

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

CUENCAS VIRTUALES

BASES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA NACIONAL
DE MONITOREO DE RECURSOS HÍDRICOS



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



CURE
Centro Universitario
Regional del Este



AGENCIA NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
E INNOVACIÓN



SARAS²
South American Institute for
Resilience and Sustainability Studies



FACULTAD DE
CIENCIAS
VIGILAR | ESCUELA



IH Cantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Título:

“Bases para el diseño de un Sistema Nacional de Monitoreo de recursos hídricos desde la perspectiva de Cuencas Virtuales”

“Bases for the design of a national system for the monitoring of water resources from the virtual basins perspective”

Llamado:

Fondo sectorial de Investigación a partir de datos abiertos 2018

Código del Proyecto:

ANII_FSDA_1_2018_1_154610

Responsable técnico-científico:

Dr. Néstor Mazzeo Beyhaut

Investigadores:

Dr. Ismael Díaz Isasa (**Fcien**)

Mag. Ana Lía Ciganda Garrido (**CURE**)

Lic. Camila Fernández Nion (**Fcien**)

Dra. Carolina Crisci Karlen (**CURE**)

Francisco Peñas Silva, PhD (**IH Cantabria**)

Jose Barquín Ortiz, PhD (**IH Cantabria**)

Alexia Gonzalez Ferreras, PhD (**IH Cantabria**)

Institución proponente:

- [Universidad de la República](#)
- [Centro Universitario Regional Este](#)
- Grupo de Ecología y Rehabilitación de Sistemas Acuáticos, Departamento de Ecología y Gestión Ambiental

Otras instituciones participantes:

- [Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio. Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias, Universidad de la República](#)
- [Instituto SARAS](#)
- [Instituto de Hidráulica Ambiental IH Cantabria](#)
- [Universidad de Cantabria \(España\)](#)
- [PDU Modelización y Análisis de Recursos Naturales. Centro Universitario Regional Este, Universidad de la República.](#)
- [Ministerio de Ambiente de Uruguay](#)

Diseño de Comunicación Visual: Isabel Cabezudo, Camila Narducci

Fotografías: Cortesía de Paula Levrini

INDICE

- > [09. RESUMEN](#)
- > [10. ANTECEDENTES](#)
- > [18. ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN Y METODOLOGÍA](#)
- > [32. RESULTADOS](#)
- > [82. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES](#)
- > [88. APLICABILIDAD](#)
- > [92. EQUIPO DE TRABAJO](#)
- > [98. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS](#)



CUENCAS VIRTUALES

BASES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA NACIONAL
DE MONITOREO DE RECURSOS HÍDRICOS

PALABRAS CLAVES

Recursos hídricos

Cuencas virtuales

Sistema Nacional de Monitoreo

DEPARTAMENTOS

Artigas

Canelones

Cerro Largo

Colonia

Durazno

Flores

Florida

Lavalleja

Maldonado

Montevideo

Paysandú

Rio Negro

Rivera

Rocha

Salto

San José

Soriano

Tacuarembó

Treinta y Tres



RESUMEN

El Uruguay transita cambios en el uso del suelo, la utilización de bienes y servicios provistos por la naturaleza, así como en los sistemas de gestión y gobernanza asociados. La expansión e intensificación de la agricultura y de las explotaciones forestales, junto a la intensificación ganadera durante los últimos 15 años, han condicionado importantes desafíos en la gestión del agua. Simultáneamente, la gestión de los recursos acuáticos procura superar la fragmentación en el análisis y toma de decisiones, avanzando hacia modelos más integrales, con mayor capacidad de aprendizaje y manejo de la incertidumbre.

En este contexto, el proyecto procuró fortalecer los procesos de análisis y toma de decisión a través de la recopilación y construcción de bases de datos sobre atributos hidrológicos y de calidad del agua de estaciones de muestreos localizados en el territorio nacional, así como diversas características de las cuencas de drenaje asociadas (tamaño de las cuencas, topografía, red de tributarios, tipo y usos del suelo, cobertura de pastizales y formaciones boscosas, vertidos puntuales, entre otros). Mediante la combinación de la teledetección, sistemas de información geográfico y técnicas estadísticas se identificaron los principales factores naturales y de origen antrópico que condicionan las diferencias espaciales observadas en atributos claves tanto de cantidad como de calidad. En este proceso se relevaron las principales fortalezas y debilidades del sistema de monitoreo actual, así como posibles estrategias de fortalecimiento en un escenario de cooperación interinstitucional e internivel de gobierno, combinando estrategias de descentralización y centralización, fomentando una estructura en red de capacidades de monitoreo, fiscalización y contralor distribuidas en el territorio. Los aportes del proyecto son insumos para un proceso de codiseño de estrategias a definir en la red de actores del sistema actual de gobernanza del agua, proceso que se encuentra en pleno desarrollo.



ANTECEDENTES

Uruguay presenta importantes transformaciones en el uso del suelo, la utilización de bienes y servicios provistos por ecosistemas terrestres y acuáticos, así como en los sistemas de gestión y gobernanza asociados (1). La expansión e intensificación de la agricultura y la forestación, el mantenimiento de una producción ganadera en términos de stock pero en una menor área productiva durante los últimos 15 años, ha sido acompañado por un deterioro de la calidad del agua en diversas cuencas (p. ej. río Santa Lucía, Laguna del Sauce, río Negro), muy visibles en aquellas destinadas al suministro del agua potable. A nivel nacional, de forma similar a las tendencias globales, la gestión de los recursos acuáticos procura superar la fragmentación en

el análisis y toma de decisiones, avanzando hacia modelos más integrales, participativos (manejo integrado) y con mayor capacidad de aprendizaje y una adecuada incorporación de la incertidumbre (manejo adaptativo) (2). En la conformación de redes multiactorales y multinivel de gestión, se procura generar redundancia en los roles asociados a los actores del sistema de gobernanza en aproximaciones conocidas como co-manejo, co-producción o co-diseño (3, 4, 5). Esta trayectoria de cambios puede ser analizada desde los siete principios que construyen capacidad de resiliencia en los sistemas socio-ecológicos (SES), fundamentalmente aquellos vinculados a: la diversidad y redundancia; la conectividad; la promoción de la participación, aproxima-

ciones sistémicas y el aprendizaje; así como la construcción de sistemas de gobernanza policéntricos (6).

Las cuencas virtuales o paisajes artificiales son sistemas artificiales que integran un conjunto muy diverso de información del territorio gracias a los avances en el campo de los sistemas de información geográfica (SIG), la teledetección, la estadística multivariada, el aprendizaje automático, la geoestadística y los enfoques Bayesianos, con el propósito de conocer patrones de similitud o disimilaridad de múltiples atributos o propiedades en el espacio (a diferentes escalas) y en el tiempo, así como sus vínculos o relaciones (7,8). Además de los aspectos más básicos o fundamentales, este marco resulta de gran utilidad en el diseño de evaluaciones de impacto (Before and After-BA, Control and Impact-CI, Before, After and Control Impact-BACI) o de sistemas de monitoreo (9), así como para el ordenamiento territorial ya que demandan el manejo y el análisis de un conjunto de atributos del cauce (por ej. régimen hidrológico, tipo de sustrato, calidad del agua), y características de la cuenca de drenaje (topografía, geología, tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, entre otras), así como las interacciones entre las mismas.

El considerable esfuerzo realizado en Europa en el contexto de la Directiva Marco del Agua (<http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/wfd/es.pdf>) permitió desarrollar una detallada evaluación de la calidad y conservación de los ecosistemas acuáticos, integrando información fisicoquímica, biológica y ecosistémica a nivel de cauce y planicies de inundación. La interacción entre las bases de datos recopiladas a nivel de tramo fluvial y la información a nivel de cuenca generada con el enfoque de cuencas virtuales ha permitido identificar relaciones y procesos a nivel de cuenca que aseguran o determinan la pérdida de bienes o servicios claves del bienestar humano (10,11,12,13). Dicha interacción ha tenido un gran impacto tanto a nivel de la investigación fundamental, por ejemplo explorando mecanismos causales de las relaciones estadísticas emergentes, como prácticas a nivel del ordenamiento territorial o de diseño de infraestructura verdes, entre otras.

En el ámbito de la gestión, el Uruguay navega actualmente una transición desde un modelo fragmentado (comando-control) de gestión de los recursos acuáticos continentales hacia el manejo integrado (1, 14). La ausencia de sistemas de monitoreo robustos a nivel nacional y evaluaciones sólidas de los impactos generados por las transformaciones antes indicadas, limitan seriamente tanto el diseño de medidas de gestión adecuadas como el manejo de la incertidumbre y la capacidad de aprendizaje (generalmente asociado al aprender haciendo). Los sistemas de monitoreo, excepto el registro de caudales, no son de larga duración y han sido diseñados para evaluar actividades o emprendimientos concretos en sitios específicos y por lapsos acotados. Por otra parte, la evaluación de la calidad del agua se basa casi exclusivamente en propiedades fisicoquímicas, siendo casi inexistentes abordajes mediante bioindicadores o atributos ecosistémicos.

¿El Uruguay ha gestionado todos los componentes de su capital natural de la misma forma? No, el país presenta importantes avances en el conocimiento de sus recursos terrestres, particularmente el suelo, con una cartografía desarrollada a partir de los años 1960. En la última década ha sido muy importante el avance en el área del manejo y uso de información espacial en varias dependencias del Estado (p. ej. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Ministerio de Ambiente). Es importante destacar la creación de diversas estructuras puentes a nivel gubernamental con el propósito de facilitar el intercambio de información, desarrollo de proyectos conjuntos y optimización de recursos. En este contexto se inscriben el Sistema Nacional de Emergencias; la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE); la Agencia para el Desarrollo del Gobierno de Gestión Electrónica y la Sociedad de la Información y del Conocimiento (AGESIC); el Observatorio Ambiental del Ministerio de Ambiente. En última instancia, todos estos ámbitos promueven una mayor cooperación interinstitucional con el propósito de superar la fragmentación en el análisis y toma de decisión generado por los sistemas de organización de la educación terciaria y del propio Estado. En el mismo período, en el campo del ordenamiento territorial se constatan importantes esfuerzos en los niveles nacionales y

departamentales a efectos de fortalecer las capacidades e interacciones entre los niveles de gobierno.

Un ejemplo directamente vinculado al desarrollo de la presente propuesta es el proyecto denominado: Producción, control y diseminación de ortoimágenes, modelos digitales de elevación y cartografía, iniciativa de la IDE y AGESIC (implementada por medio de un préstamo del Banco Interamericano de Desarrollo-BID), que tuvo como objetivo generar información geográfica básica para todo el territorio uruguayo. Entre sus principales productos se destacan imágenes digitales (bandas RGB, I) de alta resolución geométrica (32cm, y exactitud xy 1m, exactitud z 1,5m) y modelos digitales de superficie de alta resolución (250cm), y un conjunto de subproductos. Todos estos productos tienen una cobertura de todo el territorio uruguayo, y fueron relevadas en 2017 y 2018. La información digital generada en este proyecto representa un salto cualitativo en la información geográfica en el país dado que la única campaña de relevamiento de todo el territorio nacional corresponde a los años 1966-1967. En este sentido, a partir de esta nueva base de datos se logrará por un lado actualizar y por otro lado mejorar la precisión de diferentes productos, como ser la delimitación y caracterización de cuencas hidrográficas, su red de drenaje y sus parámetros morfométricos, análisis de coberturas vegetales, y análisis de crecimiento urbano e infraestructuras. Esta base de datos y la información geográfica a generar a partir de ella, representan insumos básicos y fundamentales para la evaluación y monitoreo de recursos naturales y servicios ecosistémicos, y para la planificación del territorio.

Uruguay representa un caso muy particular debido al importante desbalance en la información disponible entre los principales componentes de su capital natural (por ej. suelo vs. agua). Al mismo tiempo, genera y dispone de información muy detallada sobre tipos y usos del suelo, coberturas vegetales, entre otros. En este contexto, se cuenta con suficiente información para avanzar rápida y sustancialmente recorriendo un proceso inverso a la experiencia europea antes indicada. En términos concretos, diseñar sistemas robustos de evaluación y monitoreo de recursos hídricos a partir de múltiples

atributos (naturales y de origen antrópico) a nivel de cuencas hidrográficas de diferente orden.

Justificación

El presente proyecto se enmarca en los desafíos actuales relacionados a la gestión de los recursos acuáticos continentales. La correcta administración y cuidado de estos ecosistemas, y los bienes y servicios que proveen, requiere de un adecuado conocimiento de diversos componentes del capital natural, sus dinámicas espaciales y temporales, así como comprender, prevenir y mitigar los efectos de las actividades humanas sobre los cuerpos de agua y sus cuencas de drenaje. Uruguay ha contado por el momento con una estrategia fundamentalmente reactiva en esta materia con una escasa capacidad de anticipación. En el área del monitoreo de atributos básicos de la calidad del agua se constata un conjunto de programas a cargo de diferentes instituciones del Estado que se han sucedido en el tiempo en respuesta a objetivos o demandas sectoriales. La cobertura espacial presenta importantes limitaciones para generar diagnósticos robustos en la escala nacional y las ventanas de tiempo de observación son en general limitadas. Las evaluaciones de calidad del agua por el momento incorporan una limitada fracción de los atributos requeridos, con una ausencia de indicadores biológicos y ecosistémicos. Finalmente, la fragmentación organizacional del Estado determina una muy limitada cooperación y complementación entre los programas de monitoreo existentes, condicionando una muy baja eficiencia económica del conjunto de programas en función de la relación costos vs. información generada.

De acuerdo a la escala espacial del país, sus condiciones socioeconómicas, el contexto de las grandes transformaciones del uso del suelo de los últimos 15 años y los modelos de intensificación productiva sostenible previstos en el corto plazo, resulta imposible administrar correctamente y preservar los ecosistemas acuáticos continentales con los sistemas de generación de información de calidad del agua actuales.

OBJETIVOS Y METAS

El proyecto constituye un primer paso fundamental e ineludible para navegar la transición hacia el manejo adaptativo, incorporando la experiencia europea señalada en antecedentes del proyecto y los avances en la generación e intercambio de información espacial en el Uruguay, en el marco de los siguientes objetivos:

1. **Analizar las fortalezas y debilidades del conjunto de estaciones de monitoreo de calidad y cantidad de agua superficial existentes en el país para evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos de agua dulce.**
2. **Identificar la regionalidad emergente en el país (considerando múltiples atributos naturales, de uso del suelo y socioeconómicos) a considerar en la optimización de una red de monitoreo (de cantidad y calidad del agua) a escala nacional.**
3. **Generar un soporte robusto que permita identificar zonas impactadas, de control y de referencias para las evaluaciones de impactos de diversos usos del suelo y presiones antrópicas.**
4. **Establecer un diseño espacial de monitoreo a escala nacional que permita la incorporación de indicadores biológicos, atributos ecosistémicos o propiedades químicas no contempladas (por ejemplo, residuos de plaguicidas) en el corto y mediano plazo.**
5. **Explorar posibles distribuciones espaciales de equipos de monitoreo, control y fiscalización a nivel nacional, combinando estrategias descentralizadoras y centralizadoras que reduzcan costos y aseguren su sostenibilidad en el tiempo, promoviendo interacciones interinstitucionales y internivel de gobierno en un modelo policéntrico de gobernanza.**

Fotografía: Mag. Ana Lía Ciganda Garrido



De acuerdo con los objetivos indicados, la presente propuesta resulta de fundamental importancia para las múltiples instituciones y direcciones directamente vinculadas a la administración, cuidado y gestión de los recursos acuáticos continentales, tanto del ámbito nacional como departamental y municipal. En este sentido, los principales actores del ámbito nacional se vincularon al presente proyecto (por ej. Ministerio de Ambiente, OSE). Al mismo tiempo, permitió identificar patrones emergentes cuya comprensión de la causalidad asociada requerirá el desarrollo de nuevas líneas de investigación básica en múltiples dominios de conocimiento (Limnología, Ecología del Paisaje, Geoestadística, Aprendizaje Automático). Por último, los resultados de la propuesta aportan a la construcción de sistemas más robustos y transparentes de monitoreo y gestión de los recursos acuáticos continentales, promoviendo una participación más informada y con mayor comprensión de las problemáticas asociadas para el conjunto de actores y agentes del sistema de gobernanza actual del agua.



ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN Y METODOLOGÍA

La estrategia de investigación constó de 5 etapas: a) recopilación y sistematización de información geográfica y construcción de capas con variables clave de las cuencas que pueden condicionar atributos hidrológicos y de calidad del agua; b) creación de una red sintética de cursos de agua y derivación de cuencas virtuales (asignación de variables claves a cada segmento de la red); c) generación de índices hidrológicos, análisis multivariados para caracterizar los cursos según su “firma hidrológica”, relaciones estadísticas entre los índices hidrológicos y atributos de la cuenca indicados en b ; d) identificación de relaciones estadísticas entre variables de calidad de agua y las variables calculadas en “b” a través de modelos predictivos;

e) realización de entrevistas y talleres con instituciones gubernamentales con responsabilidad en la gestión del agua en Uruguay y vinculadas a la generación y análisis de información.

A+B: Cuencas virtuales

Se generaron cuencas virtuales para todo el Uruguay (y parte de Brasil – cuenca del río Negro, cuenca del río Cuareim y cuenca de la Laguna Merín) utilizando los algoritmos del software NetMap (<https://terrainworks.com/>)

netmap-portal). Se subdividió el país en 5 grandes cuencas para el manejo más eficiente de la información: cuenca Este del río Uruguay (solamente se consideró el territorio uruguayo y no incluye la cuenca del río Negro); cuenca del río Negro; cuenca de la Laguna Merín; región Oeste de la cuenca baja del Río de la Plata; región Este de la cuenca del Río de la Plata junto con cuenca del Océano Atlántico. Las tres primeras regiones incluyeron parte del territorio brasileño. La delimitación de las cuencas hidrográficas se realizó utilizando un Modelo Digital de Elevación ALOS-PALSAR de 12,5m de resolución geométrica (F_M1_1).

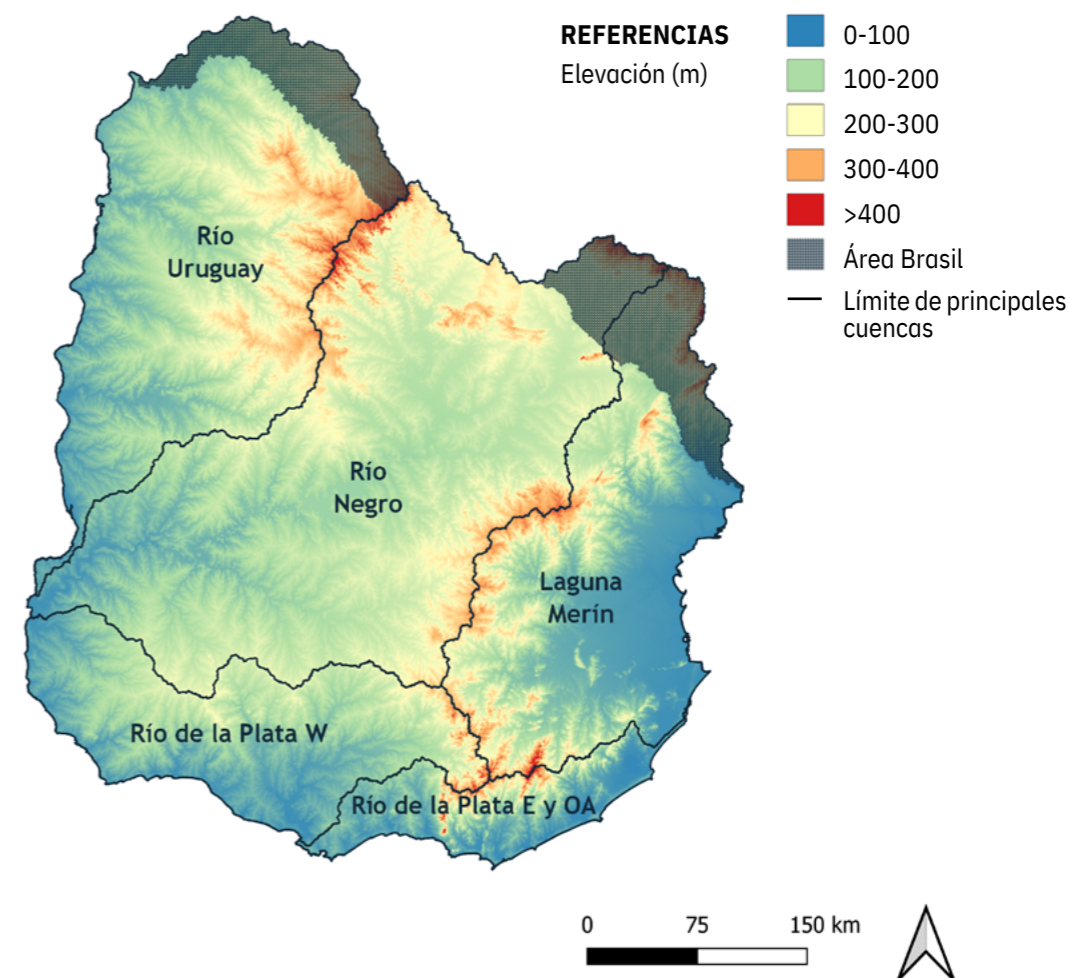
+ Se creó una red fluvial sintética a partir del MDE de 12,5m de resolución (ALOS PALSAR) e información de precipitación media anual (Chelsa V1.2). Se utilizó una red fluvial de referencia para ajustar la red generada, compuesta por la capa de cursos de agua construida por la IDEuy (2017-2018) y las capas de las Bacías Hidrográficas Ottocodificadas de Brasil (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico- ANA).

+ Se realizó la caracterización topográfica de todas las celdas de la cuenca virtual, incluyendo su elevación respecto al curso fluvial, la convergencia de flujos, la pendiente, etc. La red sintética generada se dotó de otra serie de variables topográficas como sinuosidad, densidad de drenaje, densidad de confluencias, pendiente del tramo, etc. Se generó la direccionalidad de toda la red.

+ Se recopiló información espacial disponible para el área de estudio, trabajando con tres grandes grupos de variables: climáticas/ meteorológicas; geofísicas; meteorológicas; geofísicas; coberturas y usos del suelo y presiones antrópicas.

> F_M1_1:

Modelo digital de elevación y regiones. En el mapa se indican las cinco regiones en las que se dividió el área de estudio para construir las cuencas virtuales. Fuente: elaboración propia a partir del Modelo digital de elevación de 12,5m de resolución (ALOS PALSAR).



Climáticas/meteorológicas

Se obtuvieron datos de plataformas internacionales para: evapotranspiración potencial (GAIPET, ET0); temperatura del aire (Chelsa V 1.2); y precipitación (Chelsa V 1.2). En todos los casos se obtuvieron valores promedio anuales y valores mensuales promedio, así como los máximos y mínimos de temperatura para cada mes.

Geofísicas

A partir del mapa geológico de Uruguay (DINAMIGE) a escala 1:500.000 y cartas geológicas de Brasil se realizó una reclasificación en 11 clases litológicas siguiendo la propuesta del IHCantabria (15). Posteriormente se interpretaron y se clasificaron ordinalmente las unidades para los atributos Dureza, Permeabilidad y Conductividad en una escala de entre 1 y 5, indicando 1 un valor muy bajo y 5 un valor alto de cada uno de estos atributos. Más detalles de cómo se derivaron estas variables pueden ser encontrados en Snelder et al. (16).

Se realizó un procedimiento similar para reclasificar los tipos de suelo. Se partió de la información de base de suelos proporcionada por CONEAT (1994) y se reclasificaron las unidades de 0 a 1 para las variables profundidad y textura. Adicionalmente, se consideró la variable Estimación del Agua Potencialmente Disponible Neta (ADPN) en el suelo, producto elaborado por Molino (17) utilizando información CONEAT, con valores de 18 a 255.

Cobertura y usos del suelo, presiones antrópicas

Se incorporó la base de usos de suelo generada por DINOT-DINAMA en 2015, clasificación de la cobertura física y biofísica del Uruguay a escala 1:100.000, mediante el uso de Land Cover Classification System (LCCS)-FAO. Para el territorio brasileño, se realizó una clasificación de imágenes LANDSAT 8OLI siguiendo la metodología empleada por DINOT-DINAMA. Una vez

disponible la información de usos y cobertura del suelo para toda el área de estudio, se procedió a reclasificar de acuerdo a la propuesta realizada por IHCantabria (15).

En las presiones se consideraron 4 fuentes de información: vertidos, feedlots, presas y unidades ganaderas. La información de vertidos fue proporcionada por DINACEA para el territorio nacional y por la ANA para el territorio brasileño. Esta información consta de capas vectoriales con la ubicación de fuentes de vertidos. La información de presas fue obtenida de la IDEuy y constó de capas vectoriales con la delimitación de represamientos en Uruguay. Se consideraron únicamente los represamientos con una superficie mayor a 1 ha. La información de establecimientos de engorde a corral (feedlots) fue proporcionada por DINACEA a través de una solicitud de acceso a la información. Finalmente, la información de Unidades Ganaderas (UG) proporcionada por el SNIG (MGAP) a escala de área de enumeración, se utilizó para estimar la carga ganadera total por unidad de superficie. Para el cálculo se tomó como supuesto que la carga se distribuye de acuerdo a la productividad de los suelos (medida mediante el índice CONEAT). A partir de esta generalización, utilizando la carta de usos generada por DINOT (cobertura de herbácea y arbustiva) y los suelos CONEAT se asignó un valor de UG a cada celda de 1km x 1km.

Con un software especial de la plataforma NetMap, se transfirió la información de los distintos atributos ambientales a la red fluvial con diferentes escalas espaciales: de cuenca (MN), considerando el valor acumulado toda la cuenca vertiente aguas arriba de cada tramo; local (LC), considerando sólo la subcuenca asociada a cada segmento concreto; y buffer, considerando 200 m adyacentes a un determinado segmento (BF) o a todos los segmentos aguas arriba (BC).

Para el caso de las presiones por vertidos y por feedlots, se generó un script para correr en R que permite asignar a cada segmento del curso el valor acumulado de presiones que drenan hacia él. La única información

recopilada que no fue incorporada a los segmentos sintéticos fue la de represas por limitaciones técnicas.

Se generaron un conjunto de capas vectoriales de geometría de línea (red fluvial sintética), subdividida en segmentos, con tablas de atributos que presentan en total 900 variables que dan información topográfica, climática/meteorológica, geofísica, coberturas, usos del suelo y presiones asociadas a cada segmento ([T_M1_1](#)).

C + D: Tipificaciones de la red fluvial

A partir de atributos hidrológicos y de calidad del agua como variables dependientes en los tramos fluviales con estaciones de muestreo y atributos ambientales como variables predictoras, se desarrollaron modelos estadísticos empíricos utilizando el software R para establecer relaciones entre cada variable dependiente y las variables predictoras preseleccionadas ([T_M2_1](#)).

Hidrología

Inicialmente se consideraron las series de caudales mensuales recopiladas en 70 estaciones de aforo (DINAGUA-MA). Se aplicaron los siguientes criterios para asegurar la calidad de las series: estaciones no afectadas por embalses importantes; datos disponibles para el período 1980-2020; solo datos para años hidrológicos (abril-marzo) completos; se descartaron las estaciones que presentaron menos de 8 años completos en el período 1980-2020.

Tras aplicar estas restricciones, se seleccionaron 51 estaciones con una duración media de 24 años completos de datos ([T_M2_2](#) y [F_M2_1](#)). Se calcularon 73 índices hidrológicos (IH) ([T_M2_3](#)) para las series de caudales mensuales ([D_M2_1](#)), utilizando scripts tomados y adaptados de Peñas et al. (18) ([S_M2_1](#)).

> T_M2_1:

Variables ambientales preseleccionadas en la construcción de las bases de datos y análisis estadísticos

Variable	Acrónimo	Grupo
Área de la cuenca de drenaje	AREA_SQKM	Topografía
Altitud media de la zona de drenaje aguas arriba	MN_ELEV	
Longitud acumulada del canal aguas arriba hasta el extremo aguas abajo del tramo	UPCHANLEN	
Orientación geográfica media del tramo	AZIMTH_DEG	
Pendiente media de la zona de drenaje aguas arriba	MN_GRAD	
Distancia al punto de inicio del canal	SRC_DIST	
Orden del río en el segmento, según Strahler	STRM_ORDER	
Precipitación media anual en la zona de drenaje	MNANPRC_M	
Gradiente máximo encontrado aguas abajo a través de la red	MAX_GRAD_D	
Confluencias por unidad de longitud de canal para todos los canales aguas arriba (Benda et al., WRR 2004)	CONF_DEN	
Longitud del canal en kms. por km. cuadrado para el área que contribuye al tramo	CHAN_DEN	Geología
Caudal medio anual en el extremo aguas abajo del tramo (NetMap)	MEANANNCMS	
Dureza media de las rocas aguas arriba del tramo del río	MN_DUR	
Permeabilidad media de las rocas aguas arriba del tramo del río	MN_PER	Clima
Temperatura media anual del aire en la cuenca	MN_tmyr	
Evapotranspiración potencial (GAIPET, ET0)	MN_etyr	Tipos de suelo
Capacidad media del suelo para retener el agua aguas arriba del tramo del río	MN_apdn	
Porcentaje de suelos profundos (CONEAT) aguas arriba del tramo del río	MN_ppro	
Porcentaje de suelos superficiales (CONEAT) aguas arriba del tramo del río	MN_psup	



Variable	Acrónimo	Grupo
Porcentaje de bosque nativo en el área de drenaje	MN_arna	Usos del suelo
Porcentaje de bosque nativo en el buffer de 200 m aguas arriba del tramo	BC_arna	
Porcentaje de usos agrícolas de la tierra en la zona de drenaje aguas arriba	MN_agri	
Porcentaje de vegetación herbácea en el área de drenaje	MN_herb	
Porcentaje de vegetación herbácea en el buffer de 200 m aguas arriba del tramo	BC_herb	
Porcentaje de forestación con Eucaliptus en la zona de drenaje aguas arriba	MN_areu	
Porcentaje de forestación con Eucaliptus en los 200 m aguas arriba del tramo del río	BC_areu	
Porcentaje de usos del suelo urbano en la zona de drenaje	MN_edif	
Cantidad de vertidos (domésticos e industriales) y feedlots aguas arriba del segmento	COUNT_VF	Presiones
Distancia al primer segmento donde se localiza un vertido o un feedlot	Dist_P_seg	
Tipo de presión sncostrada en el segmento más cercano (D,I o F)	Presion_c	
Cantidad de vertidos domésticos e industriales aguas arriba del segmento	COUNT_V	
Distancia al primer segmento donde se localiza un vertido	Dist_V_seg	
Cantidad de feedlots aguas arriba del segmento	COUNT_F	
Distancia al primer segmento donde se localiza un feedlot	Dist_F_seg	

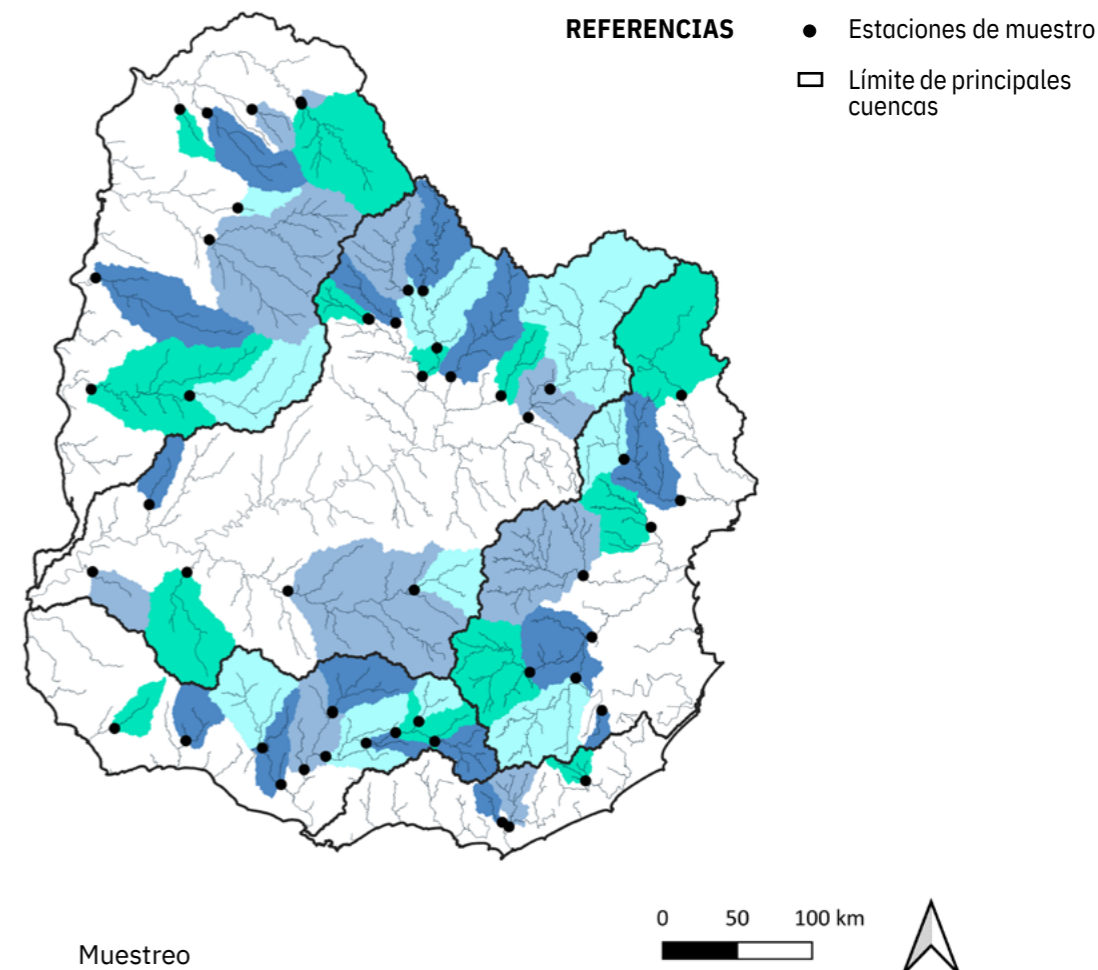
Se realizaron modelos para predecir algunos de esos IH independientemente por medio de las siguientes técnicas:

+ Regresión lineal múltiple (MLR, por sus siglas en inglés), que supone una relación lineal entre las variables predictoras y las variables respuesta mediante la estimación de los parámetros de cada variable predictora (S_M2_2).

+ Modelos aditivos generalizados (GAM, por sus siglas en inglés), que son modelos semi-paramétricos que relacionan la variable predictora y la dependiente a través de una función de enlace y estiman una función no paramétrica para cada predictora con el fin de adaptarla al comportamiento local de la función de regresión en varias regiones (S_M2_3).

> F_M2_1:

Ubicación de las estaciones de monitoreo de caudales y cuencas que abarcan.



+ Random Forest (RF), el cual comprende un conjunto de árboles de clasificación y regresión individuales (CART, por sus siglas en inglés). Los CART dividen el espacio dimensional definido por las predictoras en grupos lo más homogéneos posible basados en series de reglas binarias. El RF introduce una variación aleatoria en los CART mediante el crecimiento de un número definido de árboles con una muestra bootstrap de los datos de entrenamiento y una muestra aleatoria de las predictoras. La importancia de las variables predictoras se evalúa permutando aleatoriamente cada una de ellas y prediciendo la respuesta de las observaciones de la muestra bootstrap. La disminución del rendimiento de la predicción es la medida de la importancia de la variable original. Debido a la gran cantidad de variables ambientales disponibles, se aplicó el procedimiento de selección de variables VSURF, disponible como paquete de R ([S_M2_4](#)).

Con los IH calculados, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) y un análisis de redundancia (RDA) utilizando un conjunto de las variables de cuenca calculadas en la etapa anterior, haciendo previamente una matriz de correlación entre ellas.

Posteriormente, se procedió a una análisis de clasificación (cluster) considerando los 68 IH de los 73 calculados (no se consideraron los de frecuencia) ([T_M2_4](#)), probando dos métodos de partición: Partitioning Around Medoids (PAM) y k-means. Se utilizó una combinación de aplicaciones del paquete factoextra de R (visualización del gráfico del cluster, Silhouette y WSS) y los boxplots para definir el número óptimo de grupos de estaciones. Luego se generaron modelos RF para predecir las clases en cada caso, seleccionando las variables predictoras dentro del conjunto de variables ambientales disponibles en la base de datos construida previamente. Para dicha selección se tuvieron en cuenta los resultados de los análisis anteriores (PCA, RDA, modelos predictivos de IH) y se aplicó el procedimiento de selección de variables VSURF ([S_M2_5](#)).

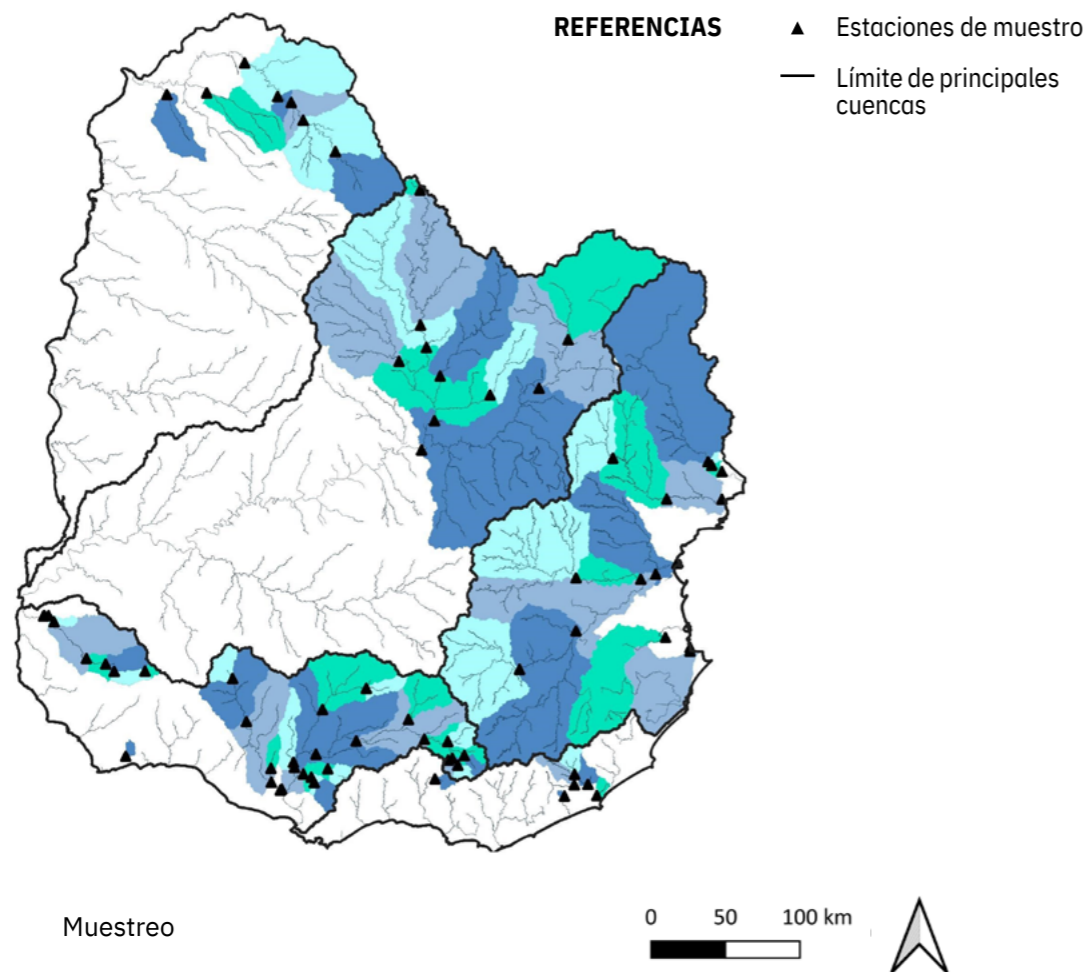
Calidad del agua

Se realizó una caracterización general de la calidad del agua utilizando inicialmente los siguientes atributos: Temperatura del agua (Tm), Conductividad (Cond) y concentraciones de Nitrógeno total (N) y Fósforo total (P). De todos los puntos con información disponible en el Observatorio Ambiental Nacional (OAN), se seleccionaron aquellos que: estaban ubicados en sistemas lóticos; no estaban aguas abajo de grandes represamientos; contaban con datos de al menos 3 años hidrológicos (abril-marzo) en el período considerado (2016-2020); disponían de al menos 3 datos por año en diferentes estaciones ([T_M3_1](#)).

Se realizó un mapa con todos los puntos utilizados para al menos una de las variables analizadas, por disponer de datos útiles (F_M3_1). A partir de la información contenida en los puntos seleccionados se calcularon, para cada uno de los parámetros, las condiciones medias estacionales para invierno (“Inv”) y para el período estacional de diciembre a marzo, que se llamó “verano” por motivos prácticos (“Ver”) ([D_M3_1](#)). El número de estaciones consideradas para cada variable fue distinto y estuvo en un rango de 52 a 61 ([T_M3_2](#)). Se generaron modelos RF, GAM y MLR para predecir valores (medianas) de las variables respuesta (Cond_Inv, Cond_Ver, N_Inv, N_Ver, P_Inv, P_Ver, Tm_Inv, Tm_Ver), seleccionando la combinación de variables predictoras que mostraron los mejores resultados ([S_M3_1](#)). Para comparar la performance de los modelos entre sí se aplicó la técnica Jackknife. Se realizaron las predicciones en el software R para el conjunto de segmentos que estaban dentro del rango interpolable (teniendo en cuenta las variables predictoras) y se generaron tablas con las predicciones para cada variable respuesta, según cada modelo. Dicha información se unió a la capa de segmentos en un SIG para realizar mapas para cada caso.

> F_M3_1:

Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad de agua y cuencas de drenaje que abarcan.



E: Red de actores involucrados en la construcción y gestión de las bases de datos

Se realizaron un ciclo de entrevistas semiestructuradas y talleres focalizados en el intercambio de resultados y capacitación de cuadros técnicos del MA, MGAP y OSE, vinculados temáticamente al proyecto, así como con grupos de investigación radicados en Montevideo (LATU, Facultad de Ciencias, Clemente Estable, ITU-Facultad de Arquitectura) y en el interior del país (CURE, Regional Norte, sedes Salto y Paysandú) a efectos de explorar las capacidades instaladas para incorporar nuevos atributos claves de calidad del agua e integridad ecosistémica (i.e bioindicadores, bioensayos). Estos talleres, que continuarán en un segundo ciclo durante el 2022, aportan bases técnicas para construir un sistema nacional integrado de monitoreo de curso de agua.



RESULTADOS

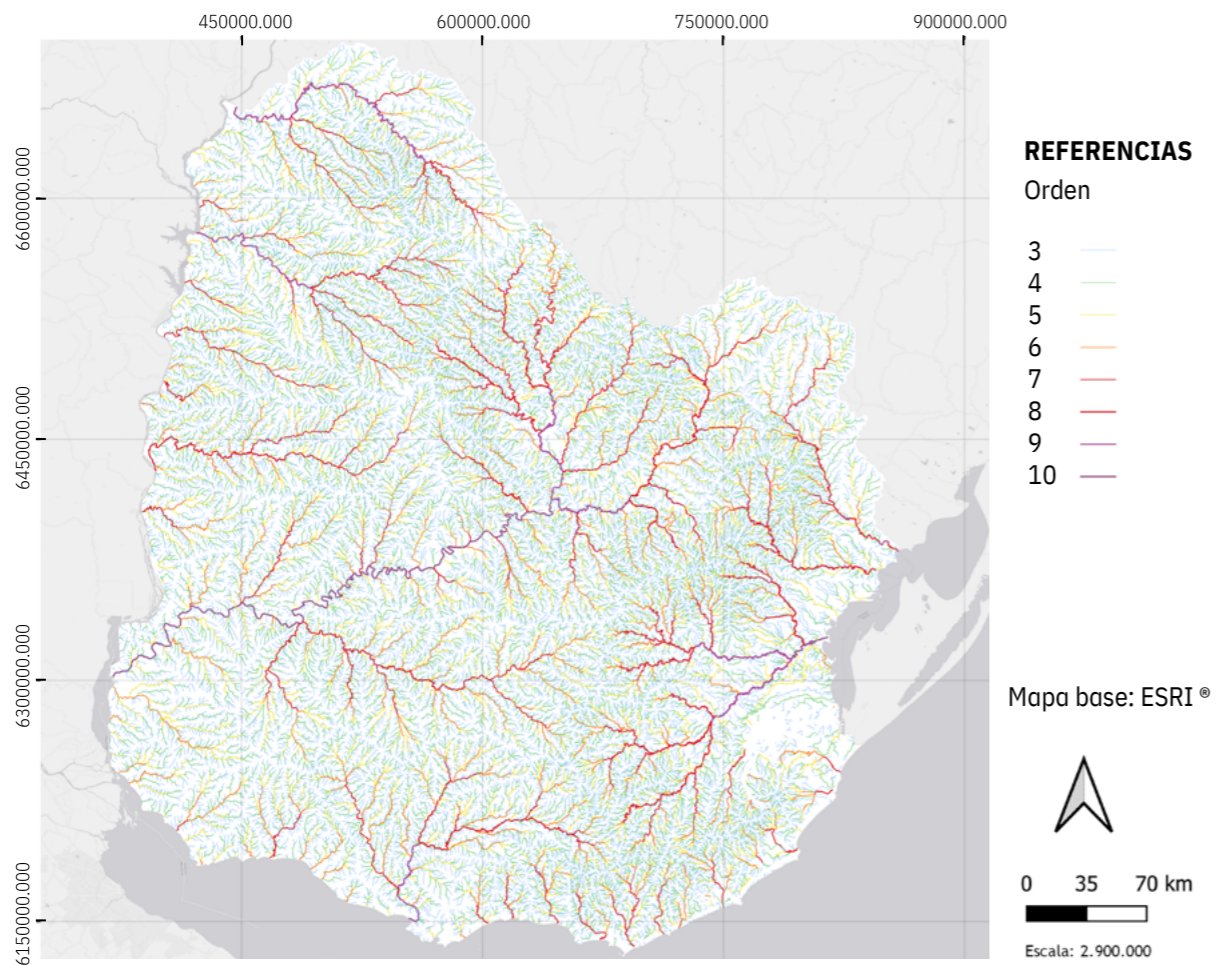
1- Red sintética generada, segmentación y variables asociadas

Toda la información espacial recopilada sobre variables ambientales, organizada por regiones, estará disponible para aquellas instituciones e investigadores interesados en el Observatorio Ambiental (MA). La red fluvial sintética generada por NetMap ([F_R1_1](#)) tiene cerca de 2 millones de segmentos, de 285m de longitud en promedio ([T_R1_1](#)). Las capas que resultaron del proceso de derivación de cuencas virtuales se presentan por región y por tipo de variable (ya que por su tamaño no es viable presentarlas en una sola capa), organizadas en carpetas y disponibles en Drive ([C_R1_2](#)). Debido a que

en algunas zonas, por ej. Laguna Merín o cuenca de río Negro, la salida de NetMap presentó problemas en la representación de la red fluvial, se decidió no considerar los segmentos de la red sintética de esas pequeñas zonas a la hora de hacer predicciones. Por otro lado, a todos los tramos de los cursos de Brasil se les sumó uno en la variable orden del curso (STRM_ORDER), con respecto a la salida de NetMap, para disminuir las diferencias generadas por las escalas de digitalización de las redes hidrográficas de Uruguay y Brasil utilizadas para crear la red sintética.

> **F_R1_1:**

Red fluvial sintética (de orden 3 en adelante). Mapa de la red fluvial sintética generada. Por razones de visualización se muestran sólo los cursos de orden 3 en adelante. Fuente: elaboración propia a partir de las capas generadas por el software Netmap ([C_R1_3](#)).



> **T_R1_1:**

Cantidad de segmentos de la red fluvial sintética y promedio de longitud

Región	Cantidad de segmentos sintéticos	Promedio de longitud de los segmentos (m)
Río de la Plata Este y Atlántica (RPeOA)	125499	271,7
Río de la Plata Oeste (RPo)	199921	327,5
Laguna Merín (LM)	388080	290,4
Río Uruguay (RU)	508290	249,1
Río Negro (RN)	729408	285,6
Total	1951198	284,86

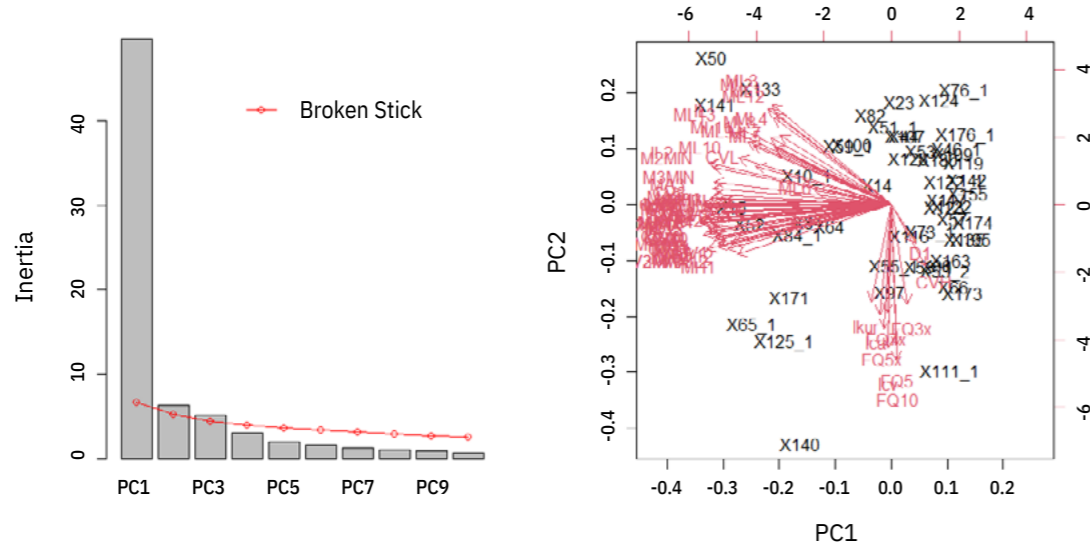
2- Atributos hidrológicos

Cálculo de índices hidrológicos (IH) y generación de modelos para predecir en segmentos sin observaciones

Se calcularon los IH no normalizados ([T_R2_1](#)) y normalizados ([T_R2_2](#)). El resultado del PCA con todos los IH no normalizados indicó que el Componente Principal (CP) 1 explica la mayor parte de la variabilidad de los IH calculados (65% de la varianza), y los tres primeros CP alcanzan a explicar un 80,5% de la varianza ([F_R2_1](#)). La mayoría de los IH de magnitud tienen una gran correlación con el CP1, mientras que los de frecuencia, lkur, lca, CVH y D1 están más correlacionados con el CP2 ([F_R2_1](#)).

> F_R2_1:

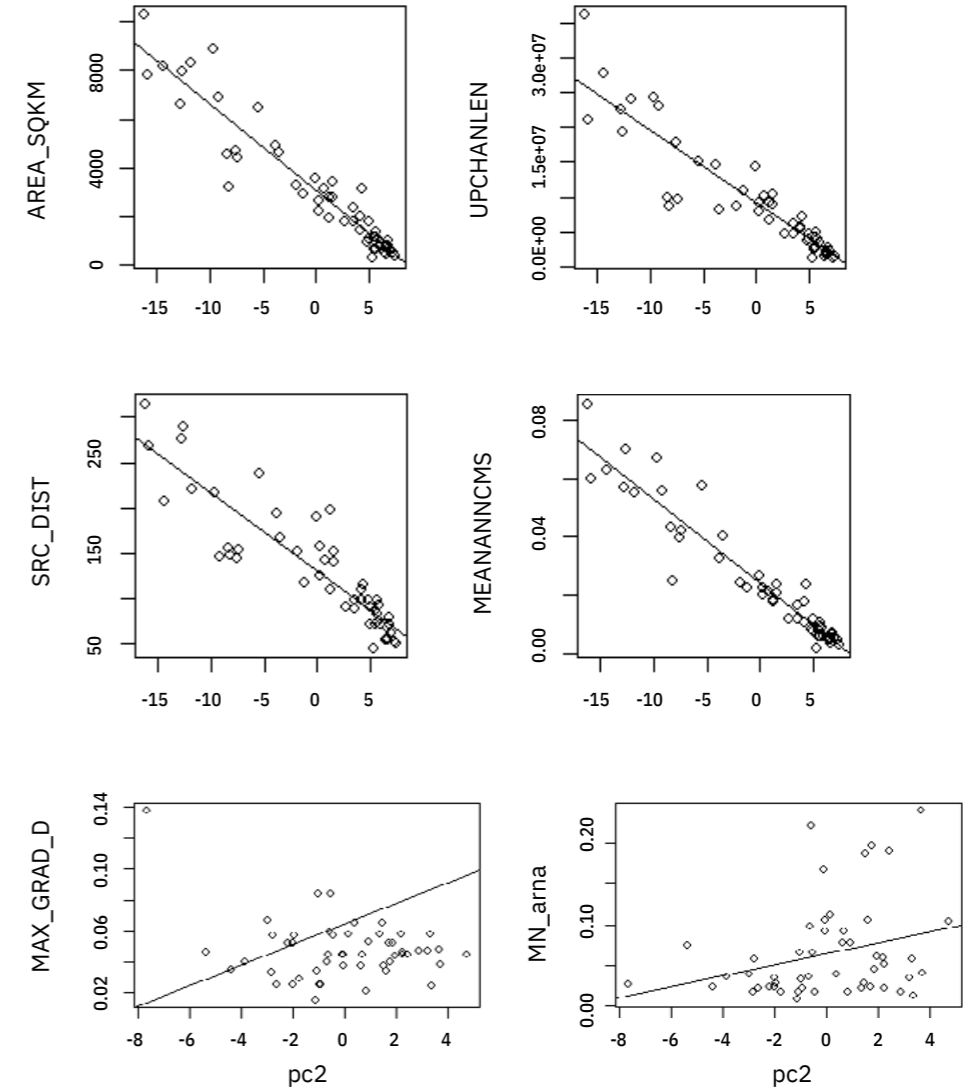
Resultados del Análisis de Componentes Principales (PCA), histograma y biplot a partir de los IH calculados.



Al correlacionar variables ambientales con los CP se encontró que el CP1 está fuertemente correlacionado (>0,9) con AREA_SQKM, UPCHANLEN, SRC_DIST y MEANANNCMS, las cuales, a su vez, están muy correlacionadas entre ellas (T_R2_3) y el CP2 se relaciona con las variables MAX_GRAD_D (0,25) y MN_arna (0,28) (F_R2_2).

> F_R2_2:

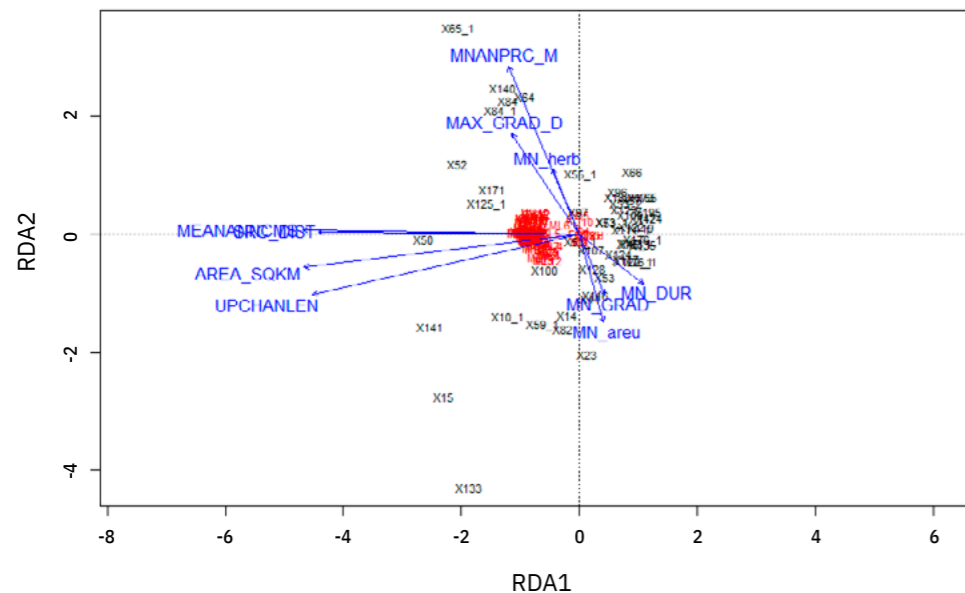
Relación entre los Componentes Principales 1 y 2 y variables ambientales.



El RDA se realizó con las siguientes variables ambientales: AREA_SQKM, UPCHANLEN, SRC_DIST, MEANANNCMS, MAX_GRAD_D, MNANPRC_M, MN_GRAD, MN_DUR, MN_au y MN_herb. En el gráfico obtenido se puede observar que el RDA1 está muy correlacionado con las primeras cuatro variables y que las otras cuatro están más relacionadas con el RDA2 (F_R2_3). La proporción de inercia constreñida fue de casi 73%.

> F_R2_3:

Triplot resultado del RDA con IH calculados y variables ambientales seleccionadas.



Los modelos para predecir IH independientes se hicieron para una selección de los IH no normalizados y los resultados fueron muy distintos según el grupo de IH considerado. Los IH de magnitud se predijeron con muy buena precisión en general con las tres técnicas utilizadas (RF, GAM y MLR), con la excepción de lkur, lca y CVH. En contraste, ninguna técnica fue capaz de desarrollar modelos precisos para índices hidrológicos de frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos (T_R2_4). Las variables que dieron mejores resultados

de Rsq (R cuadrado) en distintas combinaciones fueron, en orden de importancia un conjunto de topográficas (AREA_SQKM, CONF_DEN, UPCHANLEN, SRC_DIST, MN_GRAD, MAX_GRAD_D, LC elev), en segundo lugar climáticas (precipitación promedio anual o promedio de algunos meses y evapotranspiración), geología (MN_PER) y, en algunos casos aislados, de tipo y uso de suelo (MN_apdn, MN_herb).

> T_R2_4:

Resumen de los modelos realizados para predecir IH independientes. Para ver la tabla con las variables utilizadas en cada modelo tocar [aquí](#). Los caudales mensuales (MA) corresponde a diferentes meses del calendario hidrológico, (abril=1).

Grupo de IH	Índice hidrológico	Prom Rsq (RF)	Rsq (MLR)	Rsq (GAM)
(1) Magnitud de los caudales anuales y mensuales	I2	0,923	0,847	0,889
	lkur	0,010		
	lca	0,023		
	Q50	0,937		0,958
	MA4			0,842
	MA8			0,939
	MA10			0,848
	MA11			0,853
	MA1			0,846
	MA2			0,710
	MA3			0,858
	CV4			0,863
	CV8			0,911
	CV10			0,816
	CV11			0,769
	CV1			0,837
CV2			0,722	
CV3			0,801	



Grupo de IH	Índice hidrológico	Prom Rsq (RF)	Rsq (MLR)	Rsq (GAM)
(2) Magnitud y duración de los extremos anuales	ML13	0,560	0,681	0,681
	IL2	0,833		0,950
	MH13	0,836		0,811
	CVH	0,150		
	IH	0,928		0,933
	IH2	0,925	0,885	0,943
	M2MIN	0,745	0,808	0,902
	M2MAX	0,892	0,867	0,950
	V2MAX	0,812	0,750	0,918
(3) Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	M3MAX	0,920	0,869	0,925
	FQ5	0,214		
	FQ10	0,121		
	FQ5x	0,032		

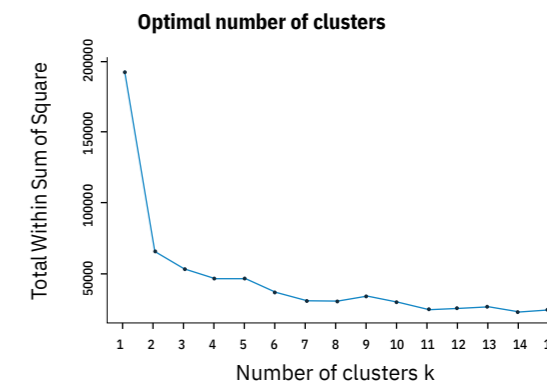
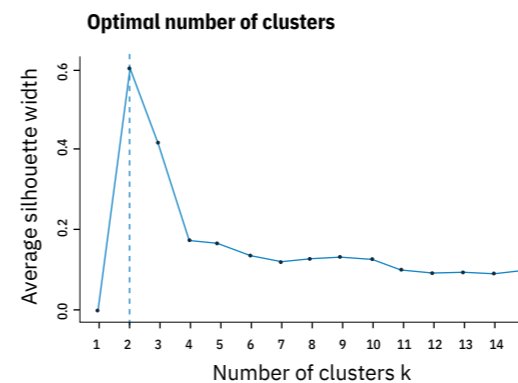
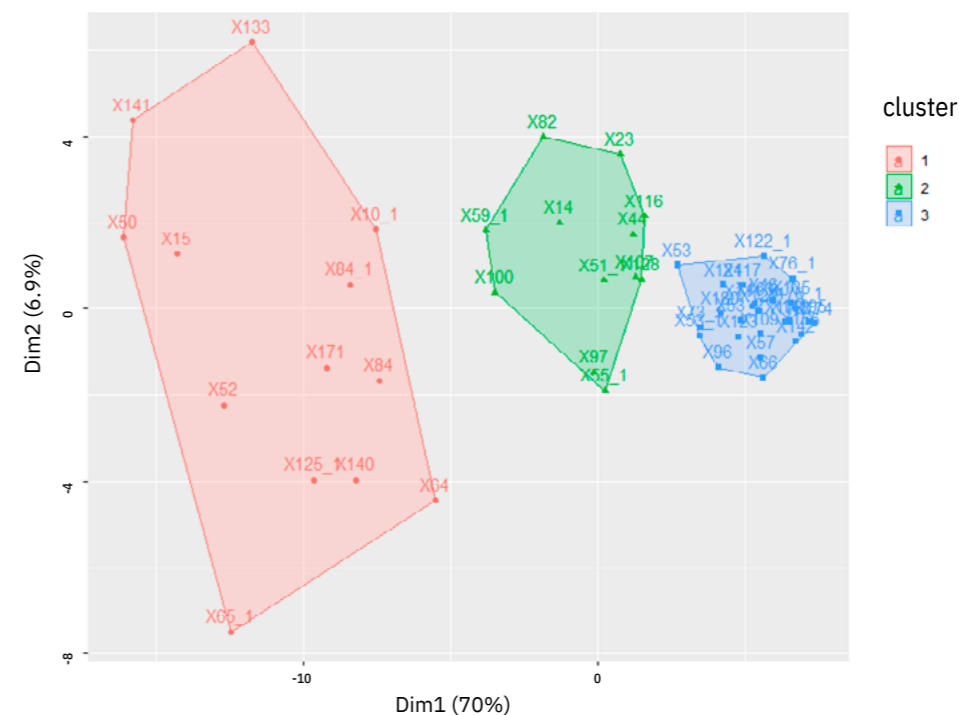
Clasificación cluster y modelo RF para predecir las clases hidrológicas generadas.

Mediante el análisis cluster por métodos de partición PAM y k-means, se identificaron tres grandes grupos de estaciones de muestreo (F_R2_4 y F_R2_5), que por medio de los dos métodos se agruparon casi de la misma forma (con diferencia de un solo punto).

La ubicación en el espacio no muestra una regionalización de los grupos (F_R2_6). Dichos grupos presentan diferencias importantes en atributos como AREA_SQKM y UPCHALEN (boxplots, F_R2_7). El resultado del VSURF indicó que el conjunto óptimo de atributos de la cuenca que genera el modelo con menos tasa de error para clasificar los 3 grupos de estaciones hidrológicas conformados está compuesto por las variables UPCHANLEN, SRC_DIST y MAX_GRAD_D, en ese orden de importancia. La tasa de error obtenida fue de 7,84%.

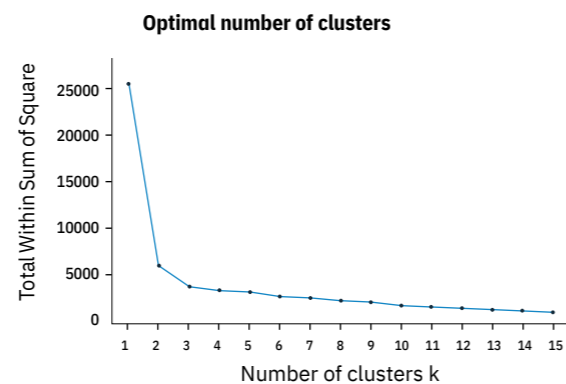
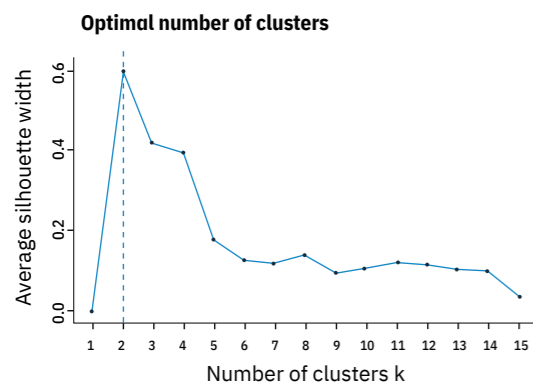
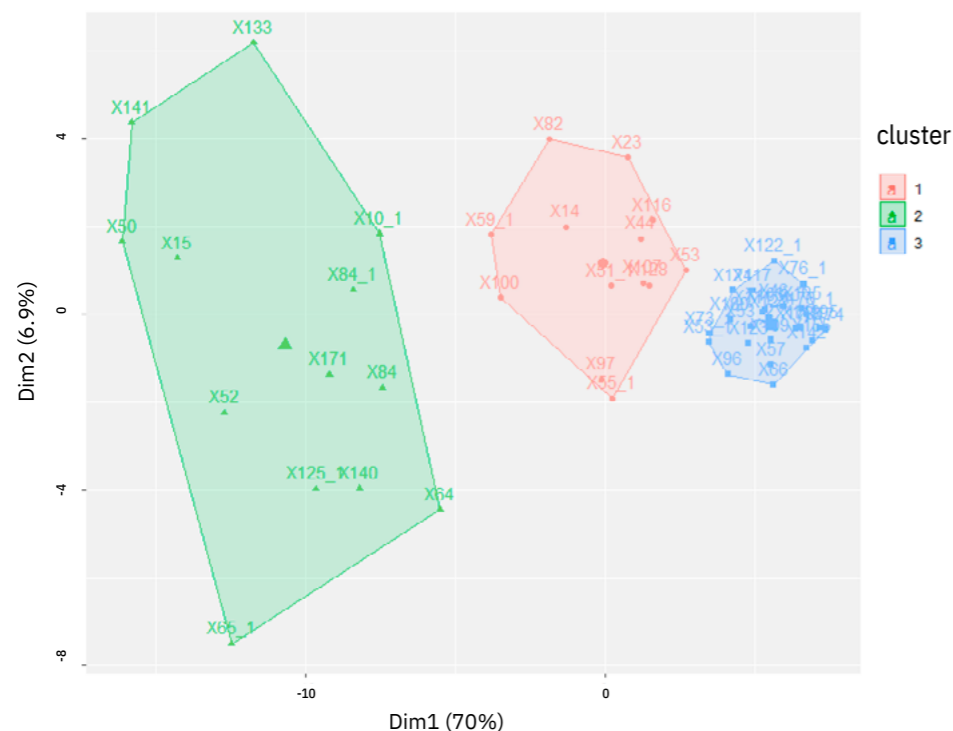
> F_R2_4:

Resultados del análisis de agrupamiento (método cluster PAM). Las estaciones de muestreo se agrupan en 3 clases.



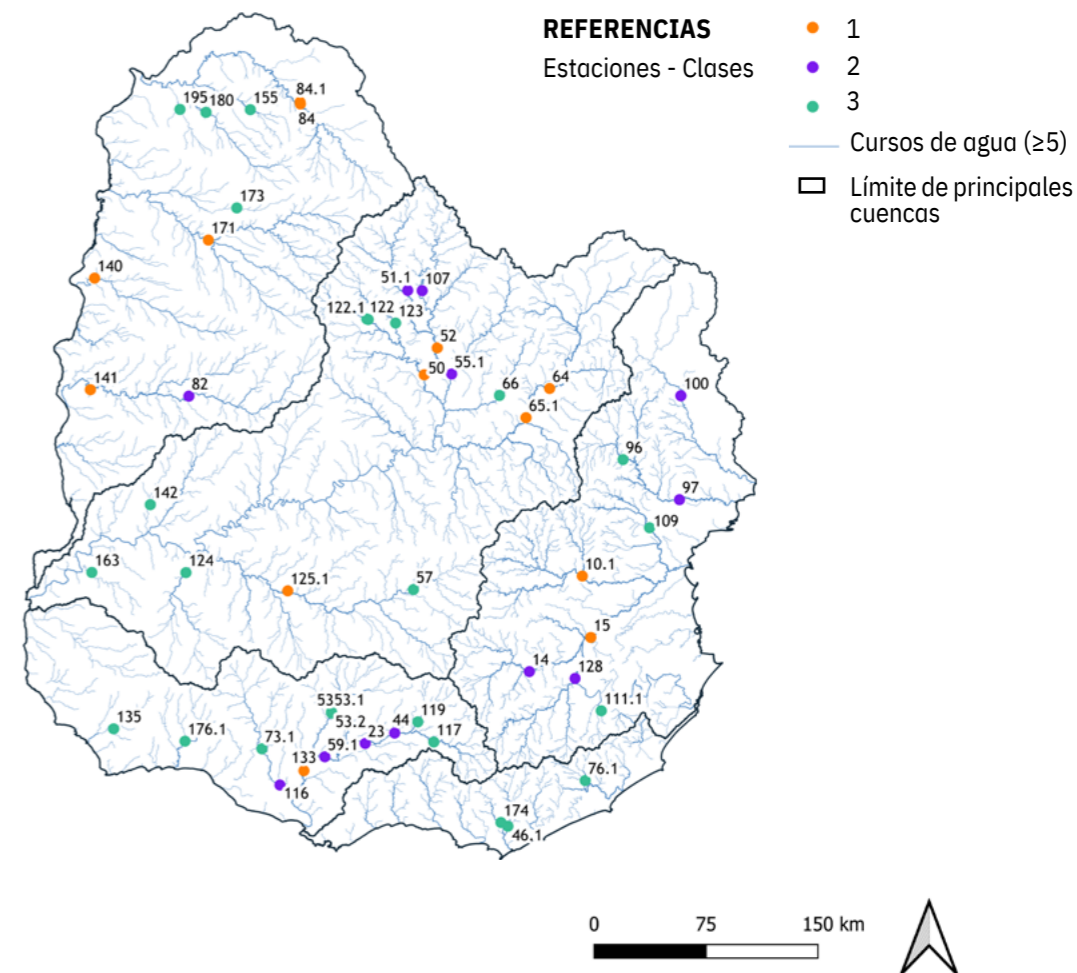
> F_R2_5:

Resultados del análisis de agrupamiento (método cluster k-means). Las estaciones de muestreo se agrupan en 3 clases.



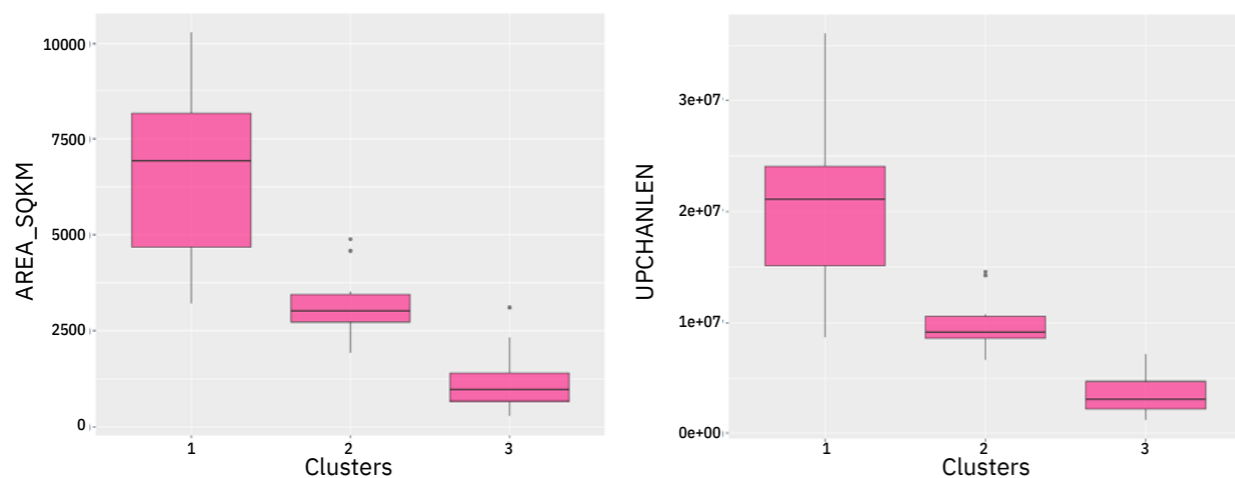
> F_R2_6:

Mapa con la ubicación de las estaciones de registro de niveles hidrométricos y caudales con el código usado por DINAGUA y la clase asignada en el análisis de clasificación (cluster PAM de 3 clases).



> F_R2_7:

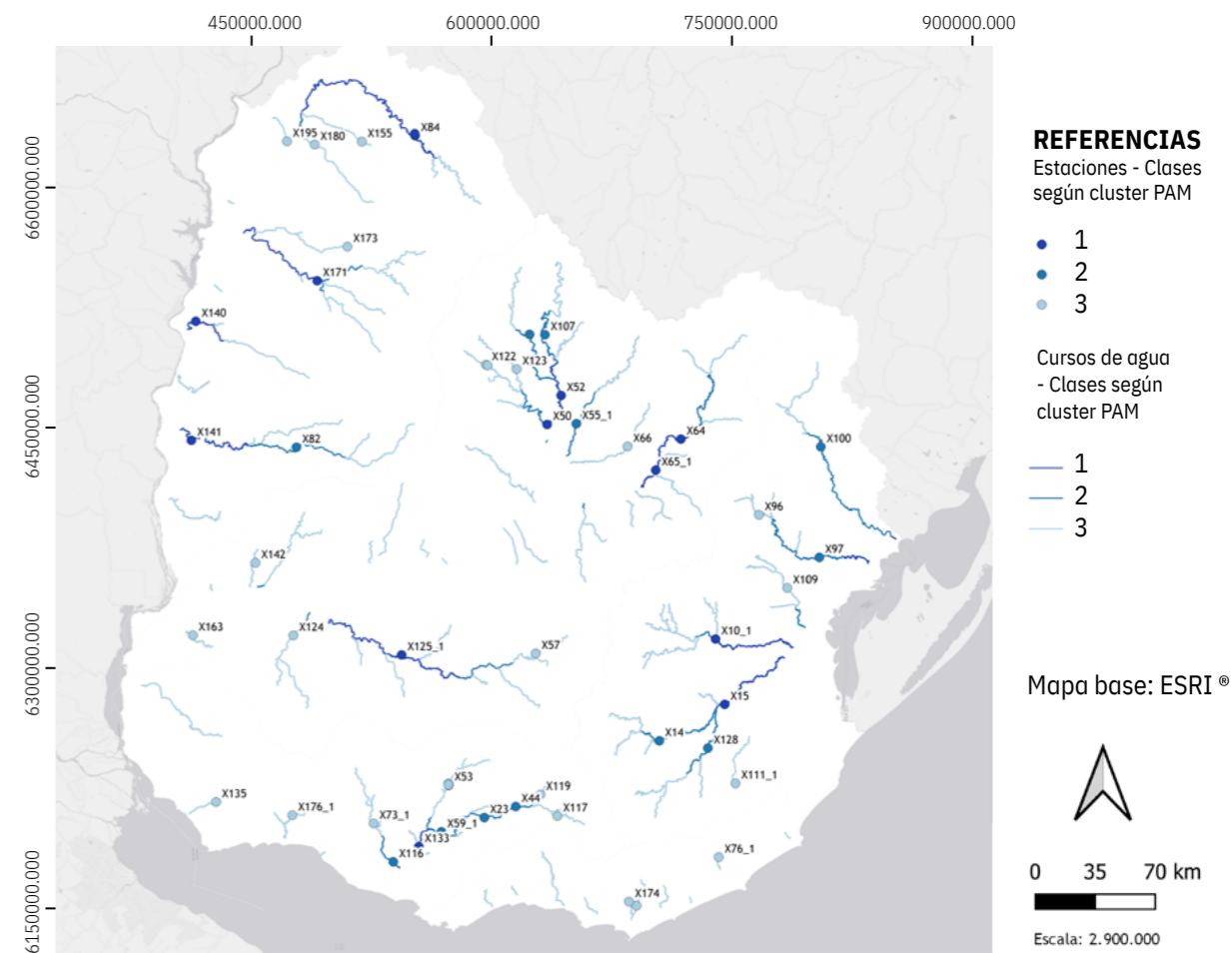
Boxplots de la distribución de AREA_SQKM y UPCHANLEN en los 3 grupos generados.



A efectos de predecir a cuál de los tres grupos previamente identificados pertenecen puntos del territorio donde no se cuenta con información hidrológica, se recurrió al modelo RF generado. La interpolación se realizó en 15714 tramos (de un total de casi 2 millones de tramos) que estaban dentro de los rangos de las variables predictoras seleccionadas (F_R2_8). En síntesis, cada grupo comparte una “firma hidrológica” que se define por un conjunto de atributos hidrológicos que es factible de ser predicha a partir de un conjunto acotado de características de cada cuenca de drenaje.

> F_R2_8:

Mapa con la clasificación predicha por el modelo RF para los tramos que están en el dominio de interpolación (dentro del rango las variables ambientales de la base de datos).



Desde el punto de vista de la “firma hidrológica”, los factores estructurales como el tamaño de la cuenca, topografía, características de la red de drenaje, explican la casi totalidad de las diferencias espaciales en la actual base de datos existente en el país. Contrariamente a lo esperado, el gradiente Sur-Norte del régimen de precipitaciones y evapotranspiración tiene una incidencia menor a lo esperado desde el punto de vista estadístico. Además, los diferentes usos del suelo y presiones antrópicas consideradas no presentan una contribución relevante para comprender las diferencias espaciales en la firma hidrológica del conjunto de estaciones de muestreo actualmente disponible. Es probable que los resultados estén condicionados por la marcha mensual de la base de datos. Es importante recordar que la base de datos construida no incluyó estaciones de muestreos que están afectadas por represas importantes aguas arriba, factor que podría modificar sustancialmente la firma hidrológica.

En términos operativos, existe una buena capacidad de interpolar atributos hidrológicos en curso de agua no monitoreados a partir de un conjunto reducido de características de las cuencas de drenaje. Por último, es importante destacar que un procedimiento similar se puede utilizar para predecir IH independientes de particular interés (por ejemplo algunos IH de magnitud) con los modelos generados (MLR, GAM o RF) en la etapa anterior.

Una debilidad importante de la base de datos de atributos hidrológicos es la ausencia de información de cursos de órdenes 1 a 5, así como la ausencia de registro en amplias áreas del país. Los resultados obtenidos permiten identificar cómo se puede fortalecer espacialmente la red de monitoreo mediante la adición de nuevas estaciones de registro. Por otra parte, los sistemas automatizados de registro de niveles hidrométricos pueden permitir avanzar rápidamente en análisis que contemplan frecuencias de observación diaria.

3- Calidad del agua

Los resultados de los modelos para predecir variables de calidad de agua en términos de R_{sq} se presentan en la tabla (T_R3_1). En la mayoría de

los casos los modelos de tipo GAM obtuvieron mejores valores de R_{sq} , menos para el caso de N_MedianaVer, donde el modelo MLR dio un mejor resultado. Las combinaciones de variables que resultaron en los modelos más precisos se presentan en tablas. En el caso de los modelos RF el orden de las variables predictoras se presenta según el nivel de importancia de cada una según el índice IncNodePurity (T_R3_2) y el signo de la relación se muestra en verde (positiva), amarillo (negativa) o blanca (en parte del rango negativa y en parte positiva). En otra tabla se presentan las variables predictoras seleccionadas en los modelos GAM y se indica si las mismas fueron suavizadas o no (s) (T_R3_3).

En el caso de los nutrientes en agua, es posible predecir las concentraciones de P total de forma muy satisfactoria y satisfactoria en el caso del N total, a partir de un conjunto reducido de atributos de la cuenca que comprenden combinaciones de factores estructurales de la cuenca (topografía, tamaño, precipitaciones), tipos y usos del suelo (campo natural, agricultura, entre otros) y presiones puntuales (vertidos). Es interesante destacar que la importancia de los factores tiene diferencias importantes entre los dos períodos del año considerados, patrón esperado para el caso de Uruguay de acuerdo con las importantes diferencias en el régimen de caudales entre invierno y verano, así como por los ciclos productivos asociados. Los atributos de la cuenca que explican una parte muy considerable de la heterogeneidad espacial de los niveles de nutrientes en la escala nacional presentan relaciones causales conocidas. Sin embargo, en las variables predictoras pueden existir múltiples mecanismos operando de forma simultánea, tanto de forma directa como indirecta. A modo de ejemplo, las cuencas con suelos profundos presentan mayores niveles de nitrógeno y fósforo en los cursos de agua de forma natural por los intercambios entre los sistemas terrestres y acuáticos asociados a la escorrentía superficial y subterránea. Simultáneamente, sobre estos suelos se desarrolla la agricultura de secano que contribuye a los niveles de nutrientes mediante la fertilización. En este caso, estos dos factores (tipo y uso del suelo) actúan de forma aditiva.

> T_R3_1:

Resultado de los modelos RF, GAM y MLR para variables de calidad del agua.

Variable	Modelo								
	Random Forest			GAM			MLR		
	Prom Rsq	corr	RMSE	Rsq	corr	RMSE	Pseu-doRsq	cor	RMSE
Cond_MedianaInv	0,84	0,94	29,22	0,87	0,90	35,83			
Cond_MedianaVer	0,79	0,93	50,22	0,89	0,94	47,33			
N_MedianaInv	0,61	0,88	0,30	0,67	0,73	0,28			
N_MedianaVer	0,52	0,88	0,20	0,68	0,77	0,26	0,84	0,66	0,31
P_MedianaInv	0,80	0,96	45,99	0,89	0,92	59,03			
P_MedianaVer	0,72	0,89	92,06	0,83	0,88	96,06			
T_MedianaInv	0,70	0,88	0,47	0,86	0,93	0,34			
T_MedianaVer	0,49	0,93	0,55	0,70	0,78	0,74			
	Jacknife								
	Adj.r2	RMSE	RMSD	Adj.r2	RMSE	RMSD	Adj.r2	RMSE	RMSD
Cond_MedianaInv	0,82	47,61	45,91	0,68	64,30	62,58	0,74	57,55	56,02
Cond_MedianaVer	0,77	89,12	86,74	0,71	101,94	97,37	0,66	108,83	103,94
N_MedianaInv	0,58	0,53	0,51	0,03	0,81	0,78	0,20	0,73	0,70
N_MedianaVer	0,48	0,39	0,38	0,47	0,39	0,38	0,54	0,37	0,35
P_MedianaInv	0,82	87,26	86,50	0,81	88,45	86,91			
P_MedianaVer	0,72	147,24	145,92	0,73	145,09	139,81			
T_MedianaInv	0,67	0,74	0,72	0,20	1,14	1,11	0,47	0,93	0,91
T_MedianaVer	0,46	1,16	1,12	0,49	1,13	1,10	0,12	1,48	1,44

> T_R3_2:

Resultado de modelos RF, mostrando el orden de importancia de variables predictoras. Verde contribución positiva, amarillo negativa.

Modelo	Prom Rsq	Predictoras (Orden según índice IncNodePurity)					
Cond_MedianaInv	0,84	MN_agri	MN_psup	MNANPRC_M	MN_GRAD	MN_tmyr	
Cond_MedianaVer	0,79	MN_ppro	MNANPRC_M	MN_psup	MN_tmyr		
N_MedianaInv	0,61	MN_agri	MN_herb	CONF_DEN	MN_apdn	BC_arna	
N_MedianaVer	0,52	MN_herb	BC_herbBC_arna	MN_apdn	BC_arna	MN_edif	
P_MedianaInv	0,82	MN_agri	BC_herb	MN_GRAD	MNANPRC_M	MN_edif	Dist_P_Seg
P_MedianaVer	0,72	MN_elev	MNANPRC_M				
T_MedianaInv	0,68	MEANAN-NCMS	MN_tmyr	BC_areu			
T_MedianaVer	0,50	MN_etyr	CHAN_DEN	AREA_SQKM	AZIMTH_DEG	MN_herb	
		Relación:	Positiva	Negativa	Positiva y negativa		

> T_R3_3:

Resultado de modelos GAM, mostrando la combinación de variables predictoras.

GAM	Rsq	Variables predictoras
Cond_MedianaVer	0,891	s(MN_ppro)+s(MN_agri)+s(MN_tmyr)+s(SRC_DIST)+MN_elev+s(MNANPRC_M)
Cond_MedianaInv	0,868	s(MN_agri)+s(MNANPRC_M)+s(MN_elev)+SRC_DIST
N_MedianaVer	0,668	MN_agri+s(MN_apdn)+MN_edif+MAX_GRAD_D+s(BC_herb)
N_MedianaInv	0,682	s(MN_agri)+s(CONF_DEN)+MN_edif+MN_arbu+s(MN_apdn)
P_MedianaVer	0,833	MNANPRC_M+s(MN_agri)+s(MN_elev)+COUNT_F+s(COUNT_V)
P_MedianaInv	0,896	s(MN_agri)+s(MNANPRC_M)+Presion_c
T_MedianaVer	0,7	s(AZIMTH_DEG)+s(CHAN_DEN)+s(MN_herb)+s(BC_areu)
T_MedianaInv	0,86	s(BC_areu) + s(MNANPRC_M) + s(SRC_DIST) + s(MN_herb)

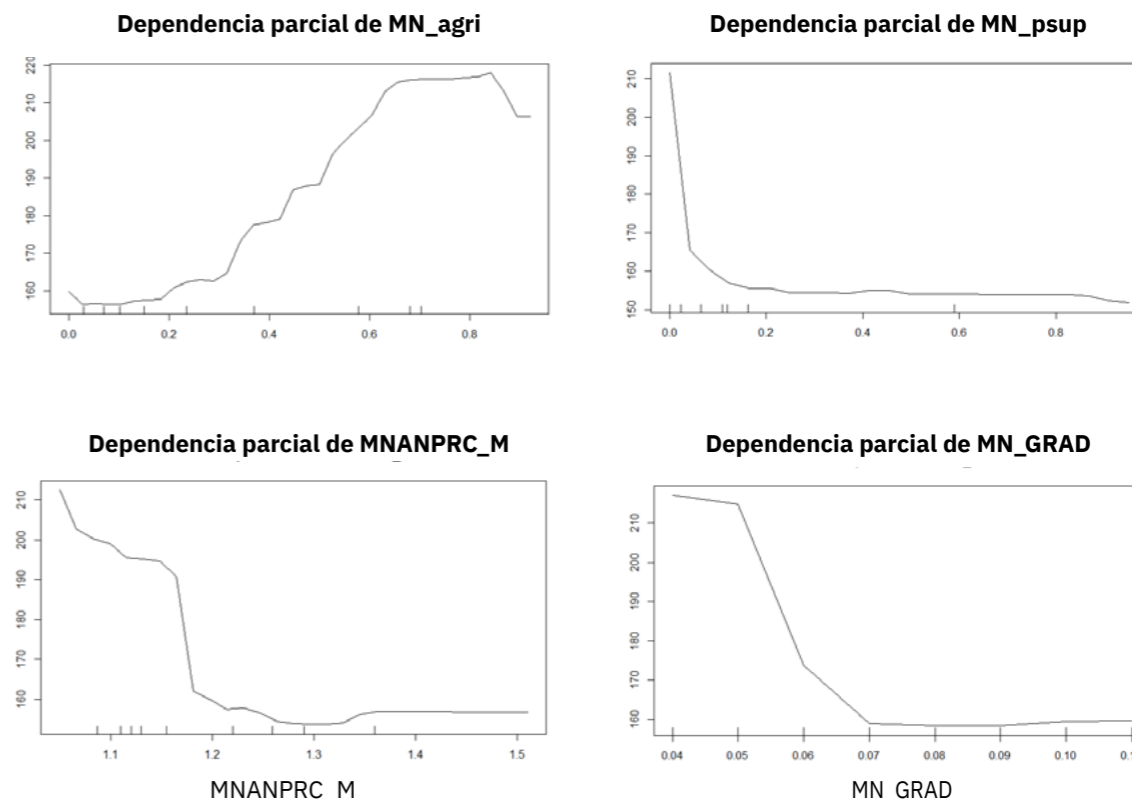
En el caso de la temperatura del agua se identificaron los siguientes atributos claves de las cuencas de drenaje para explicar la heterogeneidad espacial observada y predecir para los tramos que carecen de estaciones de muestreo: orientación del curso, densidad del canal, porcentaje de cobertura de herbáceas en la cuenca, porcentaje de forestación de Eucalyptus en el buffer de 200 m a lo largo del curso aguas arriba, precipitación promedio anual en la cuenca y temperatura del aire promedio anual en la cuenca. En el caso de la conductividad, las variables predictoras claves fueron los tipos de suelo (porcentaje de suelos profundos y/o superficiales en la cuenca), porcentaje de agricultura en la cuenca, precipitación promedio anual y temperatura del aire, elevación y gradiente promedio de la cuenca y distancia a la fuente.

En el caso de los modelos RF se utilizó un enfoque basado en umbrales para visualizar las funciones ajustadas utilizando gráficas de dependencia parcial, que indican el efecto de cada variable predictora sobre la de respuesta, después de tener en cuenta el efecto promedio de todos los demás predictores en el modelo. Aunque los gráficos no son una representación perfecta de los efectos producidos por cada variable, proporcionan una base útil para comprender la relación entre la variable respuesta y la predictora (F_R3_1 a F_R3_8).

Las predicciones a toda la red de tramos fluviales en los que fue posible hacer la interpolación se realizaron por variable y por modelo, dando como resultado 22 tablas ([T_R3_4](#)) con las que se elaboraron los mapas para cada variable (F_R3_9 a F_R3_30). A diferencia de los atributos hidrológicos, en la calidad de agua se observan diferencias regionales condicionadas por controles naturales y usos principales del suelo.

> F_R3_1:

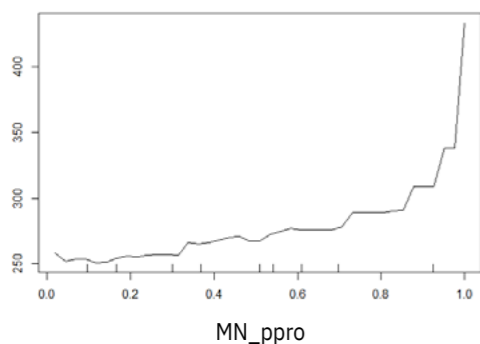
Gráficas de dependencia parcial que muestran las funciones ajustadas de las 4 variables predictoras más importantes de la mediana de la Conductividad de invierno.



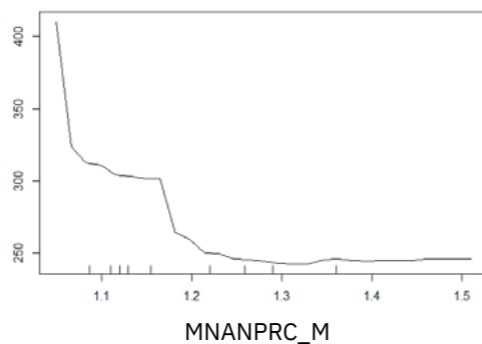
> **F_R3_2:**

Gráficas de dependencia parcial que muestran las funciones ajustadas de las 4 variables predictoras de la mediana de la Conductividad de verano.

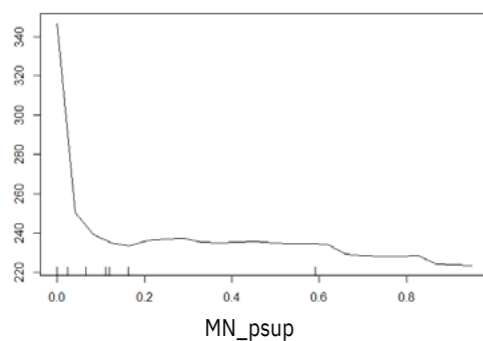
Dependencia parcial de MN_ppro



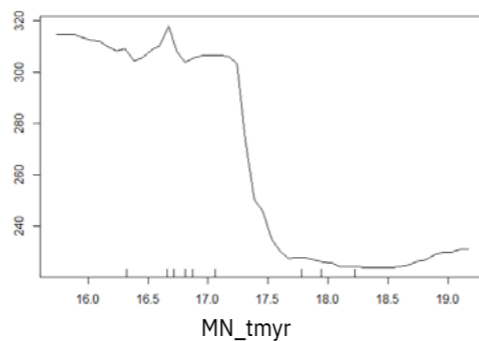
Dependencia parcial de MNANPRC_M



Dependencia parcial de MN_psup



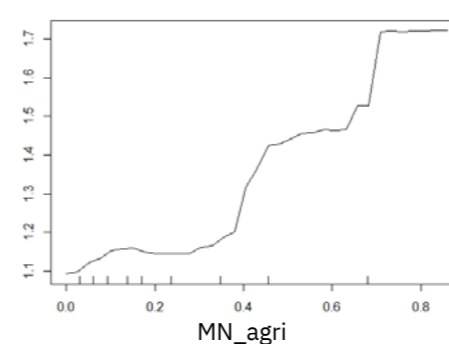
Dependencia parcial de MN_tmyr



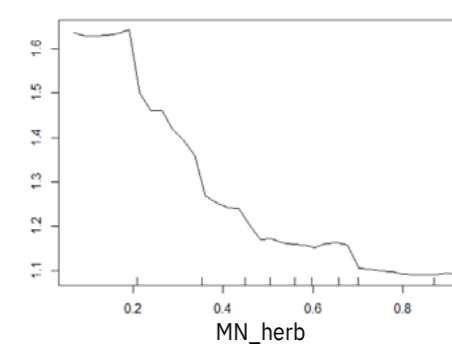
> **F_R3_3:**

Gráficas de dependencia parcial que muestran las funciones ajustadas de las 4 variables predictoras más importantes de la mediana la concentración de N de invierno.

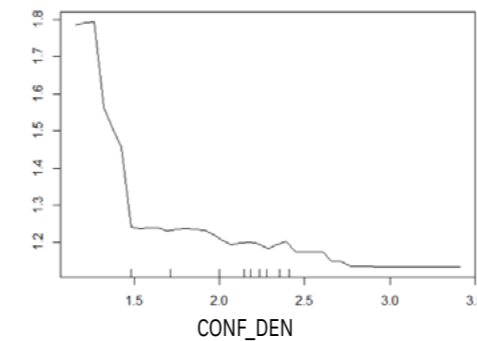
Dependencia parcial de MN_agri



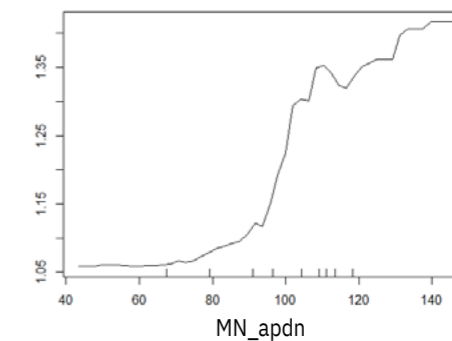
Dependencia parcial de MN_herb



Dependencia parcial de CONF_DEN

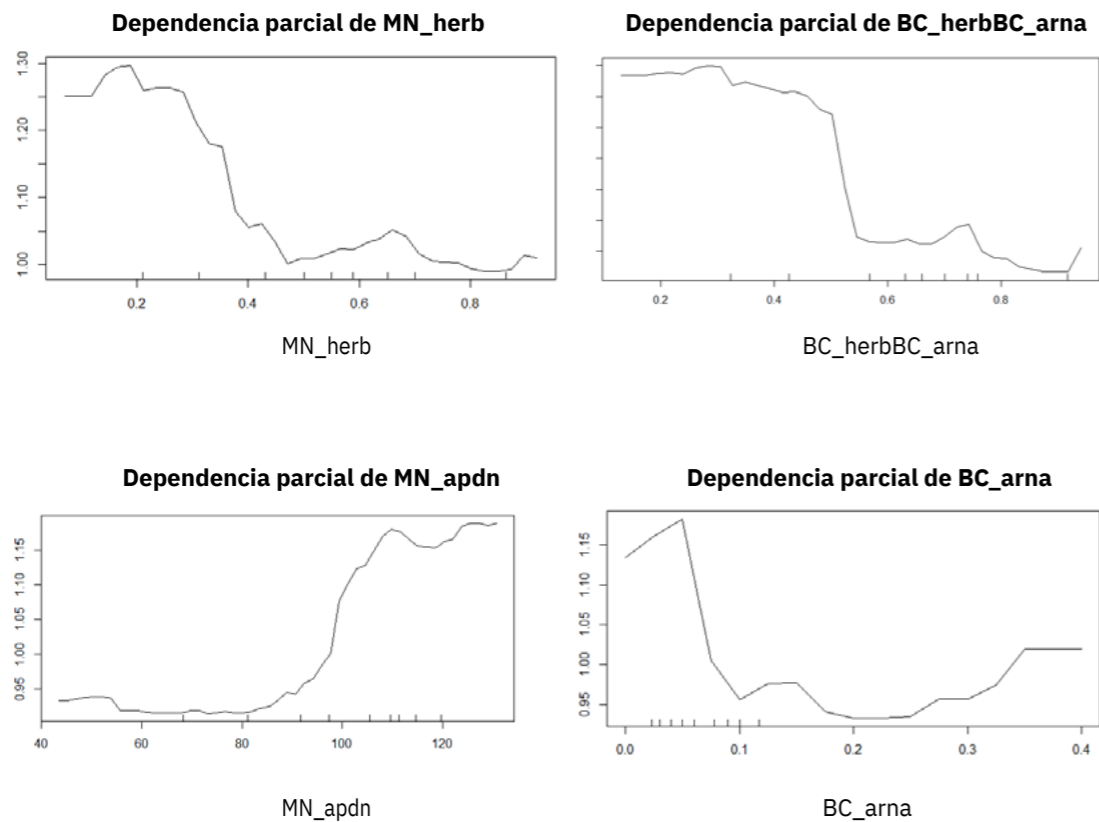


Dependencia parcial de MN_apdn



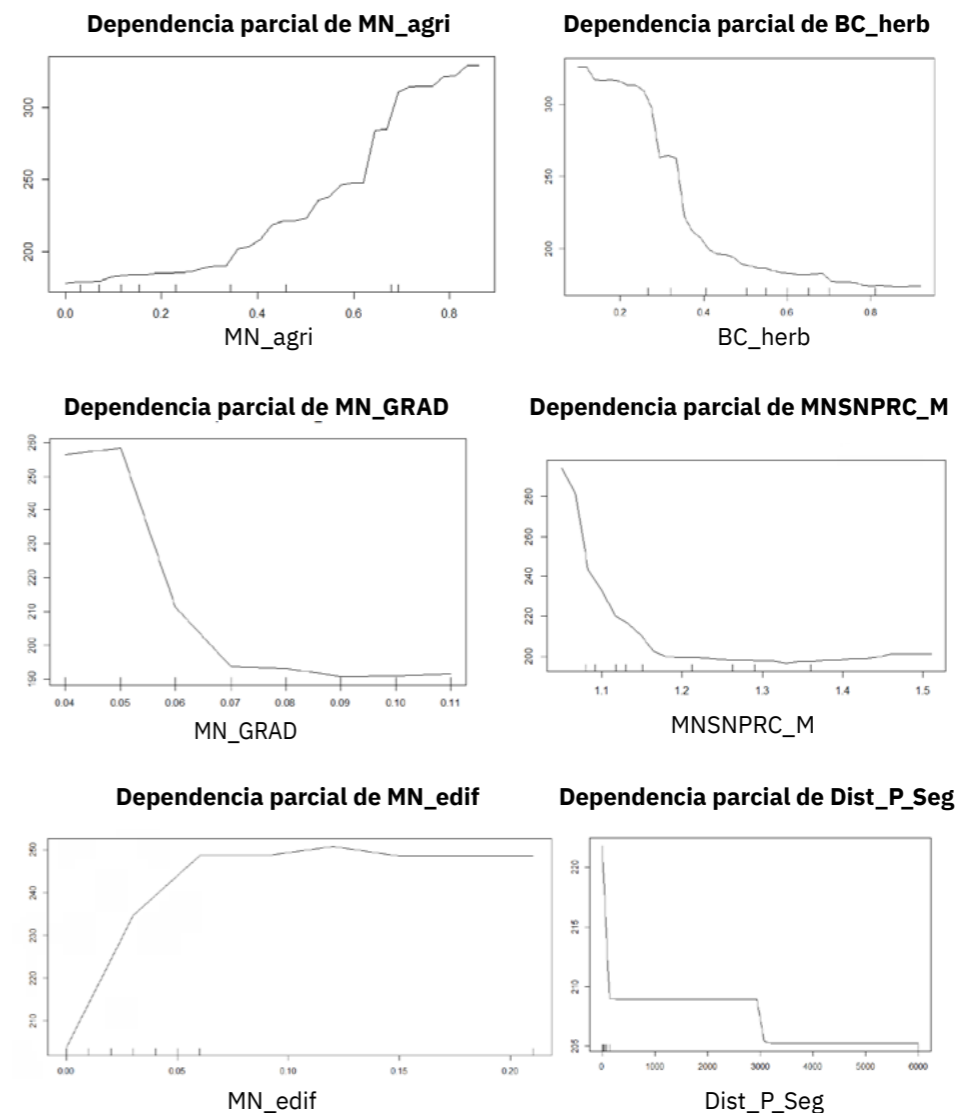
> F_R3_4:

Gráficas de dependencia parcial que muestran las funciones ajustadas de las 4 variables predictoras más importantes de la mediana la concentración de N de verano.



> F_R3_5:

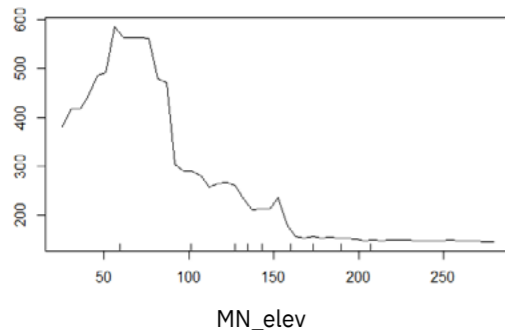
Gráficas de dependencia parcial que muestran las funciones ajustadas de las 6 variables predictoras de la mediana la concentración de P de invierno.



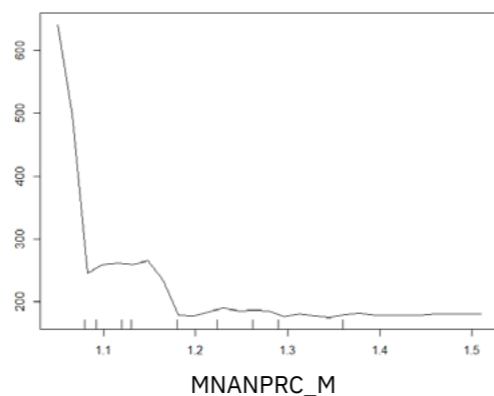
> **F_R3_6:**

Gráficas de dependencia parcial que muestran las funciones ajustadas de las 2 variables predictoras de la mediana la concentración de P de verano.

Dependencia parcial de MN_elev



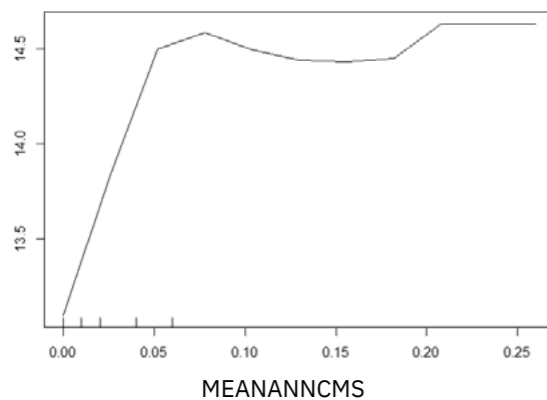
Dependencia parcial de MNANPRC_M



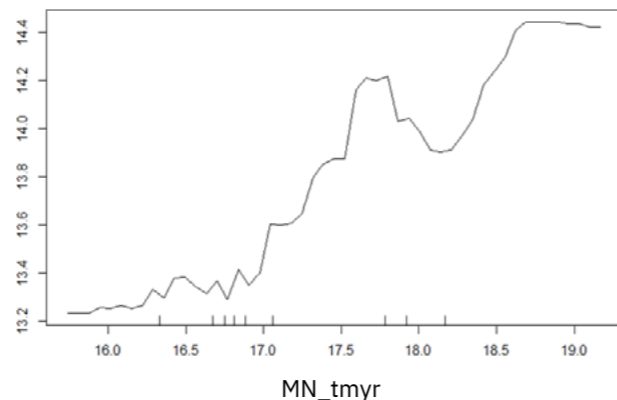
> **F_R3_7:**

Gráficas de dependencia parcial que muestran las funciones ajustadas de las 3 variables predictoras de la mediana la temperatura del agua de invierno.

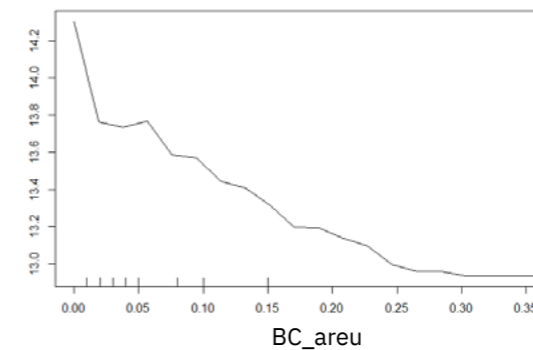
Dependencia parcial de MEANANNCMS



Dependencia parcial de MN_tmyr



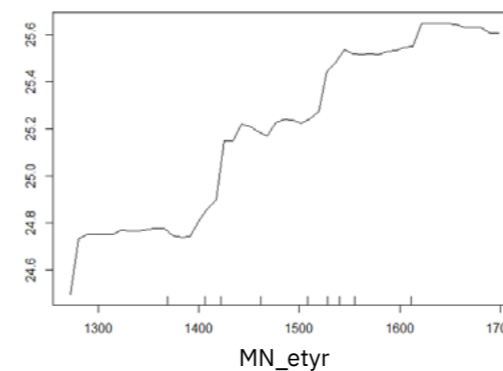
Dependencia parcial de BC_areu



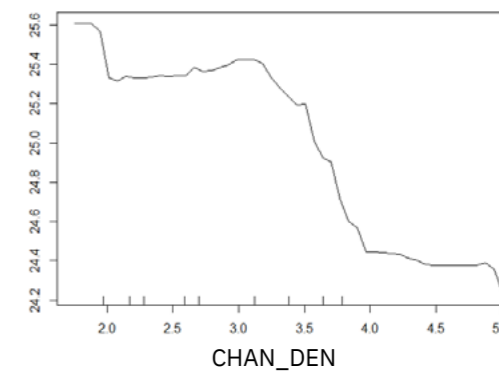
> **F_R3_8:**

Gráficas de dependencia parcial que muestran las funciones ajustadas de las 5 variables predictoras de la mediana la temperatura del agua de verano.

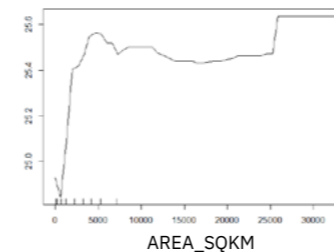
Dependencia parcial de MN_etyr



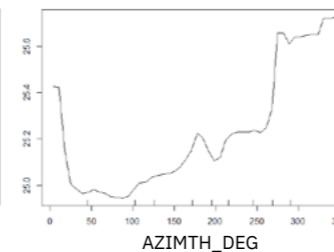
Dependencia parcial de CHAN_DEN



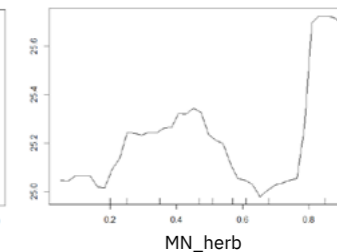
Dependencia parcial de AREA_SQKM



Dependencia parcial de AZIMTH_DEG

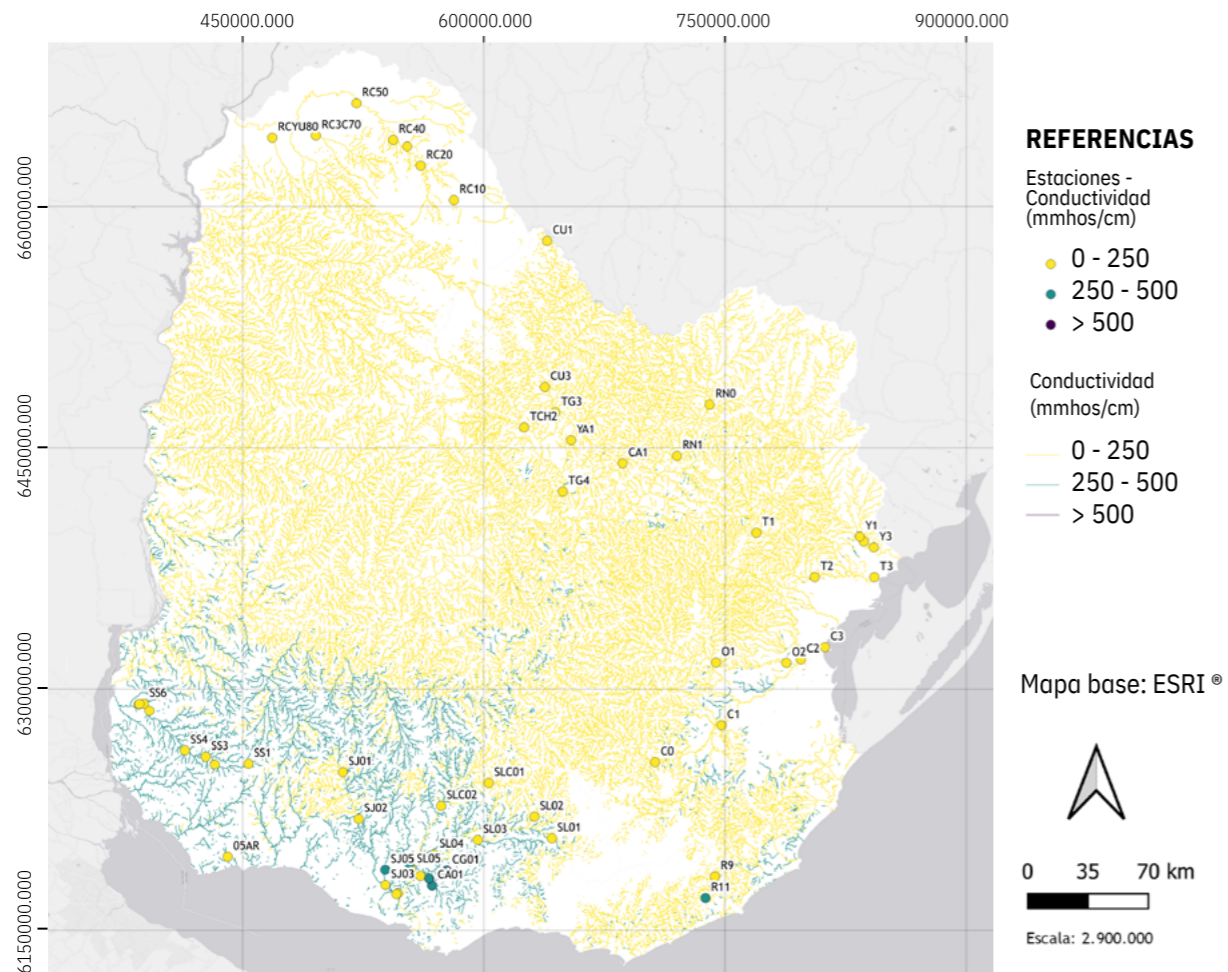


Dependencia parcial de MN_herb



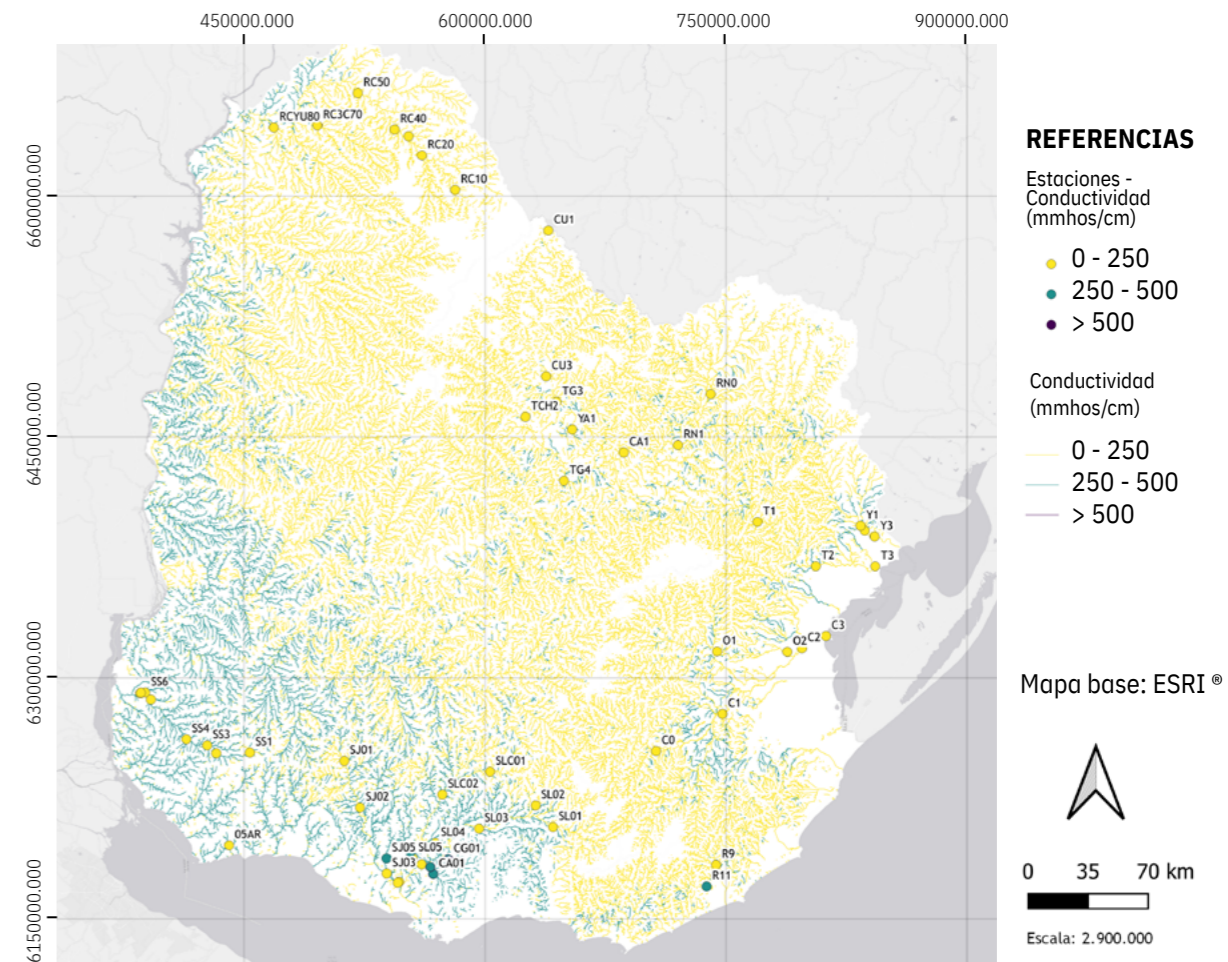
> F_R3_9:

Mapa de predicciones de mediana de la conductividad de invierno realizadas a través del modelo RF para los tramos en el dominio de interpolación.



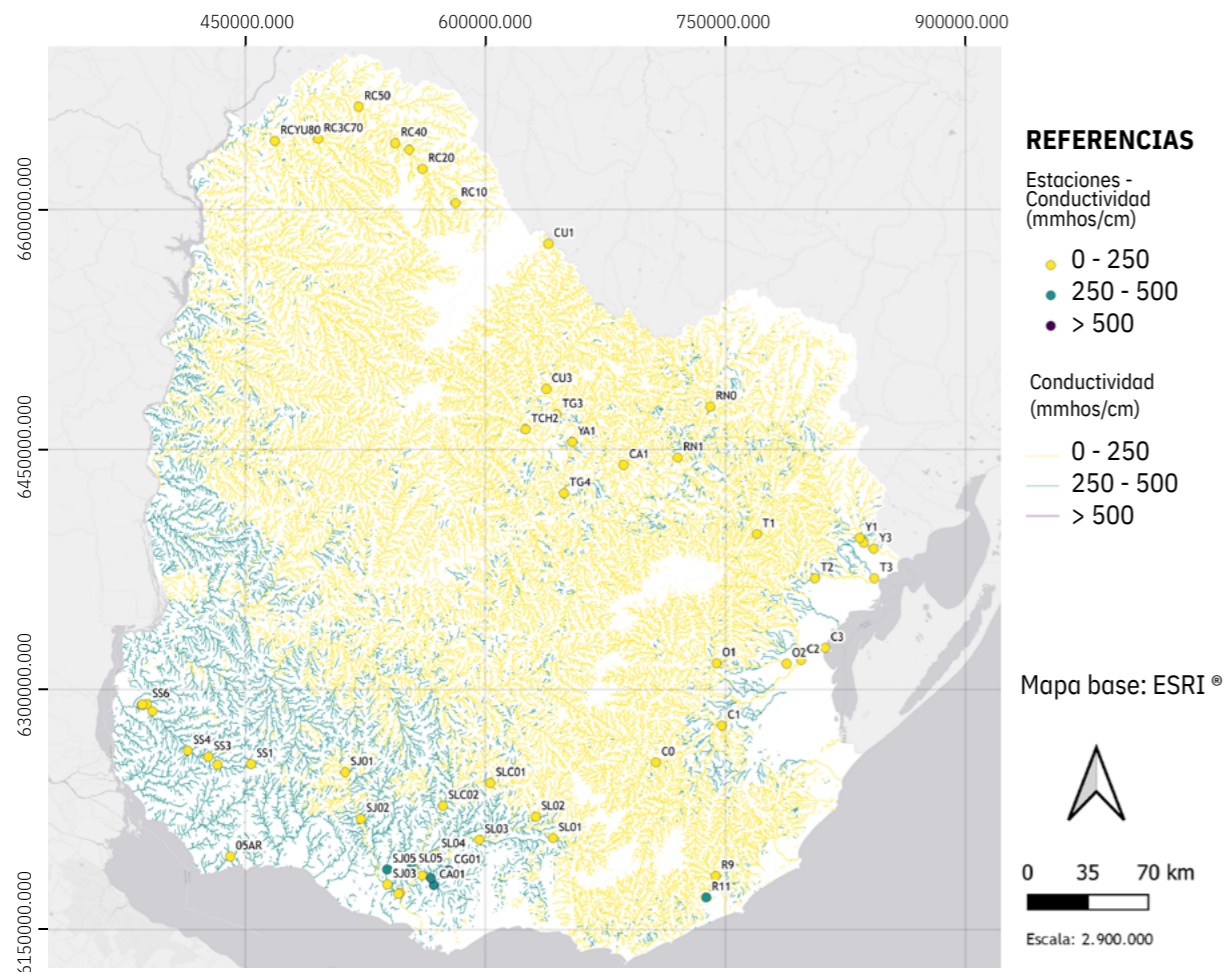
> F_R3_10:

Mapa de predicciones de mediana de la conductividad de invierno realizadas a través del modelo GAM para los tramos en el dominio de interpolación.



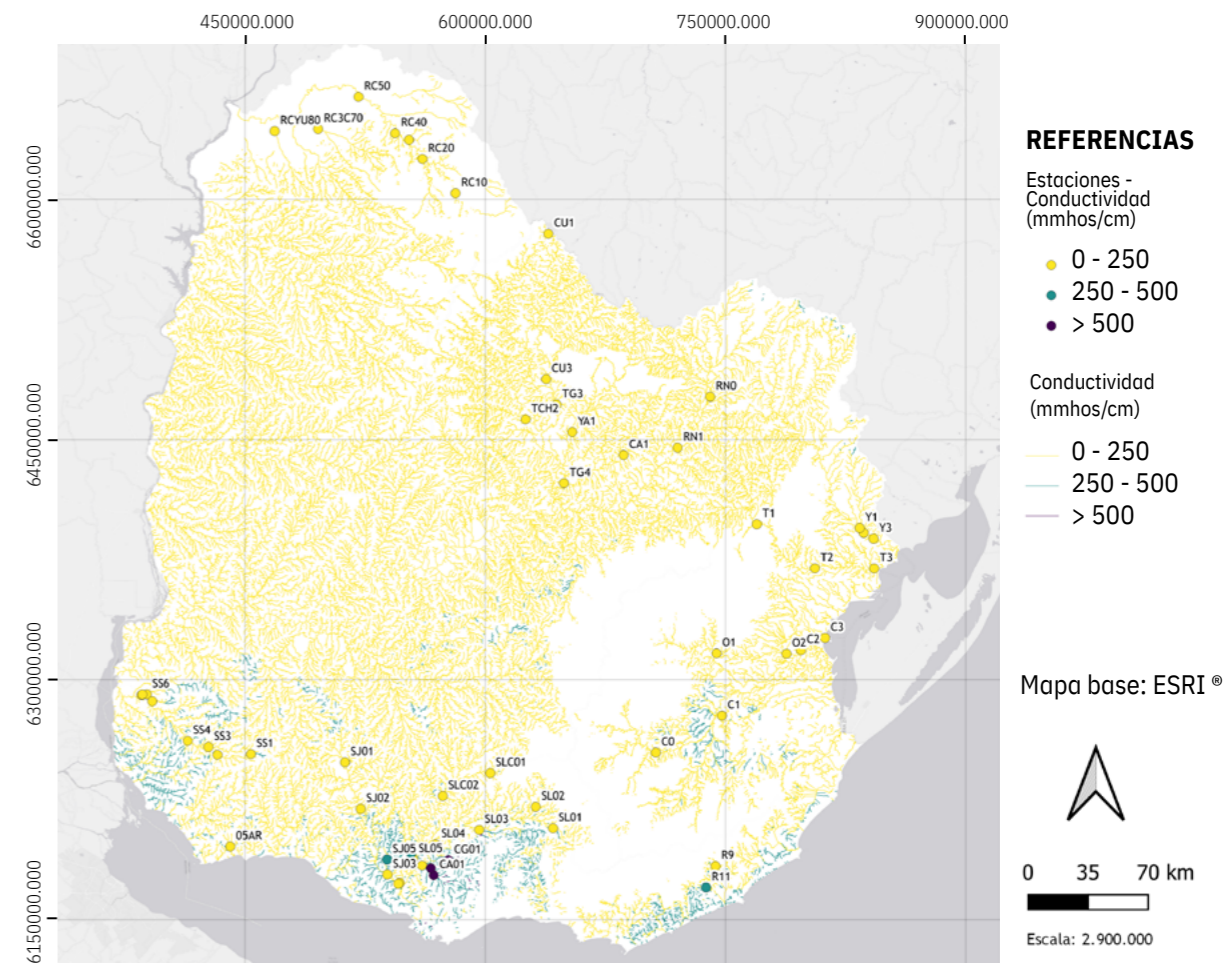
> **F_R3_11:**

Mapa de predicciones de mediana de la conductividad de invierno realizadas a través del modelo GLM para los tramos en el dominio de interpolación.



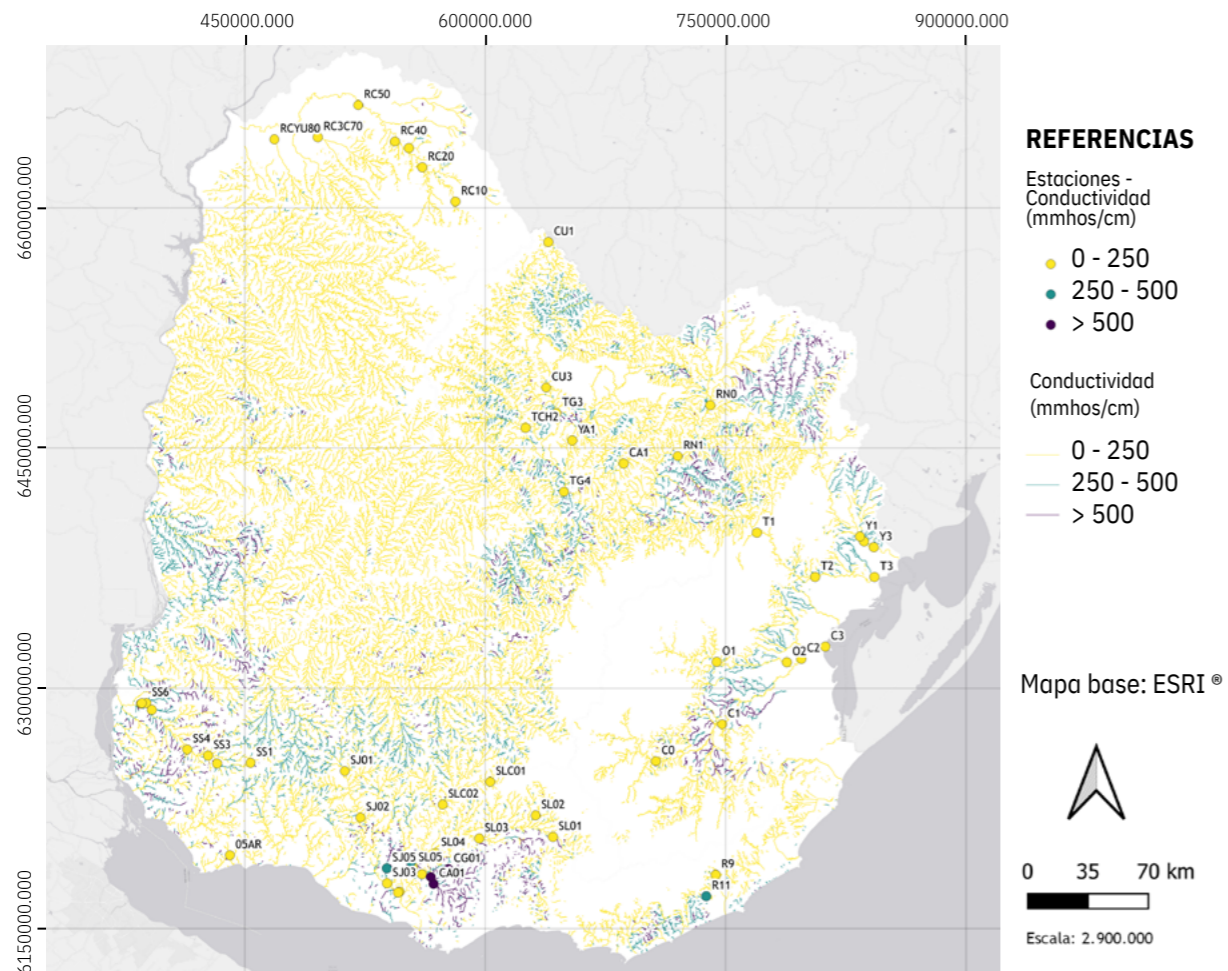
> **F_R3_12:**

Mapa de predicciones de mediana de la conductividad de verano realizadas a través del modelo RF para los tramos en el dominio de interpolación.



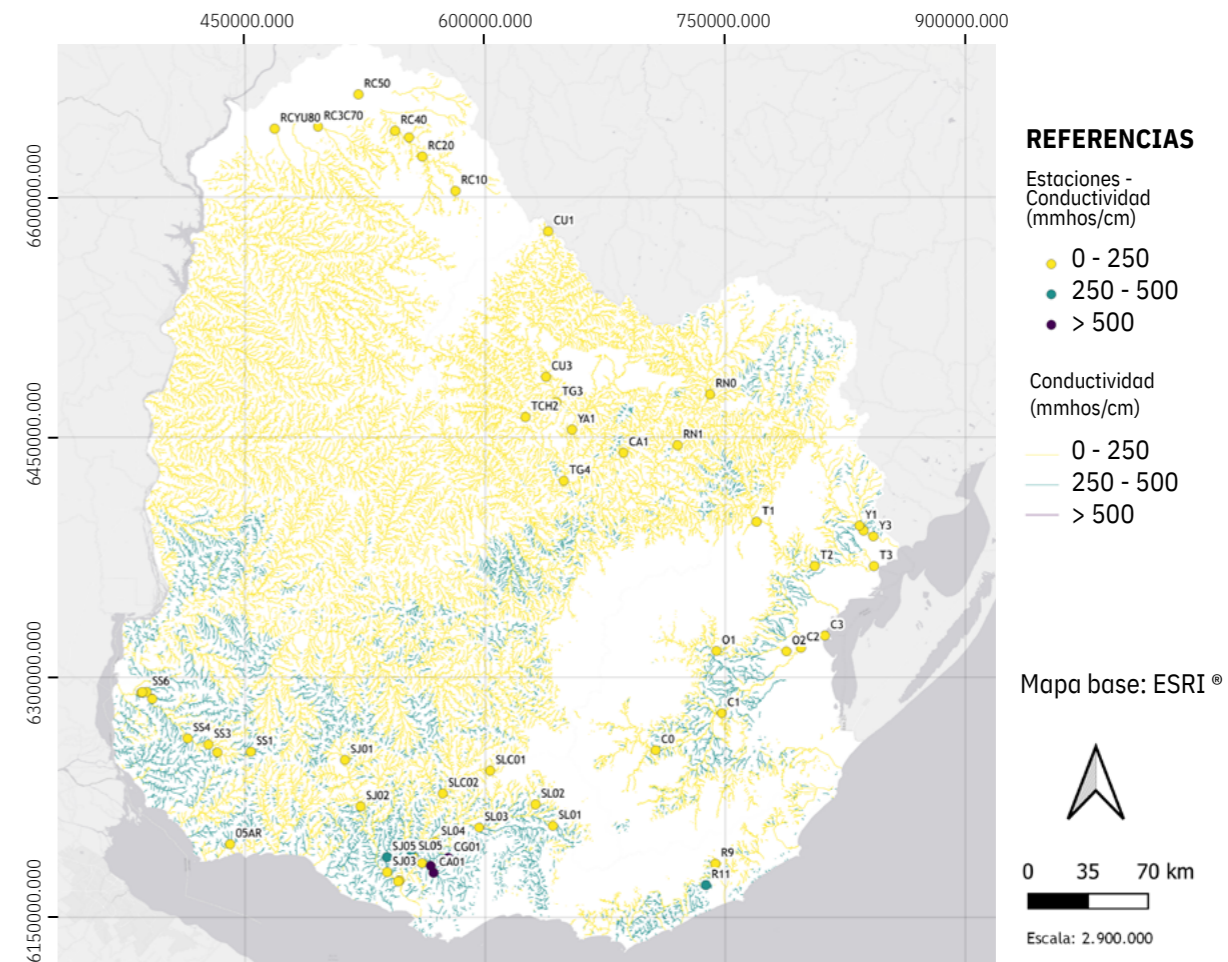
> F_R3_13:

Mapa de predicciones de mediana de la conductividad de verano realizadas a través del modelo GAM para los tramos en el dominio de interpolación.



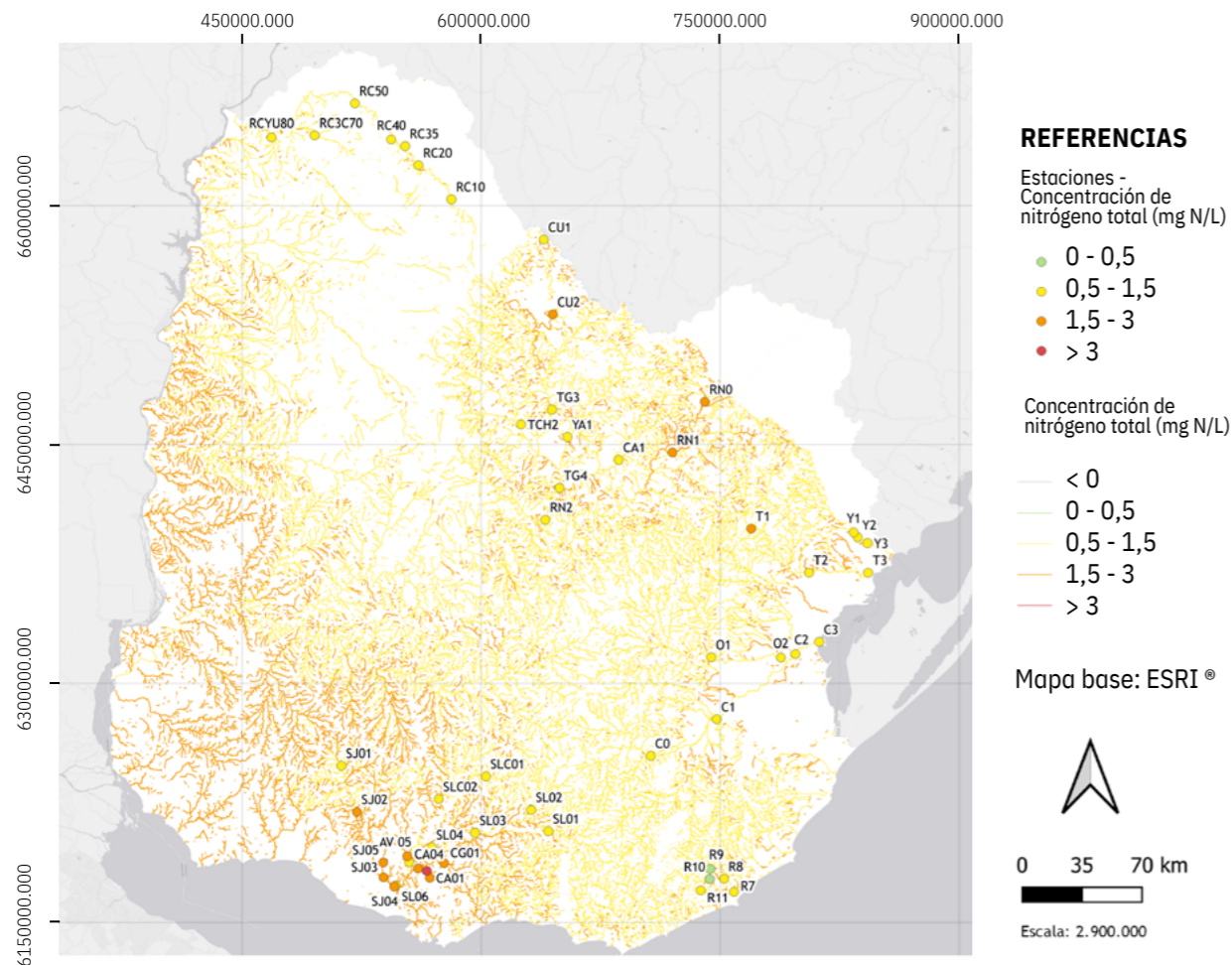
> F_R3_14:

Mapa de predicciones de mediana de la conductividad de verano realizadas a través del modelo GLM para los tramos en el dominio de interpolación.



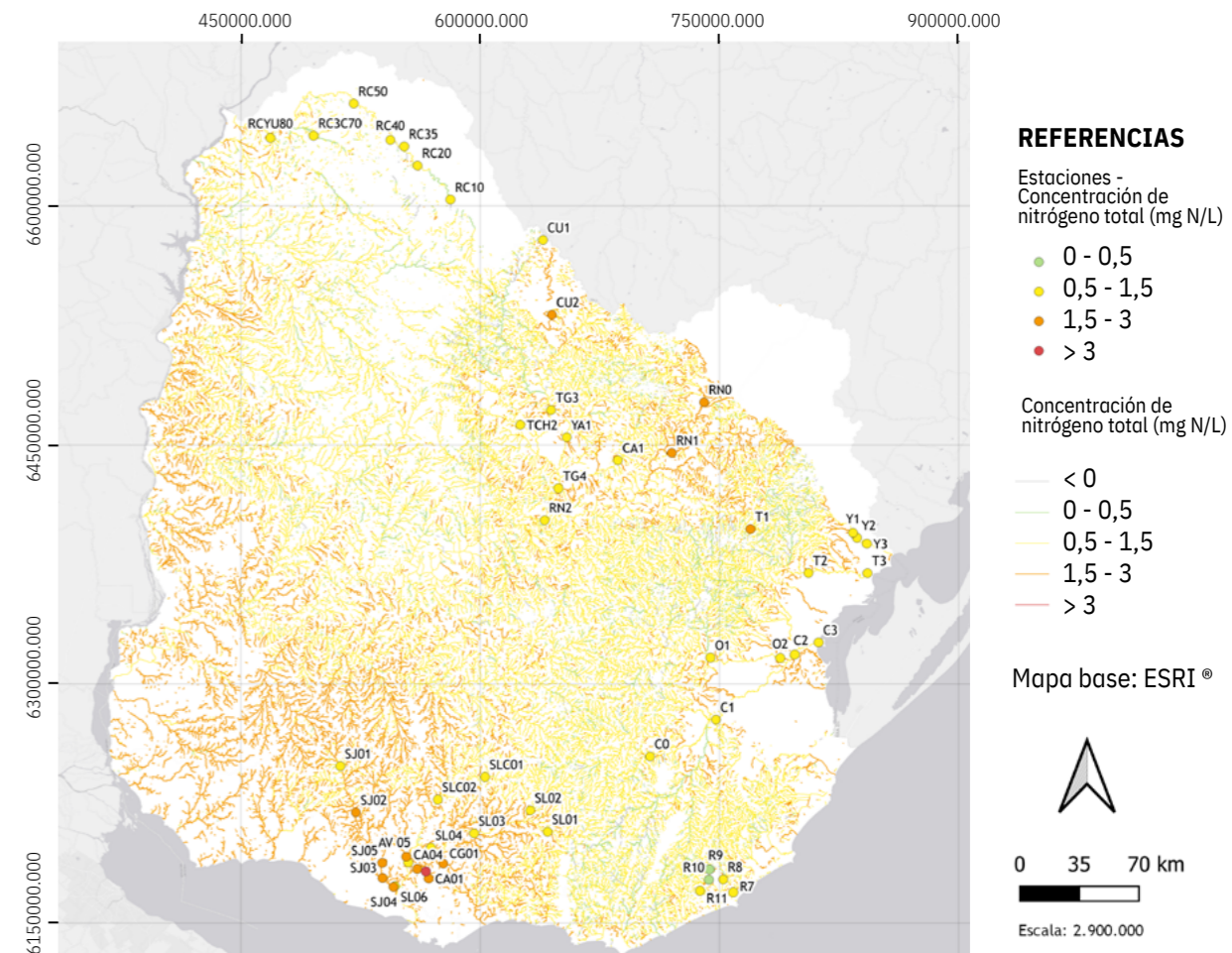
> F_R3_15:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de N de invierno realizadas a través del modelo RF para los tramos en el dominio de interpolación.



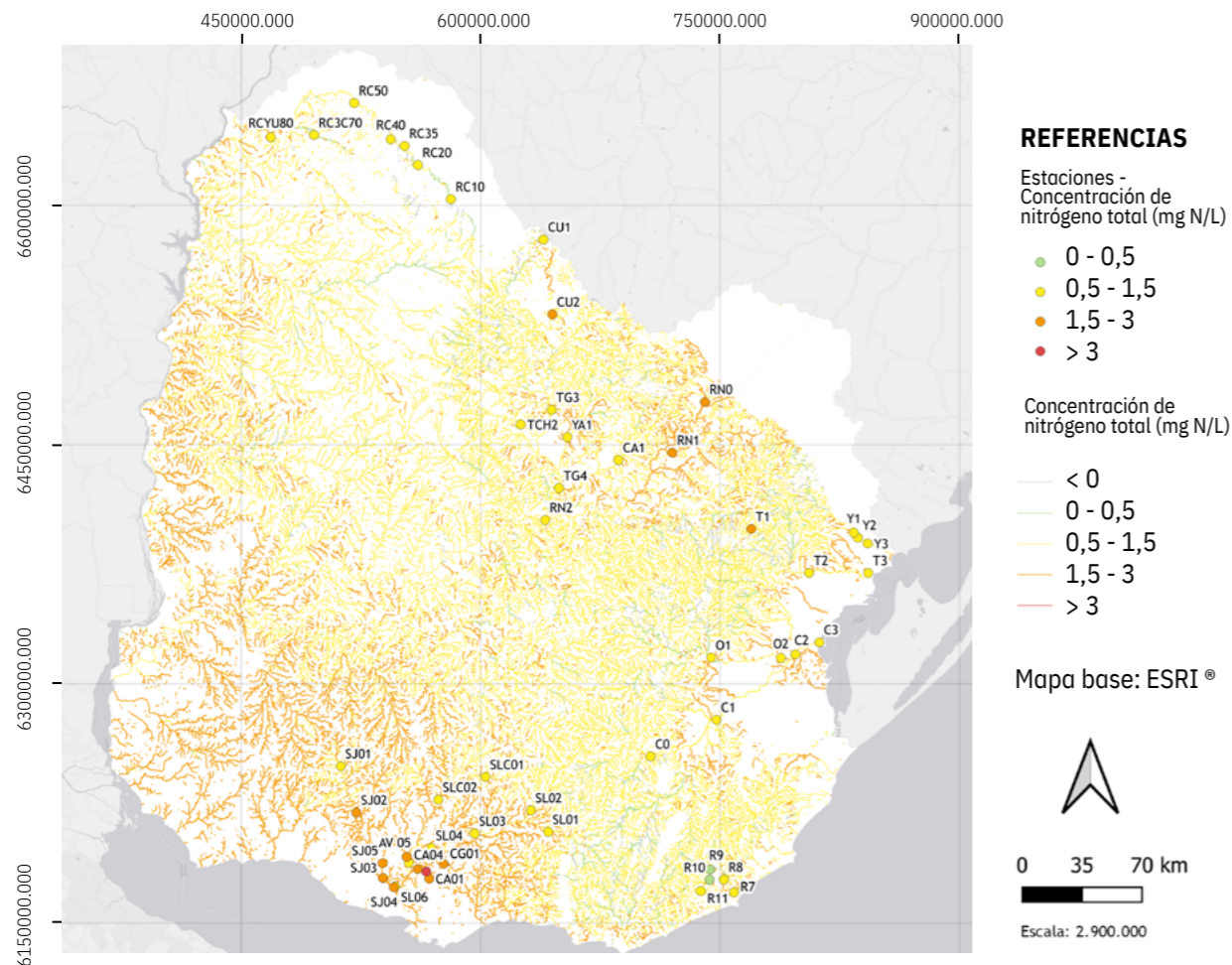
> F_R3_16:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de N de invierno realizadas a través del modelo GAM para los tramos en el dominio de interpolación.



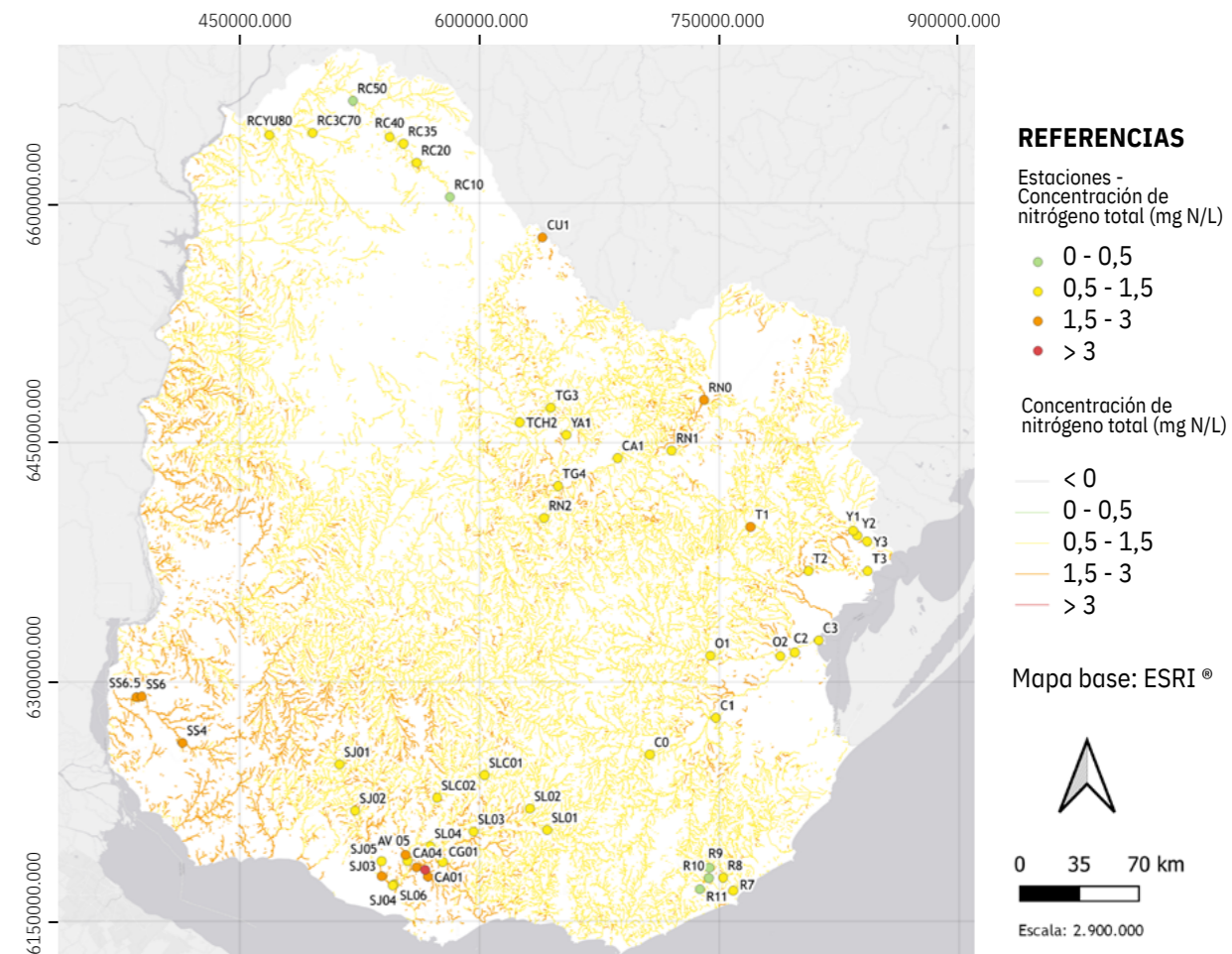
> F_R3_17:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de N de invierno realizadas a través del modelo GLM para los tramos en el dominio de interpolación.



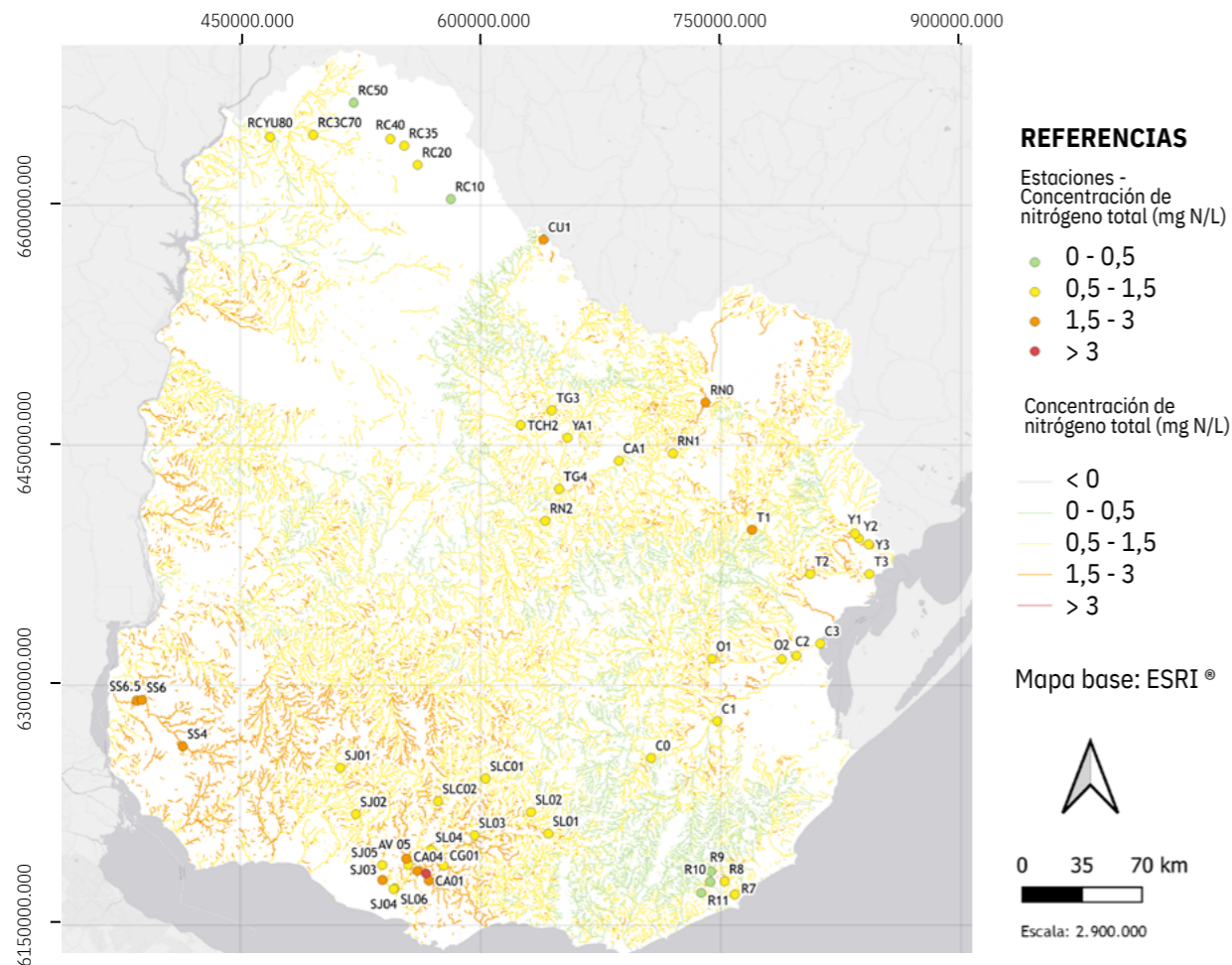
> F_R3_18:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de N de verano realizadas a través del modelo RF para los tramos en el dominio de interpolación.



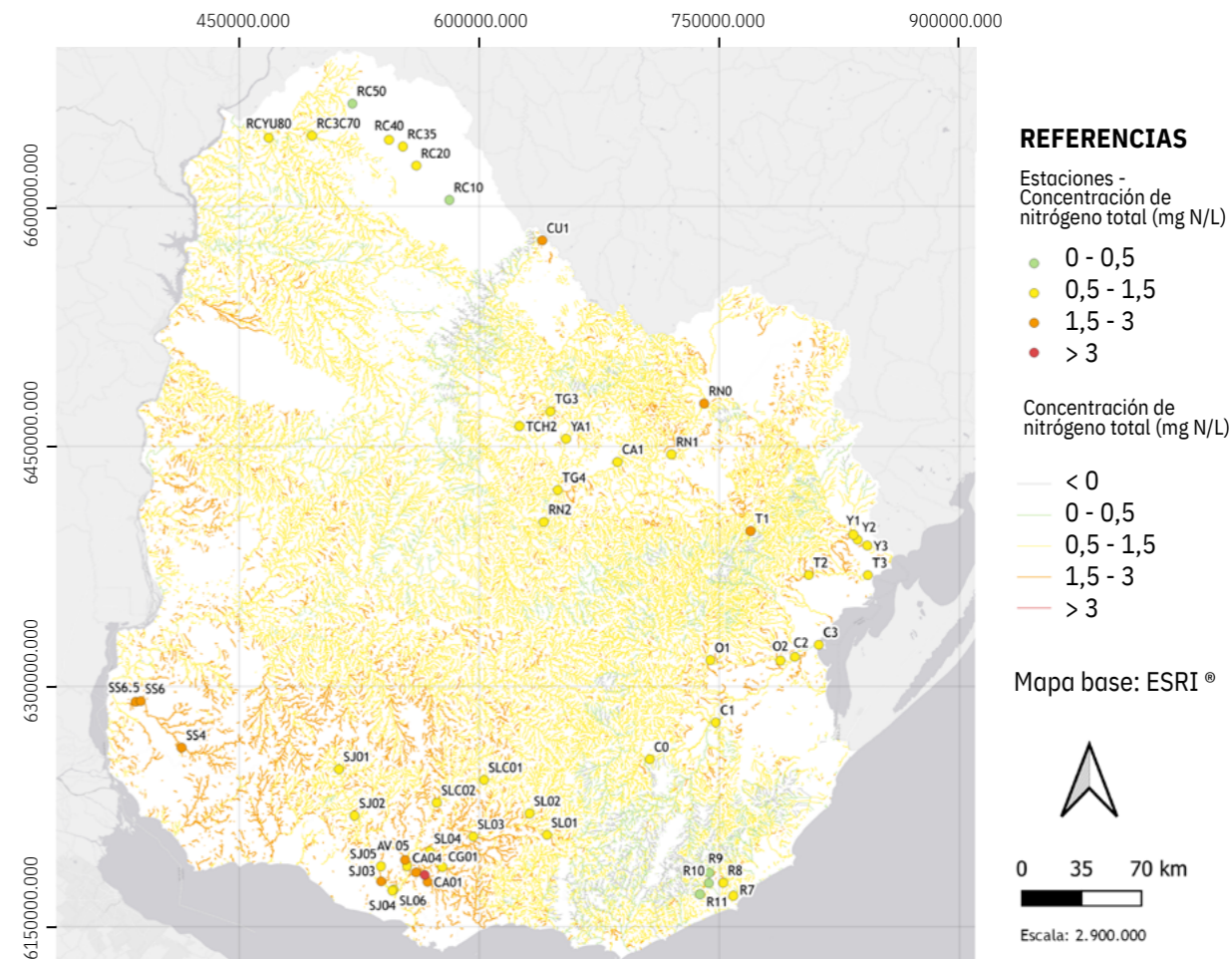
> F_R3_19:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de N de verano realizadas a través del modelo GAM para los tramos en el dominio de interpolación.



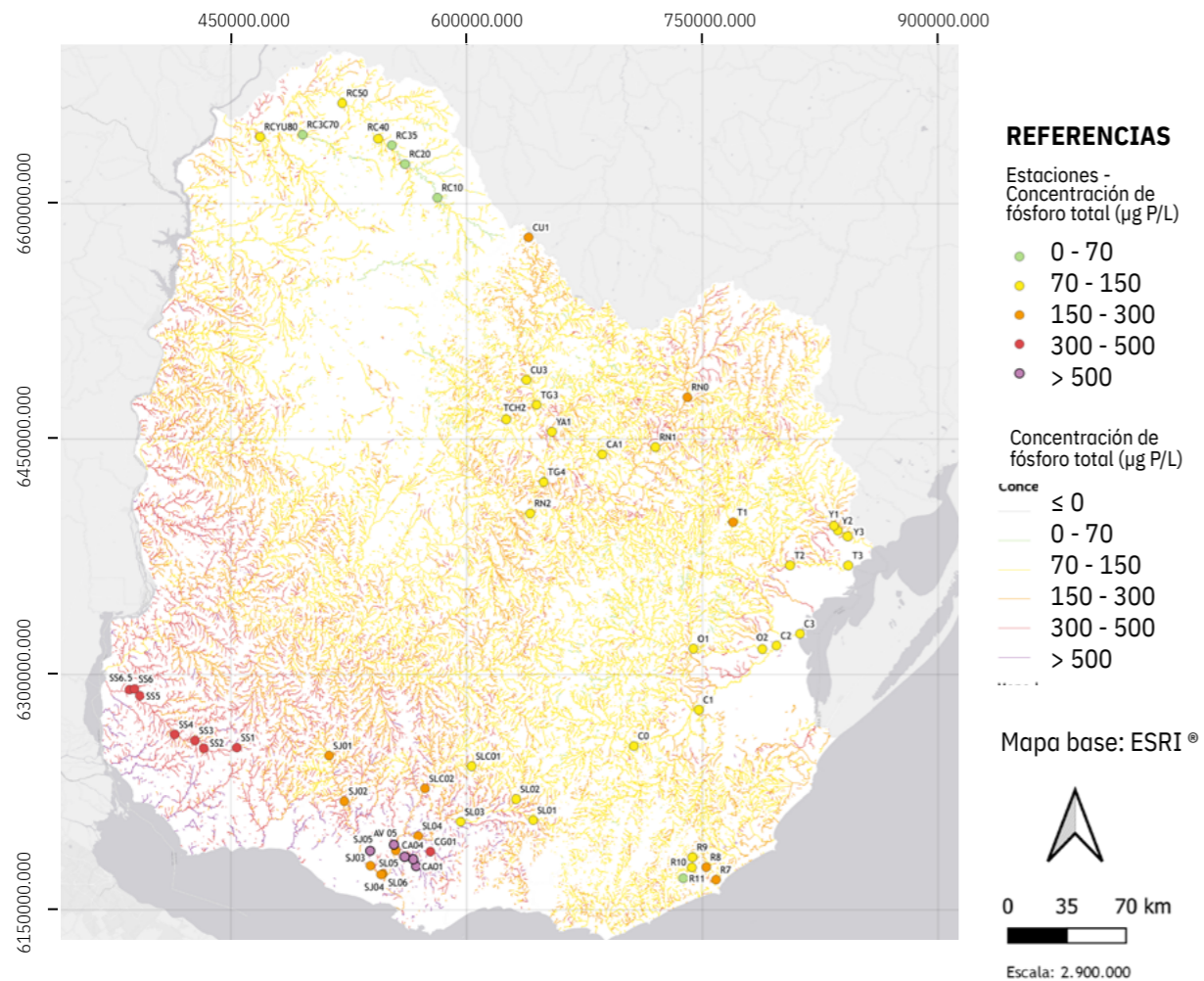
> F_R3_20:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de N de verano realizadas a través del modelo GLM para los tramos en el dominio de interpolación.



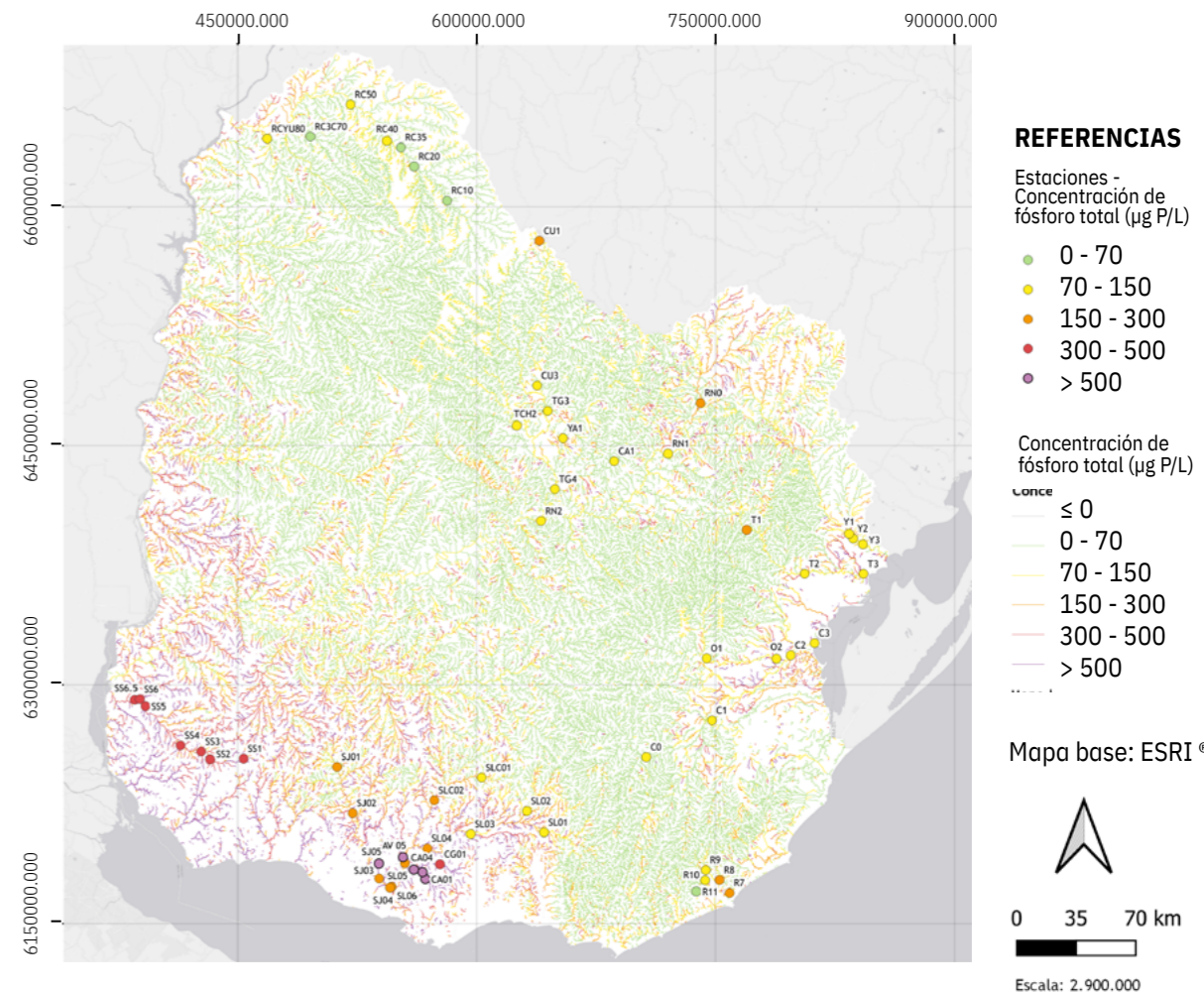
> F_R3_21:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de P de invierno realizadas a través del modelo RF para los tramos en el dominio de interpolación.



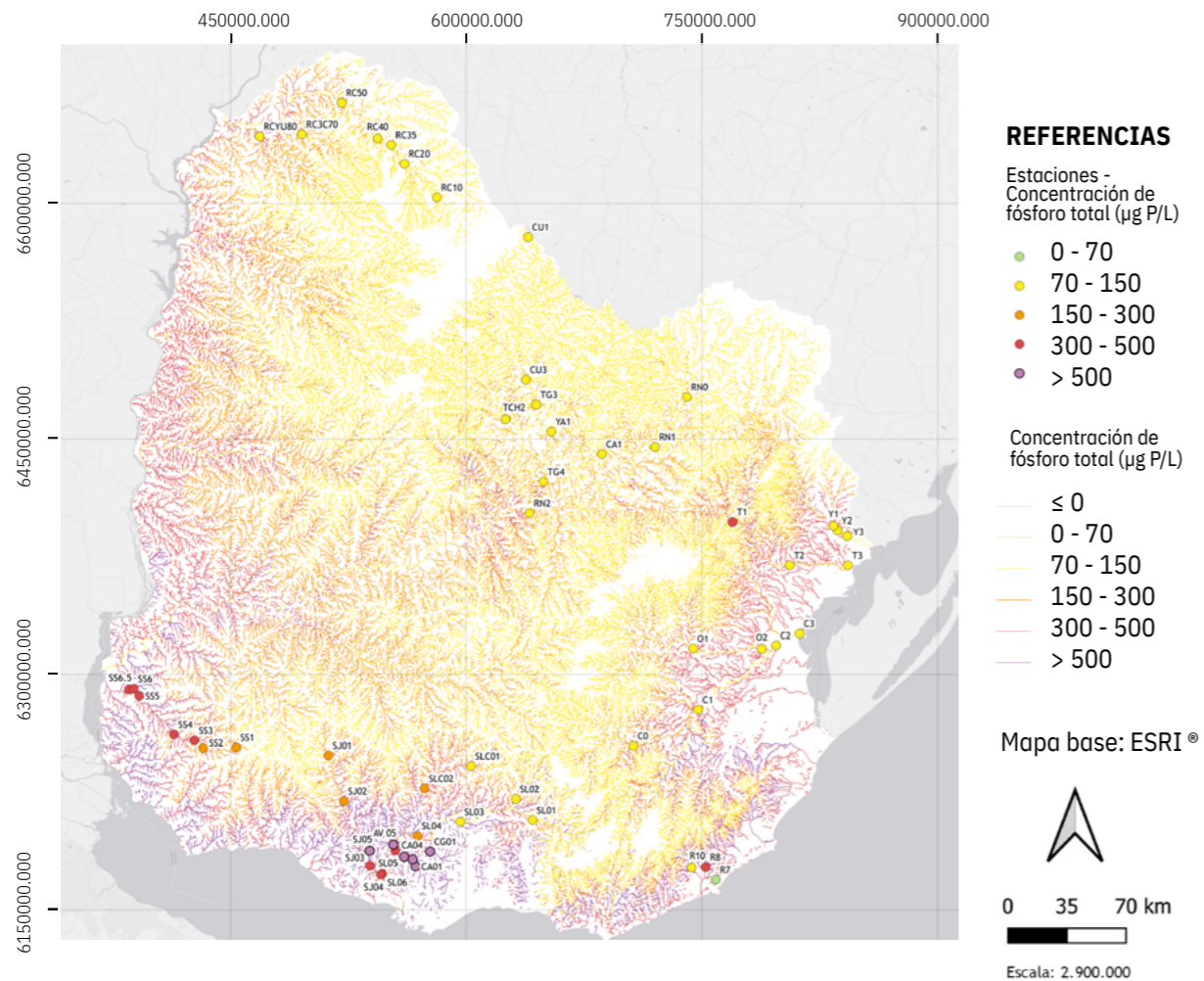
> F_R3_22:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de P de invierno realizadas a través del modelo GAM para los tramos en el dominio de interpolación.



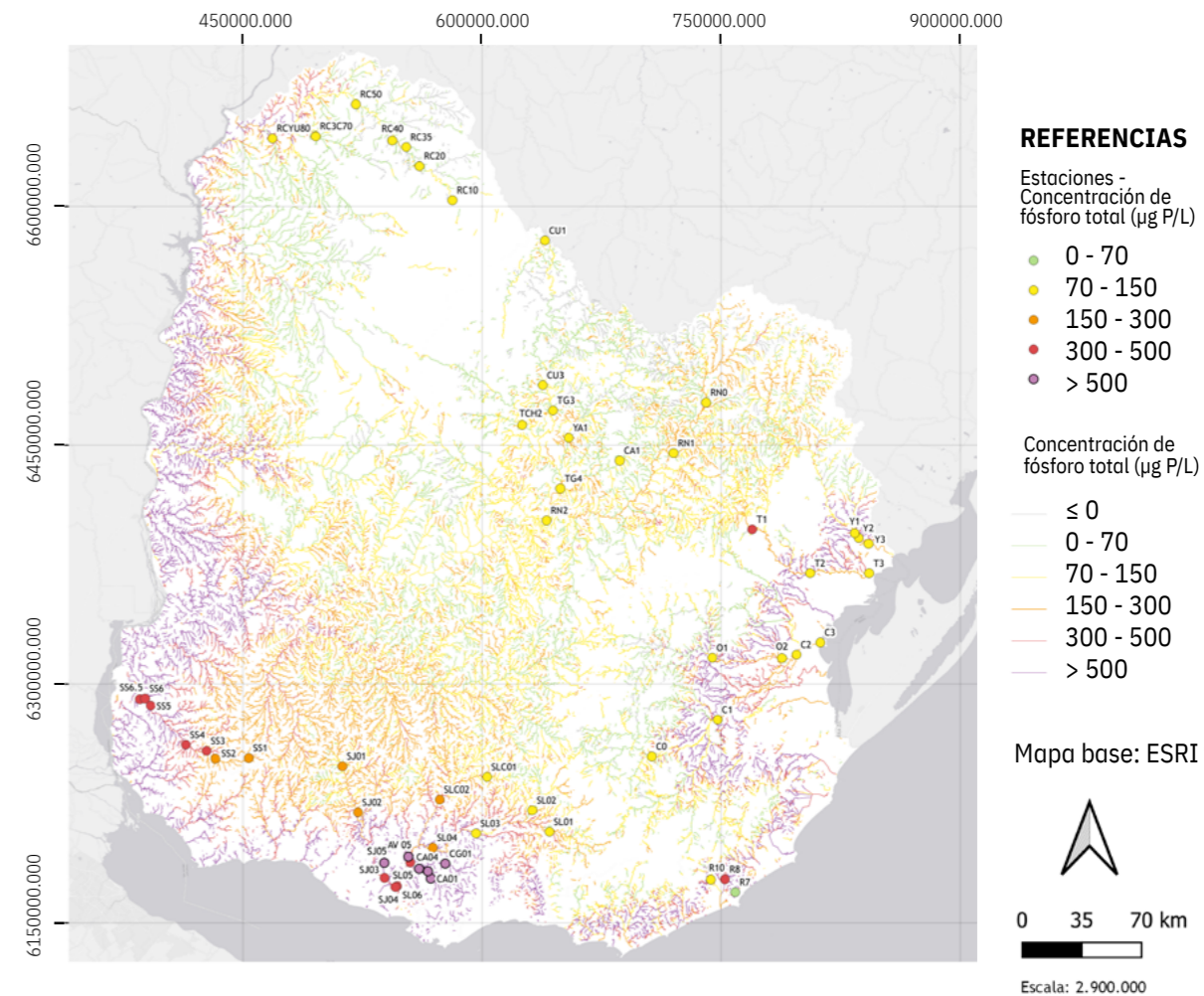
> F_R3_23:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de P de verano realizadas a través del modelo RF para los tramos en el dominio de interpolación.



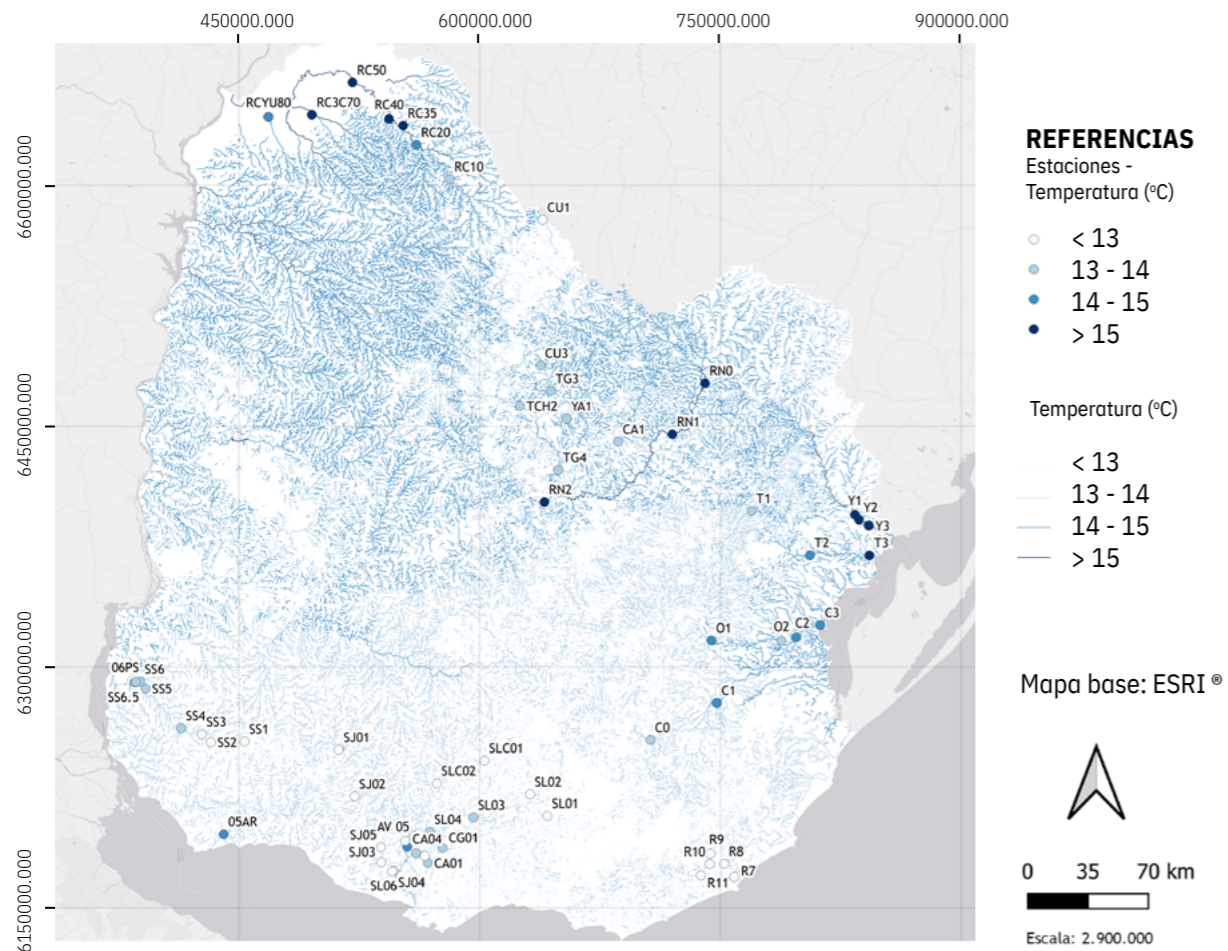
> F_R3_24:

Mapa de predicciones de mediana de la concentración de P de verano realizadas a través del modelo GAM para los tramos en el dominio de interpolación.



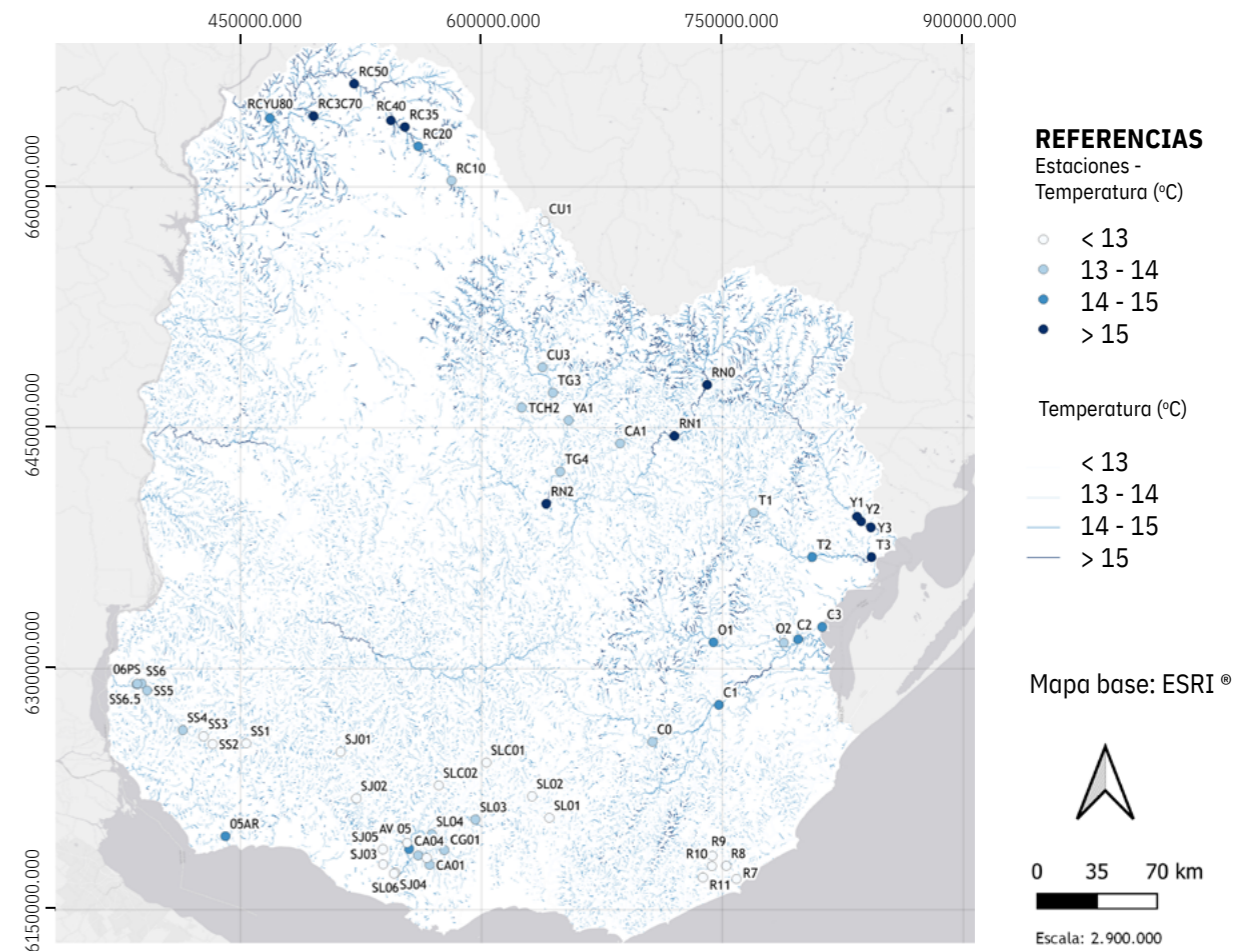
F_R3_25:

Mapa de predicciones de mediana de la temperatura del agua de invierno realizadas a través del modelo RF para los tramos en el dominio de interpolación.



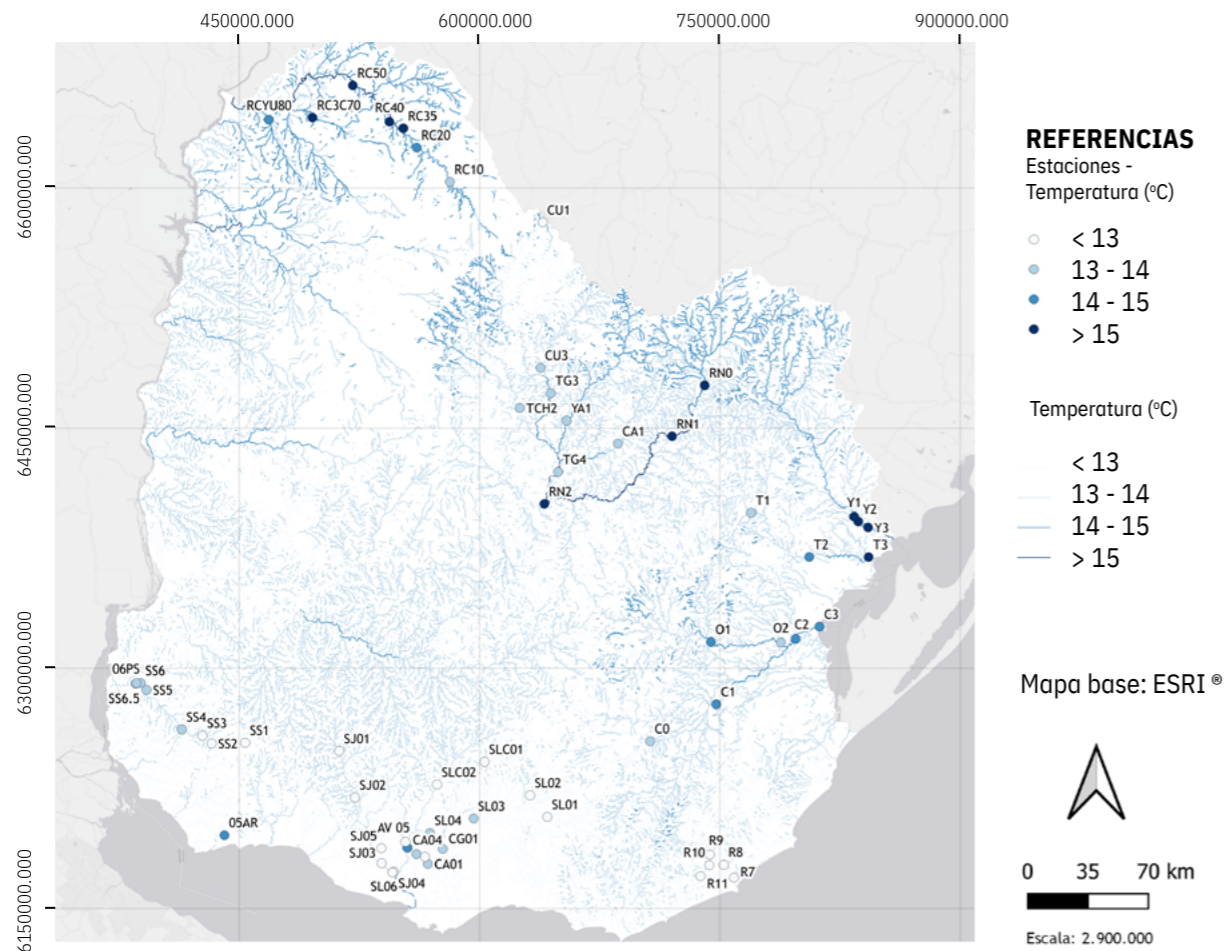
F_R3_26:

Mapa de predicciones de mediana de la temperatura del agua de invierno realizadas a través del modelo GAM para los tramos en el dominio de interpolación.



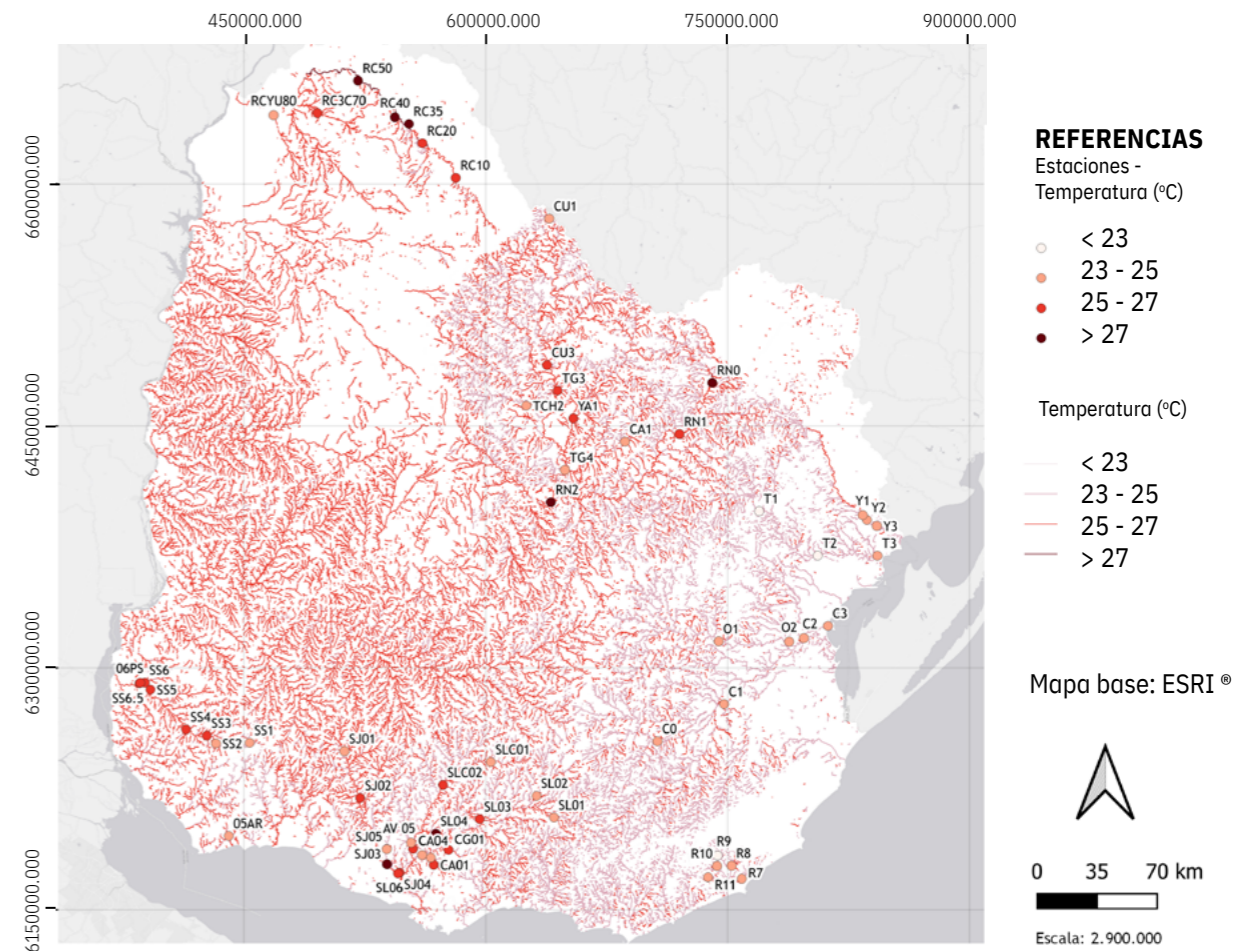
> F_R3_27:

Mapa de predicciones de mediana de la temperatura del agua de invierno realizadas a través del modelo GLM para los tramos en el dominio de interpolación.



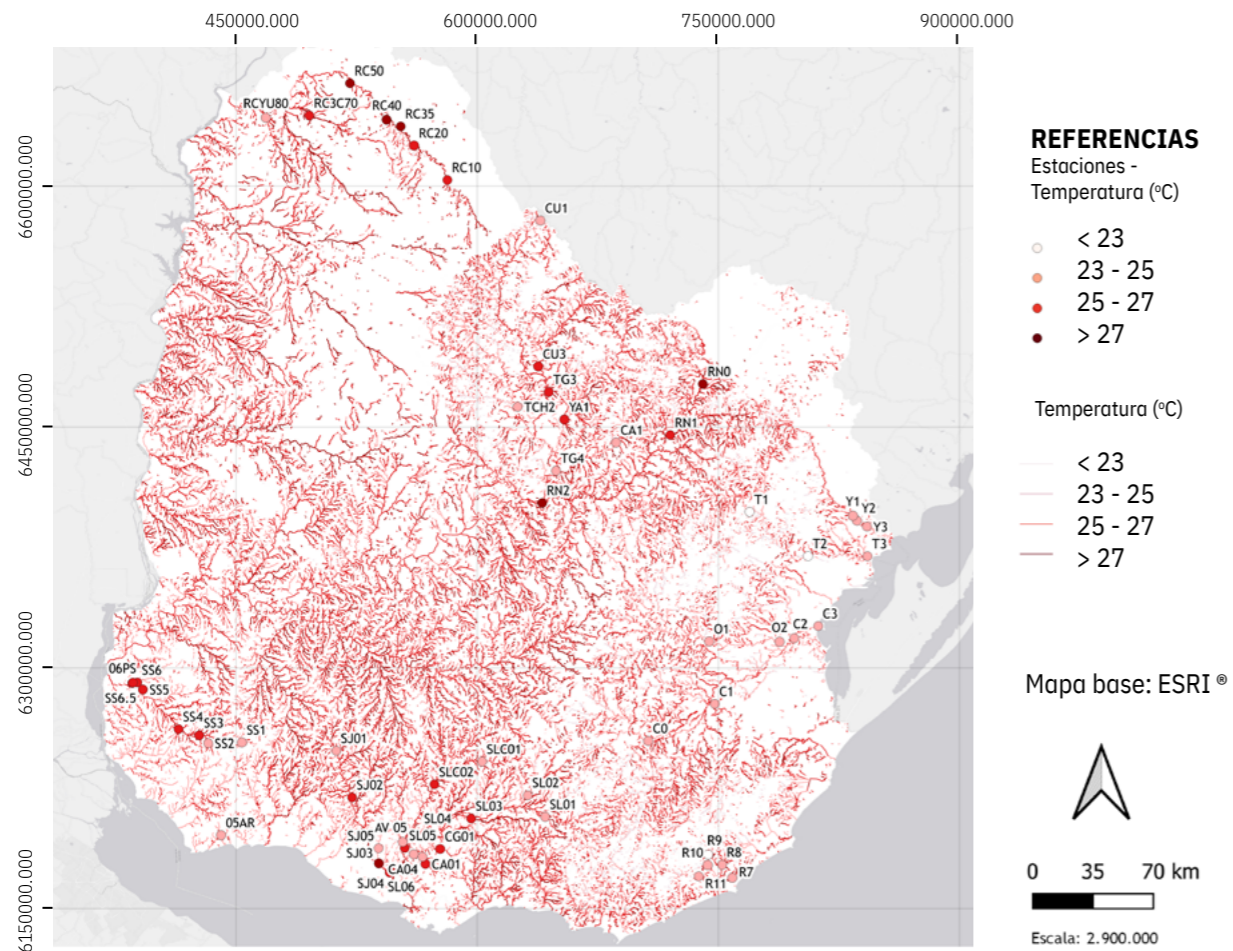
> F_R3_28:

Mapa de predicciones de mediana de la temperatura del agua de verano realizadas a través del modelo RF para los tramos en el dominio de interpolación.



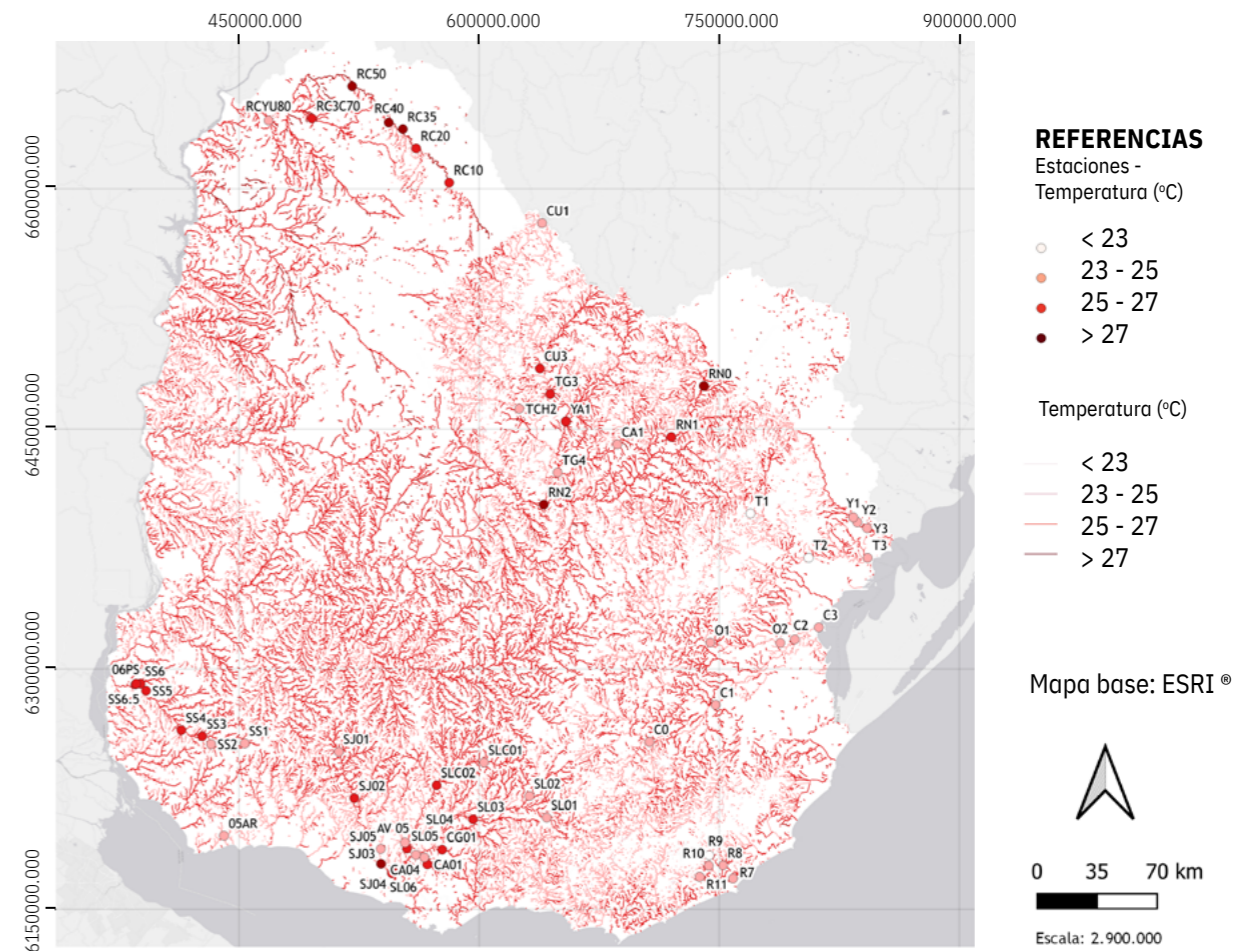
> F_R3_29:

Mapa de predicciones de mediana de la temperatura del agua de verano realizadas a través del modelo GAM para los tramos en el dominio de interpolación.



> F_R3_30:

Mapa de predicciones de mediana de la temperatura del agua de verano realizadas a través del modelo GLM para los tramos en el dominio de interpolación.



RED INTERINSTITUCIONAL VINCULADA Y SISTEMA DE GOBERNANZA DEL AGUA

Uruguay transita desde un modelo de gestión del agua fragmentado y jerárquico hacia un sistema más integrado con espacios (Consejos Regionales, Comisiones de Cuenca) de interacción entre instituciones y niveles de gobierno, que contemplan la participación de usuarios y la sociedad civil (14). El desempeño de estos espacios es muy heterogéneo, particularmente en la capacidad de generar acuerdos y definir estrategias y acciones. Al mismo tiempo persiste la fragmentación inter e intrainstitucional en las etapas de implementación y control de las acciones, planes y estrategias acordados. El sistema cuenta con muy escasas capacidades de incorporar las bases del manejo adaptativo, debido a la ausencia de un sistema robusto de monitoreo a escala nacional.

En el desarrollo del proyecto se han identificado importantes fortalezas que pueden permitir revertir la actual trayectoria. En el ámbito público se destaca la Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay (IDEuy), el Observatorio Ambiental Nacional (OAN) del Ministerio de Ambiente, los procesos de descentralización vinculados al INIA y la Udelar. Al mismo tiempo, existen equipos de investigadores que pueden permitir la construcción de un sistema contemporáneo de calidad del agua, es decir: parámetros físico-químicos + indicadores biológicos y ecosistémicos + bioensayos, residuos de plaguicidas y contaminantes emergentes + metagenómica. En el trabajo se exploró de forma específica estas capacidades con equipos del LATU, grupos de investigadores de la Udelar radicados en Maldonado, Salto, Paysandú, Montevideo, así como en el Clemente Estable e Instituto Pasteur. Al mismo tiempo, existen equipos de la Facultad de Arquitectura (Udelar) con una importante capacidad de análisis de las dinámicas territoriales, aspecto central para la ubicación de capacidades en el territorio (ver conclusiones y recomendaciones). La principal limitante para Uruguay es la construcción de una red interinstitucional, internivel, con capacidades distribuidas en el territorio (policéntrico). Esta estrategia requiere de fondos económicos de considerable magni-

tud, además de la cooperación y complementación interinstitucional. La definición de una política de Estado en la materia es un paso ineludible, de forma similar a la construcción de la carta de suelos y desarrollo del CONEAT durante fines del siglo XX.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El país se destaca por un buen conocimiento de las principales características de su territorio, modelos digitales de terreno, geología, tipos y usos del suelo, principales coberturas, flora y fauna, áreas prioritarias para la conservación, dinámicas poblacionales y territoriales, transformaciones del uso del suelo. Sin embargo, Uruguay no cuenta con un sistema de monitoreo de cantidad y calidad del agua robusto en la escala nacional que le permita evaluar el estado del recurso, ni el conjunto de bienes y servicios provistos por los ecosistemas acuáticos continentales, así como comprender los efectos de las transformaciones actuales del territorio. La ausencia de este sistema limita seriamente la evaluación de

las huellas ambientales de los diferentes usos del suelo y sus impactos en actividades como la recreación, la conservación de ecosistemas y la biodiversidad asociada, la producción agropecuaria, el riego, entre otros. En otros ámbitos, reduce sustancialmente la capacidad de anticipación de potenciales efectos adversos como en los sistemas de potabilización de agua potable, donde la detección de interferencias ocurre a nivel de la toma de agua o en las propias plantas potabilizadoras. Por último, afecta indirectamente el análisis de los compromisos del país en materia ambiental y el acceso de su producción agropecuaria a mercados con mayor valor agregado.

Uruguay cuenta con importantes capacidades humanas e infraestructura para avanzar muy rápidamente en la construcción de un sistema moderno de evaluación de la cantidad y calidad de agua si logra combinar estrategias centralizadoras y descentralizadoras, una efectiva articulación inter e intrainstitucional y entre niveles de gobierno, finalmente, si el país asigna los recursos económicos indispensables. En simples términos, puede transitar del rezago a la vanguardia en un corto período de tiempo. El principal desafío es organizacional e implica asignar recursos económicos a tareas y funciones nuevas en el ámbito público (se profundiza en recomendaciones).

El proyecto Cuencas Virtuales generó bases de datos, desarrolló e implementó diversas estrategias de análisis estadísticos que permiten iniciar el proceso de construcción del sistema nacional de monitoreo de recursos acuáticos a nivel nacional. Al mismo tiempo, inició los procesos de formación y capacitación de cuadros técnicos del ámbito público, principalmente Ministerio de Ambiente y OSE, así como la construcción de una red de actores técnicos y académicos que permitan diseñar el nuevo sistema nacional de una forma policéntrica (capacidades distribuidas en el territorio). Sin duda es una construcción de muy largo aliento que requiere de amplios consensos y apoyos que deben trascender los ciclos electorales.

Recomendaciones

A. Fortalecer el proceso de construcción del Observatorio Ambiental del Ministerio de Ambiente, promover una mayor interacción interinstitucional e internivel dentro del ámbito público. En este proceso evaluar las capacidades instaladas y cuantificar los apoyos adicionales imprescindibles.

B. En el proceso previamente señalado, se debe comenzar por incorporar la información de calidad del agua del conjunto de estaciones sobre cuerpos de agua superficiales vinculadas a la OSE. Para ello resulta clave asignar recursos adicionales que permitan de forma efectiva destinar capacidades cuya tarea principal sea la construcción y actualización permanente de bases de datos y su análisis.

C. El punto B debe ser complementado con una mayor articulación con programas de monitoreo de los niveles infranacionales y proyectos de investigación. Sin embargo, superado los desafíos indicados en B y C, resulta necesario definir la localización de estaciones de muestreo adicionales que permitan contar con un sistema más robusto espacialmente. En otros términos, contar con una cobertura espacial que permita cubrir la diversidad de cuencas del país desde múltiples atributos, así como usos antrópicos, incorporar zonas de referencia, entre otros. El número actual de estaciones de muestreo y su disposición espacial limita muy seriamente la aplicación de estrategias estadísticas robustas. El proyecto Cuencas Virtuales ha generado la información clave para avanzar en el corto plazo en este sentido.

D. El registro de información y colecta de muestras en la red de estaciones requiere distribuir capacidades en el territorio que permita maximizar y sinergizar las capacidades ya instaladas. Dicha estrategia permitirá el relevamiento de nuevos tramos fluviales; la incorporación de atributos actualmente no relevados, por ejemplo atributos de calidad de agua actualmente no considerados; incorporar frecuencias de observación acordes con la dinámica de los procesos a nivel de ecosistemas o paisajes, o acoplados a los ciclos agropecuarios.

Un sistema construido sobre una red de instituciones y con capacidades distribuidas en el territorio, constituye un desafío crucial en un Estado fragmentado y excesivamente centralista como el uruguayo. Las nuevas capacidades deben combinar estrategias descentralizadoras y centralizadoras. En el primer caso, localizar centros en el interior que aseguren la colecta de información y muestras, así como el análisis de los aspectos más básicos que no demandan inversiones extraordinarias de infraestructura y recursos humanos. Se sugiere explorar los siguientes nodos: Paysandú-Salto, Tacuarembó, Treinta y Tres, Colonia y Montevideo. La experiencia de los campus de Tacuarembó y Treinta y Tres donde se ha localizado el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), MGAP y la Udelar es una experiencia clave a considerar.

Las capacidades de análisis de la información y asistencia a la toma de decisión también deben estar distribuidas en el espacio y deben formar parte de los centros sugeridos. Estos espacios deben atender las de-

mandas de información y toma de decisiones en el territorio vinculadas a los Ministerios, OSE, Intendencias y Municipios.

Las estrategias centralizadas deben ser consideradas para el análisis de múltiples componentes que requieren de importantes inversiones y/o equipos de investigación consolidados. Durante el proyecto se identificaron los siguientes nodos y capacidades. Residuos de plaguicidas en los centros universitarios de la Udelar en Paysandú y Salto, así como las capacidades de bioensayos instaladas en el LATU (Montevideo). El IMFIA-Facultad de Ingeniería-Udelar puede contribuir al fortalecimiento del sistema de información de niveles hidrométricos y caudales, incorporando nuevas estaciones de muestreo y frecuencias de observación. Equipos de investigación de la Udelar localizados en el CURE, litoral oeste y Facultad de Ciencias pueden contribuir en la incorporación de bioindicadores de calidad del agua, indicadores ecosistémicos, evaluación de bienes y servicios provistos por los ecosistemas acuáticos, aprendizaje automático e inteligencia artificial. El país cuenta con muy buenas capacidades (Instituto Pasteur e Instituto Clemente Estable) para incorporar los aportes de la metagenómica ambiental en el sistema nacional de monitoreo. Por último, un desafío como el planteado requiere del análisis (y transformación) de los sistemas de gobernanza y gestión del agua, actualmente existen múltiples aportes desde la Facultad de Ciencias Sociales-Udelar y desde el Instituto SARAS, entre otros.

E. Las evaluaciones de impacto contemplan diversos diseños de acuerdo a la existencia de sitios considerados control y si las zonas impactadas son asignadas al azar o no. Además, la existencia/ausencia de información previa, tanto de las zonas control como impactadas, condicionan la robustez de las evaluaciones. Los diseños más robustos (en orden creciente, profundizar en 9): control-impacto (CI), control-impacto, antes y después (BACI), control-impacto aleatorizado (RCI), control-impacto antes y después aleatorizado (RBACI), requieren de un número importante de estaciones de muestreo disponibles de acuerdo a la combinación entre atributos naturales de la cuenca y los usos que se desean considerar. Las bases de datos generadas en el presente proyecto brindan una herramienta clave en este sentido.

Sin embargo, persiste un desafío fundamental: el establecimiento y mantenimiento en el tiempo de zonas consideradas control y que en el desarrollo de bioindicadores y biomarcadores de los sistemas de evaluación de calidad del agua juegan un rol clave (sitios de referencia).. El desarrollo de las áreas protegidas en el Uruguay es absolutamente insuficiente en este sentido y plantean desafíos muy importantes si se desea contar con los diseños más sofisticados y robustos.

F. La coordinación y la complementación interinstitucional e internivel es un paso ineludible, fundamental pero insuficiente. Las nuevas capacidades y recursos necesarios demandan una construcción de largo aliento que requiere de la asignación de nuevos recursos en el presupuesto nacional. En este marco, el desafío planteado se sustenta en un amplio acuerdo y en la construcción de una política de Estado. Además, de toda la experiencia internacional en la materia, Uruguay debería incorporar todas las lecciones que condicionaron la construcción de la carta de suelos, el desarrollo del CONEAT o los actuales planes de uso y manejo de suelos.

G. El desafío planteado requiere de cooperación, persistencia y liderazgo. El Ministerio de Ambiente debe asumir la conducción de este proceso de acuerdo a los roles y funciones de la institucionalidad pública establecida en nuestra normativa vigente. Sin embargo, la actual situación de este Ministerio presenta serias dificultades para poder asumir este desafío. En ese sentido, se recomienda continuar con la formación e incorporación de recursos humanos que permitan desarrollar la construcción del sistema nacional de monitoreo de recursos acuáticos. Durante las fases iniciales el apoyo del ámbito académico nacional y la cooperación internacional constituyen pilares fundamentales.

H. La coordinación interministerial y entre niveles de gobierno requiere



de ámbitos específicos. La articulación con el Congreso de Intendentes y la Oficina de Planeamiento y Presupuesto constituyen aspectos claves a considerar.

I. Los fondos con un foco específico dentro de la ANII, por ej. Energía, constituyen impulsores muy relevantes en la articulación entre el sector académico y objetivos estratégicos. La construcción de un sistema nacional de monitoreo de recursos acuáticos debería recorrer experiencias similares. Dicha estrategia puede también estimular la inserción de postgrados que estimulen el análisis de las bases de datos que se generan y/o la construcción de nuevas capas de información.

APLICABILIDAD

Los resultados del proyecto contribuyen a una gestión sostenible de los ecosistemas fluviales del Uruguay y de otros ecosistemas de agua dulce. Para ello es imprescindible contar con una sólida base de información que permita conocer el estado actual del recurso, así como todos los bienes y servicios asociados. Las transformaciones del uso del suelo requieren de evaluaciones robustas a efectos de identificar y cuantificar externalidades y los eventos no previstos. De esta manera, se pueden explorar nuevas estrategias y ajustes en múltiples componentes, por ejemplo, en el régimen de fertilización de los agroecosistemas o en el régimen de aplicación de plaguicidas, entre otros. La nueva Ley de Riego genera un marco potencial de transformaciones que provocarán cambios en el

régimen de caudales cuyas consecuencias a nivel ecosistémico y la provisión de bienes y servicios asociados son desconocidos por el momento. Sin duda, estos potenciales cambios interactúan con todas las presiones que actualmente observamos en el territorio, incluido la variabilidad climática presente y futura. En este contexto de gran incertidumbre, debemos desarrollar sistemas de monitoreo y vigilancia que nos permitan detectar los efectos a tiempo, mitigar las consecuencias, y lo más importante, adaptarnos, corregir o revertir las causas. Por otra parte, debemos contar con mayor capacidad de planificación y anticipación, promoviendo arreglos espaciales de usos del suelo, y prácticas asociadas, compatibles con la sostenibilidad de bienes y servicios claves suministrados por los ecosistemas acuáticos de fundamental relevancia para el bienestar humano. Precisamente, el presente proyecto generó los pilares centrales para la construcción de sistemas robustos de monitoreo, evaluación y control de las medidas y estrategias adoptadas, así como una mayor capacidad en el ámbito del ordenamiento territorial.

Uruguay cuenta con una formidable información de uno de sus principales recursos naturales: el suelo. Esto obedece a que inicios de los años 1960 se estableció como prioridad generar un sistema de tributación rural de acuerdo a la productividad del suelo y al mismo tiempo penalizar las tierras no explotadas (iniciativa del Ministro de Ganadería, Agricultura y Pesca de la época Wilson Ferreira, liderada por Comisión de Desarrollo Económico-CIDE). Este considerable esfuerzo, permitió conocer en profundidad el recurso, los graves problemas de erosión del suelo existentes y, lo más relevante, desarrollar varias leyes y estrategias que lograron anticipar serios problemas de pérdida de suelo. A modo de ejemplo, en el litoral oeste del país asociado a la producción soja tras soja (sin rotación) promovido inicialmente por productores arrendatarios de origen argentino trasladados a Uruguay debido a cambios en el sistema tributario de los gobiernos argentinos. Por supuesto, dicho cambio tuvo un efecto contagio importante a nivel de productores nacionales. Otro ejemplo para destacar, los actuales planes de uso y manejo de suelo son fruto también de este proceso. Es importante recordar este antecedente ya que nos demuestra claramente los logros que se pueden alcanzar cuando

existen objetivos compartidos entre los ámbitos políticos y técnicos, y los esfuerzos se mantienen en el tiempo (ver impactos de la CIDE).

El país requiere de un esfuerzo de similar magnitud al plan de relevamiento y mapeo de suelos, de los años 1960 y 1970, con relación a los ecosistemas acuáticos continentales. Cuenta con una enorme cantidad de información espacial que le puede permitir diseñar un muy buen sistema de monitoreo de calidad y cantidad de agua bajo un régimen de cooperación e interacción interinstitucional e internivel real. Las cuencas virtuales están basadas en redes fluviales sintéticas generadas a partir de modelos digitales del terreno y la combinación de estas con información ambiental (digital) relevante. Las cuencas virtuales proporcionan un marco espacial y un esquema de ordenación jerárquico adecuado para sistematizar la información de los ecosistemas fluviales (hidrología, calidad del agua, usos del agua y del suelo en las cuencas de drenaje), abarcando desde la escala de tramo hasta la escala de cuenca. Este marco permitió evaluar las capacidades actuales y desarrollar estrategias que permitirán en el futuro contar con evaluación robustas, basadas en sólidos diseños espaciales entre sitios comparables y que presenten diferencias sustanciales en las presiones que se desean analizar. Finalmente, las evaluaciones serán más sólidas al poder incorporar un conjunto mayor de atributos físicoquímicos, biológicos y ecosistémicos.

El desafío planteado es en parte técnico-científico, pero fundamentalmente organizacional y político. La construcción de un sistema de cooperación y complementación multiinstitucional y multinivel de gobierno permitirá avanzar de forma sustancial, sin duda. Sin embargo, se requiere reforzar la capacidad de colecta de información y muestras en campo, así como la capacidad de análisis. Desafortunadamente, este último aspecto no puede ser resuelto totalmente en un escenario de máxima cooperación y complementación, se requiere de capacidades y recursos no existentes en la actualidad o potencialmente presentes en el sistema, pero sin tiempo real para atender el desafío planteado. El salto requerido no puede ser abordado de forma aislada por cada Ministerio, Dirección, Intendencia o Municipio, no resulta factible ni sostenible económicamente. El



presente proyecto aporta alternativas en este sentido mediante la combinación de estrategias descentralizadoras y centralizadoras previamente indicadas. Por último, los resultados promueven una mayor capacidad de aprendizaje al contar con sistemas de evaluación sólidos de las medidas, estrategias y prácticas que actualmente se aplican o que en el futuro se implementarán.

EQUIPO DE TRABAJO

El equipo integrado por investigadores de Uruguay, España, técnicos del Ministerio de Ambiente y otras instituciones públicas, constituyó un grupo diverso de dominios disciplinares vinculados a la geografía, la teledetección, la ecología acuática y terrestre, la estadística, y el estudio de los sistemas socio-ecológicos. El grupo cuenta con una amplia experiencia en la temática del proyecto, integrando investigadores y técnicos con una producción científica y formación de recursos humanos en áreas como: factores que condicionan la calidad del agua, particularmente interacciones con atributos y procesos que ocurren a escala de cuenca; provisión de servicios ecosistémicos claves, diseño e implementación de

infraestructura verde; integración y análisis de información espacial vinculados a múltiples atributos y dimensiones; gobernanza del agua.

El Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio (Facultad de Ciencias – Udelar) concentra sus actividades en el análisis y la gestión ambiental del territorio, destacándose las geotecnologías aplicadas al análisis de territorio, la gestión integrada de cuencas hidrográficas, el análisis del proceso de intensificación del uso del suelo, las regiones y la regionalización en el Uruguay, y el análisis y distribución de ambientes en Uruguay.

El grupo de Ecosistemas Continentales de la Universidad de Cantabria (España), estudia los factores que determinan la estructura y funcionamiento de ecosistemas de aguas corrientes y las interacciones entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. El grupo investiga los mecanismos biofísicos que confieren resiliencia a los ecosistemas, que les permite mantener su funcionamiento y su biodiversidad frente a perturbaciones naturales o antropogénicas. Esta área de investigación sustenta la propuesta y generación de herramientas, metodologías y modelos aplicados que son utilizados por las administraciones públicas o el sector privado para diseñar soluciones integradoras (basadas en la naturaleza) que beneficien la provisión de múltiples servicios ecosistémicos.

El Grupo de Ecología y Rehabilitación de Sistemas Acuáticos (CURE-Maldonado, Udelar) trabaja en diversas líneas de investigación relacionadas con el estudio de los efectos de la eutrofización y la variabilidad climática en sistemas acuáticos del Uruguay. Al mismo tiempo, explora estrategias de rehabilitación aplicables al contexto climático y socio-económico del país. En todas las líneas de investigación señaladas se combinan múltiples estrategias de investigación: estudios de campo; experimentos en laboratorio y campo; modelación y experimentos numéricos.

El grupo Modelización y Análisis de Recursos Naturales (MAREN, CURE-Rocha, Udelar) está compuesto por Matemáticos y Biólogos intere-

sados en la modelización matemática en Ciencias Ambientales. Algunas de sus líneas principales comprenden: modelización cuantitativa de la dinámica del plancton, predicción de atributos del fitoplancton y modelización condicionados por eventos climáticos extremos en sistemas de agua dulce, modelización del efecto del cambio y variabilidad climática sobre organismos acuáticos y pesquerías. El grupo se especializa en la aplicación y desarrollo de técnicas de Aprendizaje Automático, siendo otras técnicas de interés el análisis de series temporales y los modelos espacio-temporales.

El Instituto SARAS-Maldonado es una iniciativa interdisciplinaria que concentra sus trabajos de investigación y docencia en el funcionamiento, dinámica y gestión de sistemas socio-ecológicos. Dentro de las líneas de campo más directamente vinculadas al presente proyecto se destaca la administración, cuidado y gobernanza de bienes comunes. En el presente proyecto participará la red de investigadores asociada al estudio de los sistemas de gobernanza del agua.

Involucramiento de actores relevantes

El marco conceptual y de trabajo propuesto fue inicialmente explorado entre el equipo de investigación y el Ingeniero Luis Reolón (Ministerio de Ambiente) durante el año 2009. A partir de dicha interacción se solicitó el apoyo del Dr. José Barquín para una evaluación externa de una consultoría contratada por el Estado uruguayo para realizar una evaluación de la calidad y cantidad de agua y la capacidad de monitoreo de los recursos acuáticos. En los últimos años de la segunda presidencia del Dr. Tabaré Vázquez se retomó la iniciativa, en esta oportunidad en interacción con la DINAMA, DINAGUA (MVOTMA) y SNAACC (Secretaría Nacional de Agua, Ambiente y Cambio Climático, hoy desaparecida). En este ámbito se mantuvieron reuniones de trabajo a distancia a efectos de comprender el marco teórico y de trabajo propuestos, así como el alcance de las principales metas y objetivos

La realización del presente proyecto y etapas futuras no fue, ni será factible

sin el involucramiento de los Ministerios y Direcciones, tanto de nivel nacional como infra nacionales vinculados a la gestión del agua. En segunda instancia, se debe contemplar la formación de recursos humanos que permitan la rápida incorporación de los conocimientos y herramientas generados, así como la mejora continua directamente vinculado al ámbito de la gestión. De no cumplirse con esta última condición, se generaría un nuevo aporte académico sin capacidad de transformación real de la configuración actual.

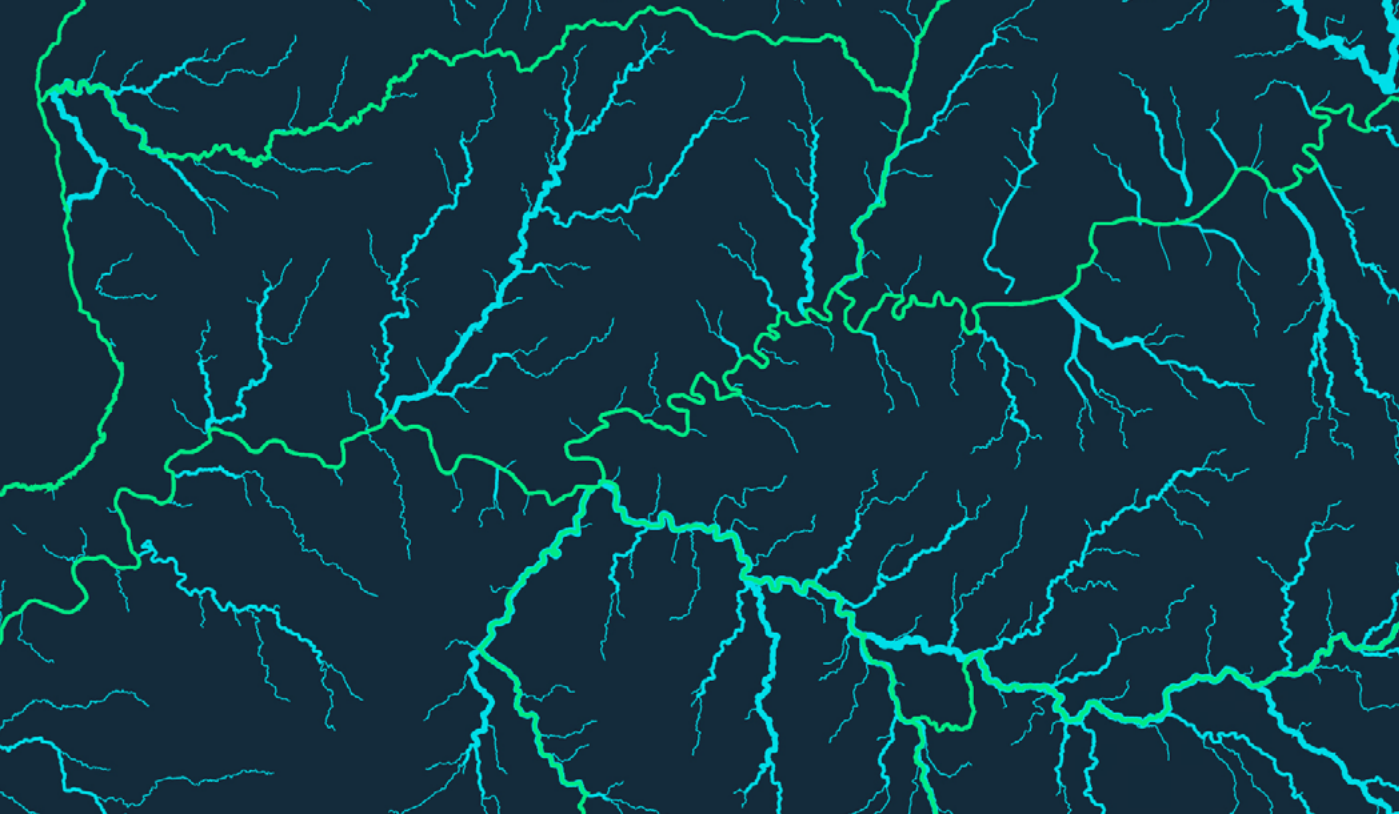
En el proceso histórico señalado existieron dos limitaciones importantes, por un lado, el desconocimiento o la incompreensión del marco conceptual y de trabajo propuesto. Por otra parte, el intercambio de información dentro del propio Estado ha presentado múltiples dificultades que comienzan a ser superadas en el pasado reciente debido a múltiples estrategias, por ejemplo, la creación de varias instituciones puente (Comisiones de Cuenca, Consejos Regionales, Observatorio Ambiental del MA, Mesas de Desarrollo Rural del MGAP, entre otros). El escenario actual es más propicio que 10 años atrás, sin embargo, la creación del Ministerio de Ambiente presenta múltiples desafíos por el momento no resueltos. La interacción con los cuadros técnicos del Ministerio de Ambiente durante el desarrollo del proyecto fue muy buena, sin embargo, las capacidades actualmente instaladas no permite continuar la construcción del sistema nacional de monitoreo en un lapso de tiempo razonable (de acuerdo a los desafíos planteados de la gestión) debido a los limitados recursos disponibles (humanos y económicos).

Los resultados del proyecto también contribuyen a fortalecer el actual sistema de gobernanza al proveer de herramientas que permiten evaluar con mayor fortaleza los distintos impactos antrópicos, información que puede ser visualizada y comprendida por el conjunto de actores y agentes involucrados, tanto públicos como privados. Al mismo tiempo, en el ámbito del Ordenamiento Territorial se generaron aportes relevantes que permitirán contar con una mayor capacidad de anticipación en el diseño y planificación del arreglo espacial de las actividades antrópicas, bienes y servicios ecosistémicos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Mazzeo N, Zurbriggen C, Steffen M, Barquín J, Gadino I, Díaz I, Ciganda AL, Goyenola G & Trimble M. 2019. Descentralización y centralización en la gestión del agua en Uruguay. En: Descentralización en Uruguay. Propuestas para avanzar en la agenda. Cardarelló A & Ferla P (coordinadores). Konrad-Adenauer-Stiftung e.V. Fundación Konrad-Adenauer Oficina Uruguay. pp: 59-72.
- 2.- Pahl-Wostl, C. 2015. Water Governance. Concepts, Methods, and Practice. Springer International Publishing Switzerland.
- 3.- Berkes, F., Colding, J. & Folke, C. 2003. Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change. Cambridge University Press, Cambridge.
- 4.- Norström A.V., Ch. Cvitanovic; M. F. Löff; S. West; C. Wyborn; P. Balvanera; A. T. Bednarek; E. M. Bennett; R. Biggs; A. de Bremond; B. M. Campbell; J. G. Canadell; S. R. Carpenter; C. Folke; E. A. Fulton; O. Gaffney; S. Gelcich; J. B. Jouffray; M. Leach; M. Le Tissier; B. Martín-López; E. Louder; M.F. Loutre; A.M. Meadow; H. Nagendra; D. Payne; G. D. Peterson; 1, B. Reyers; R. Scholes; Ch. I. Speranza; M. Spierenburg; M. Stafford-Smith; M. Tengö; S. van der Hel; I. van Putten; H. Österblom 2020. Principles for knowledge co-production insustainability research. Nature Sustainability. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0448-2>
- 5.- Chambers J.M.; C. Wyborn; M. E. Ryan; R. S. Reid; M. Riechers; A. Serban; N. J. Bennett; C. Cvitanovic; M. E. Fernández-Giménez; K. A. Galvin; B. E. Goldstein; N. L. Klenk; M. Tengö 15; R. Brennan; J. J. Cockburn; R. Hill; C. Munera; J.L. Nel; H. Österblom; A. T. Bednarek; E. M. Bennett; A. Brandeis; L. Charli-Joseph; P. Chatterton; K Curran; P. Dumrongrojwathana; A.P. Durán; S.J. Fada; J.D. Gerber; J.M.H. Green; A.M. Guerrero; T. Haller; A.I. Horcea-Milcu; B. Leimona; J. Montana; R. Rondeau; M. Spierenburg; P. Steyaert; J. G. Zaehring; R. Gruby, J. Hutton; T. Pickering . 2021. Six modes of co-production for sustainability. Nature Sustainability. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00755-x>
- 6.- Biggs, R., Schlüter, M. & Schoon, M.L. (eds). 2015. Principles for building resilience. Sustaining ecosystem services in social-ecological systems. Cambridge, Cambridge University Press.
- 7.- Peñas, F.J., Fernández, F., Calvo, M., Barquín, J. & Pedraz, L. 2011. Influence of data sources and processing methods on theoretical river network quality. *Limnetica* 30 (2): 197-216
- 8.- Benda, L., Miller, D. & Barquín J. 2011. Creating a catchment scale perspective for river restoration. *Hydrological Earth System Science* 15: 2995–3015
- 9.- Christie, A.P., Abecasis, D., Adjeroud, M., Alonso, J.C., Amano, T., Anton, A., Baldigo, B.P., Barrientos, R., Bicknell, J.E., Buhl, D.A., Cebrian, J., Ceia, R.S., Cibils-Martina, L., Clarke, S., Claudet, J., Craig, M.D., Davoult, D., De Backer, A., Donovan, M.K., Eddy, T.D., França, F.M., Gardner, J.P.A., Harris, B.P., Huusko, A., Jones, I.L., Kelaher, B.P., Kotiaho, J.S., López-Baucells, A., Major, H.L., Mäki-Petäys, A., Martín, B., Martín, C.A., Martin, P. A., Mateos-Molina, D., McConnaughey, R.A., Meroni, M., Meyer, Ch.F., Mills, K., Montefalcone, M., Noreika, N., Palacín, C., Pande, A., Pitcher, R., Ponce, C., Rinella, M., Rocha, R., Ruiz-Delgado, M.C., Schmitter-Soto, J.J., Shaffer, J.A, Sharma, S, Sher, A.A., Stagnol, D., Stanley, T.R., Stokesbury, K.D, Torres, A.,Tully, O., Vehanen, T., Watts, C., Zhao, Q., Sutherland, W. J. 2020. Quantifying and addressing the prevalence and bias of study designs in the environmental and social sciences. *Nature Communications* 11:6377.
- 10.- Fernández, D., Barquín, J., Álvarez-Cabria, M. & F. J. Peñas. F.J. 2012. Quantifying the performance of automated GIS-based geomorphological approaches for riparian zone delineation using digital elevation models. *Hydrological Earth Systems. Science* 16: 3851–3862.
- 11.- Fernández, D., Barquín, J., Álvarez-Cabria, M., Peñas, F.J. 2014. Land-use coverage as an indicator of riparian quality. *Ecological Indicators* 41: 165–174
- 12.- Álvarez-Cabria, M., Barquín, J., Peñas F, J. 2016. Modelling the spatial and seasonal variability of water quality for entire river networks: Relationships with natural and anthropogenic factors. *Science of the Total Environment* 545–546: 152–162
- 13.- Álvarez-Cabria, M., González-Ferreras, A.M, Peñas, F.J & Barquín, J. 2017. Modelling macroinvertebrate and fish biotic indices: From reaches to entire river networks. *Science of the Total Environment* 577: 308–318.
14. Mazzeo, N., Zurbriggen, C. Sciandro J, Trimble, M. Gadino, I, Pérez, D. 2021. Agua, ambiente y territorio: avances, barreras y desafíos en la gobernanza de los recursos hídricos. En Fin de un ciclo: balance del Estado y las políticas públicas tras 15 años de gobiernos de izquierda en Uruguay. Bidegain G, Freigedo M y Zurbriggen C (eds). Instituto de Ciencia Política, Facultad de Ciencias Sociales. pp: 505-529.
15. IHCantabria. 2012. Método III. Caracterización de variables geológicas y de usos del suelo (Informe de proyecto III; Development of a Spatial Framework for Integrated Catchment Management (MARCE).
16. Snelder, T. H., Pella, H., Wasson, J.-G., & Lamouroux, N. 2008. Definition Procedures Have Little Effect on Performance of Environmental Classifications of Streams and Rivers. *Environmental Management* 42(5):771-788.
17. Molfino, J. H. 2009. Estimación del Agua Potencialmente Disponible en los Grupos CONEAT. MGAP-INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4925/1/Molfino-J.H.-2009.-Estimacion-del-agua....pdf>
18. Peñas, F. J., Barquín, J., & Álvarez, C. 2016. Sources of variation in hydrological classifications: Time scale, flow series origin and classification procedure. *Journal of Hydrology* 538: 487-499.



CUENCAS VIRTUALES

BASES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA NACIONAL
DE MONITOREO DE RECURSOS HÍDRICOS

Contacto:

cuencasvirtuales@fcien.edu.uy