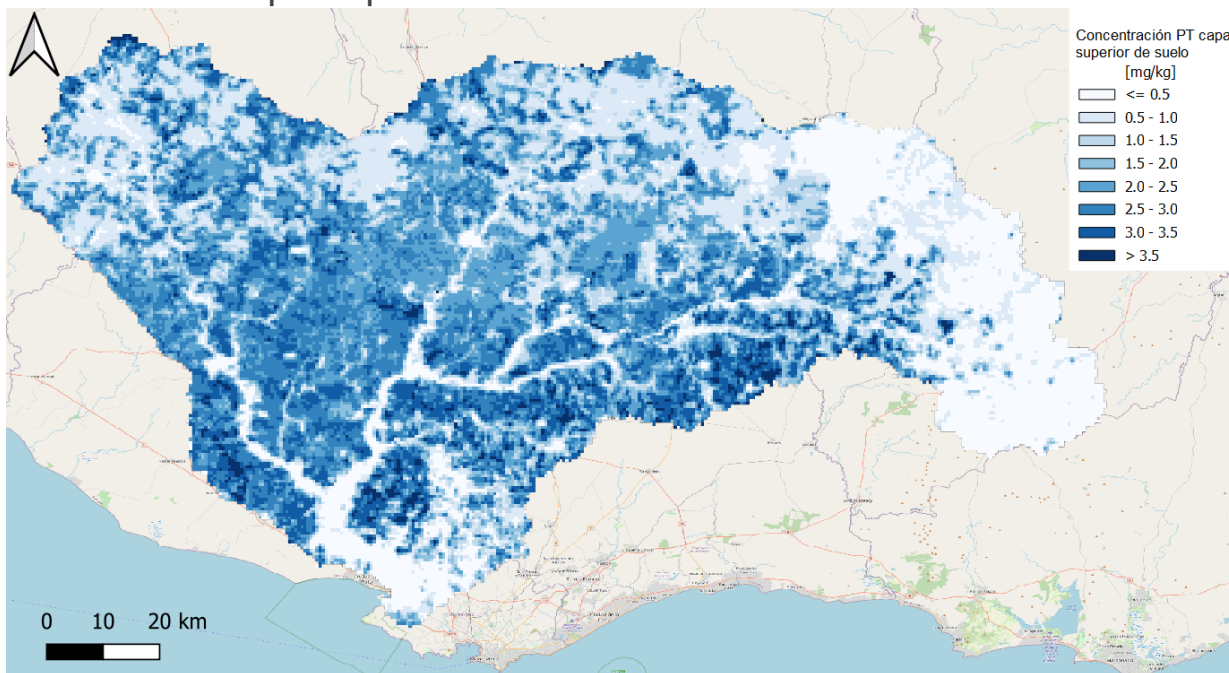
Nutriente	Código WQ	Descripción	Entradas		Salidas	
Nitrógeno Total	_sfw>out1.	Salida del dominio	0	0%	2476	99%
	_dENH4	Fuente de amonio (EM)	159	6%	0	0%
	_dENO3	Fuente de nitrato (EM)	847	32%	0	0%
	_dEPON1	Fuente de residuos nitrogenados (EM)	1641	62%	0	0%
		Otros términos	16	0%	27	1%
		Totales	2664	100%	2503	100%
Fósforo Total	_sfw>out1.	Salida del dominio	0	0%	1493	67.5%
	_dEPO4	Fuente de ortofosfato (EM)	1139	50%	0	0%
	_dEAAP	Fuente de ortofosfato adsorbido (EM)	683	30%	0	0%
	_dEPOP1	Fuente de residuos fosforados (EM)	455	20%	0	0%
	_dSedAAP	Sedimentación de ortofosfato adsorbido	0	0%	716	32.4%
		Otros términos	2	0%	2	0.1%
		Totales	2279	100%	2211	100%

El 99% del nitrógeno se transporta a la salida de la cuenca. Procesos de remoción en cauce son mínimos.

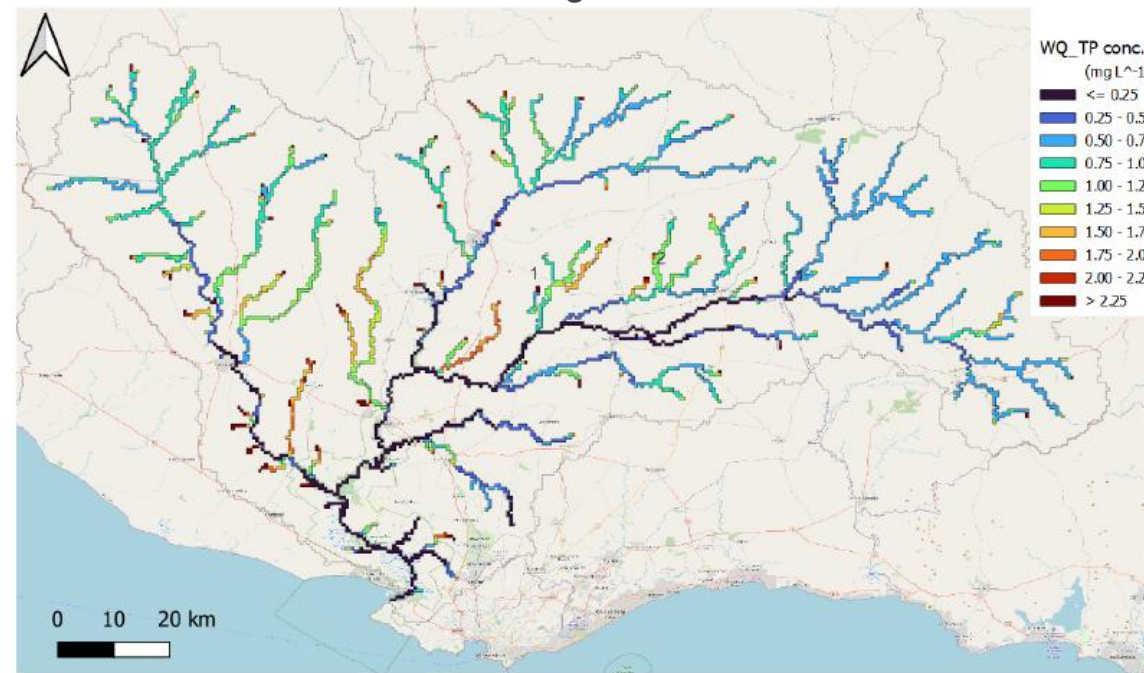
La sedimentación remueve el 32.4% del fósforo en los cauces.

RESULTADOS: SALIDAS VISUALES DEL PROGRAMA

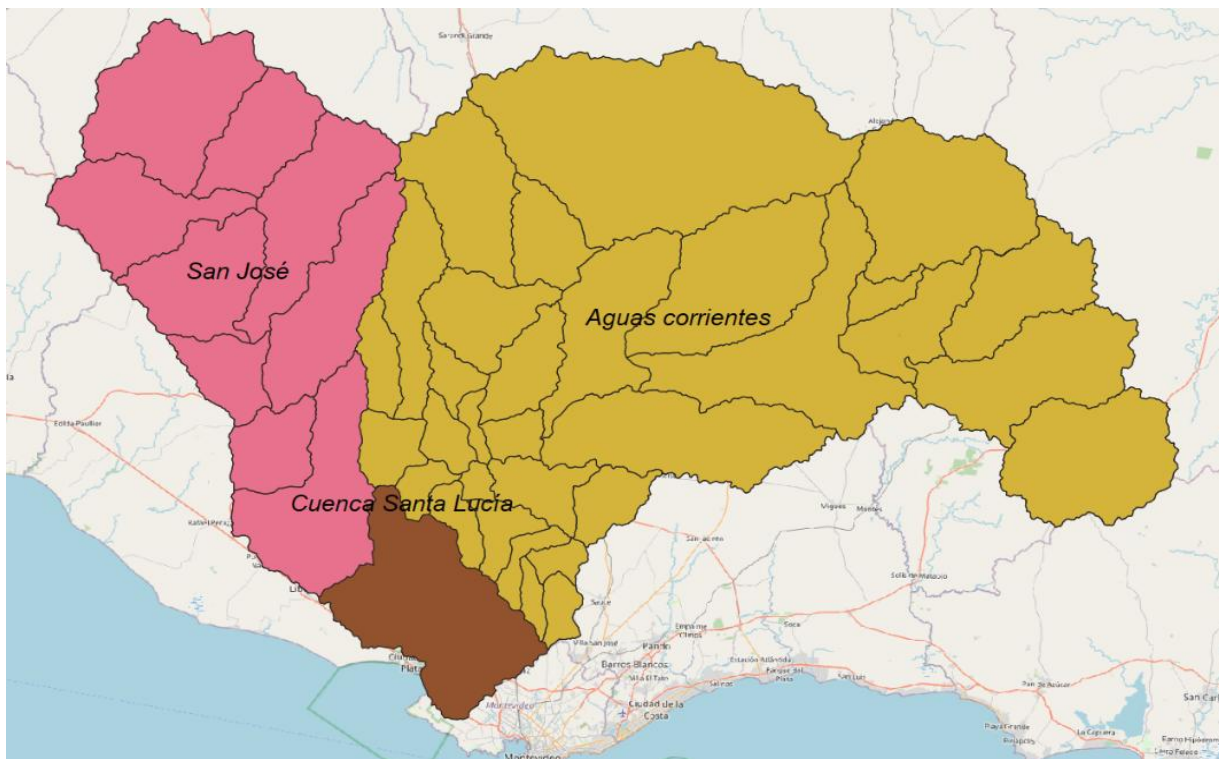
- Mapa de concentración de Fósforo en la capa superior del suelo



- Mapa de concentraciones promedio de Fósforo en cursos de agua



OTRAS FUNCIONALIDADES DEL PROGRAMA: LOS BALANCES SE PUEDEN REALIZAR EN CUALQUIER SUBCONJUNTO DE CELDAS



PRINCIPALES CONCLUSIONES

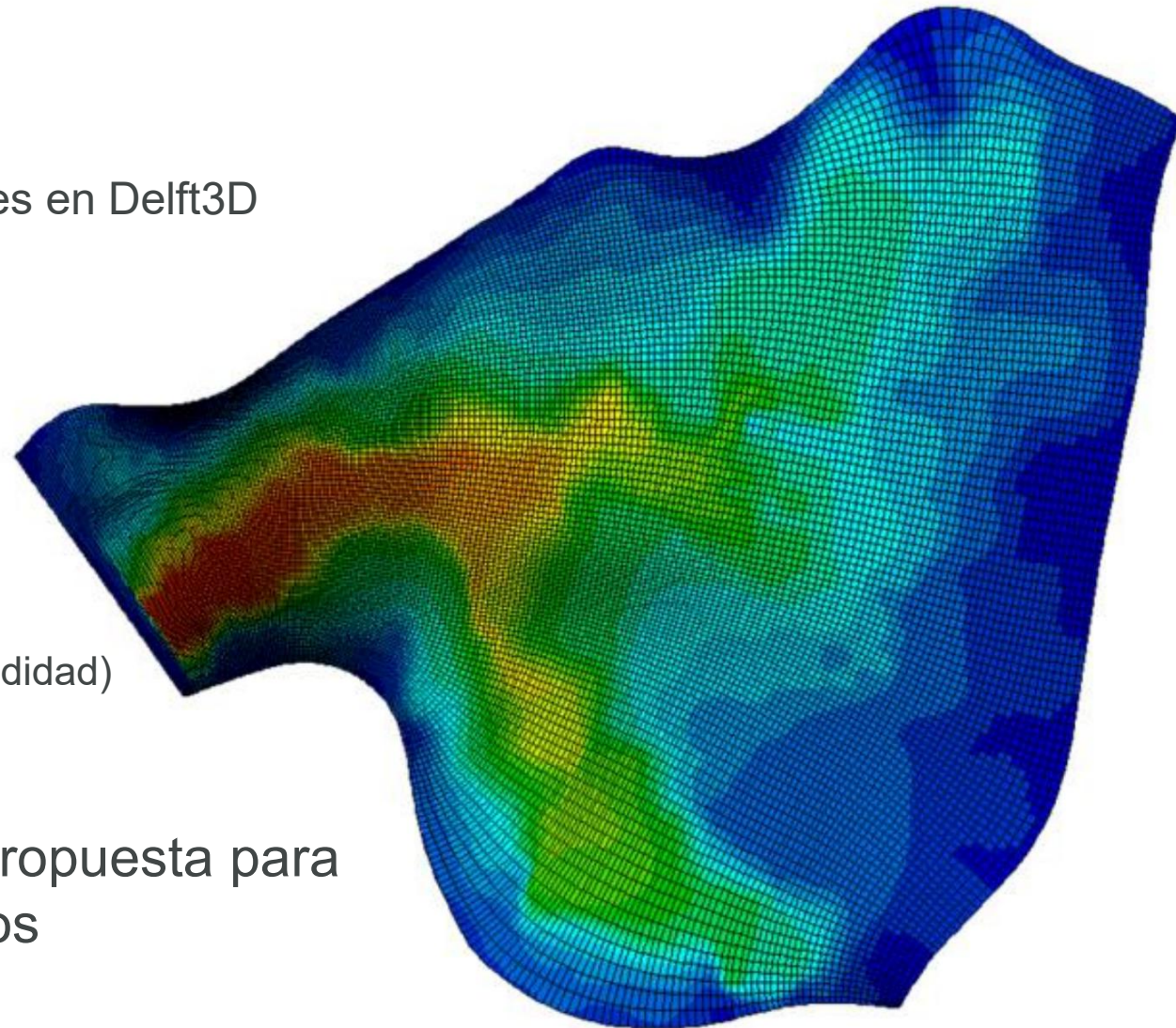
- El modelo **integrado** (Wflow, D-Emissions y D-Water Quality) **reprodujo** adecuadamente las **cargas de nutrientes** observadas en distintos regímenes de caudal.
- El desempeño fue bueno en subcuencas grandes, aunque surgieron **discrepancias** en **escalas menores**. Las diferencias locales podrían deberse a procesos no representados, como fuentes puntuales no monitoreadas o supuestos inadecuados sobre emisiones.
- Además, las diferencias en concentraciones durante períodos de caudal bajo indican **sensibilidad a errores** en la estimación de **caudales** en condiciones de **escasez hídrica**.
- La dinámica de **sedimentos**, clave en el transporte de **fósforo**, requiere una calibración más precisa debido a **limitaciones** en los **datos**. **Mejorar el acoplamiento** entre sedimentos y nutrientes es fundamental para aumentar la **precisión** del modelo.
- Este trabajo aporta evidencia basada en modelos que **distingue entre fuentes**, rutas de **transporte** y **destino** del nitrógeno y fósforo en la cuenca. La plataforma permite evaluar **escenarios de manejo** como la optimización del momento de aplicación de fertilizantes o el control de efluentes ganaderos.

PRINCIPALES CONCLUSIONES

- El transporte de **nitrógeno** hacia cauces se debe principalmente a procesos **subterráneos** y **vertidos directos**. Posteriormente, en el sistema fluvial, el 99% de la carga entrante se transporta a la salida.
- Luego, cualquier estrategia de mitigación debe centrarse en el control de las fuentes de emisión **en su origen**.
- El transporte de **fósforo** hacia los ríos se debe mayoritariamente a procesos **superficiales** (escorrentía y erosión). A diferencia del nitrógeno, la **sedimentación** en los cauces retiene el 32.4% del fósforo.
- Por lo tanto, una gestión eficaz para el fósforo requiere un **enfoque dual**, no solo abordar **control** en las **fuentes** sino que también el **control de la erosión** como estrategia clave para la mitigación (por ejemplo: a través de franjas ribereñas, siembra directa y retención de sedimentos)

MODELACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO NEGRO

- Aspectos a incorporar:
 - Embalses: modelo hidrodinámico de los embalses en Delft3D
 - Biomasa de Algas:
 - Nutrientes:
 - Fósforo
 - Nitrógeno
 - Silicio
 - Carbono
 - Factores Ambientales y Forzantes Externos
 - Luz (Radiación solar y extinción de luz en profundidad)
 - Temperatura
 - Salinidad
- Implicaría involucrar a DELTARES en la propuesta para que faciliten el “Know-how” de los aspectos



COLABORARON EN ESTE TRABAJO

- Ministerio de Ambiente (DINAGUA y DINACEA)
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (DGRN)
- OSE
- IMFIA, FING, UDELAR
- DELTARES

