

## Cambios de uso del suelo e inundaciones en espacios urbanos en Uruguay: tres casos de estudio\*

Feline Schön + 

Marcel Achkar\* 

### Resumen

En este trabajo se analizan tres casos de estudio de cuencas en Uruguay, con el propósito de identificar los factores que favorecen la ocurrencia de inundaciones. Se consideran las transformaciones en los usos del suelo y eventualmente el cambio climático. Se evalúan para un periodo de treinta años las modificaciones de los usos del suelo, utilizando un Sistema de Información Geográfica y se analizan las variabilidades de las precipitaciones y de los niveles de los ríos. Las tres cuencas muestran un comportamiento totalmente distinto en su cambio de uso del suelo, y muestran tendencias a un aumento en las precipitaciones durante el periodo estudiado. Se evidencia que el cambio de uso del suelo es uno de los factores que más influye en el incremento de las inundaciones en las áreas urbanas. Estas transformaciones en su mayoría están relacionadas con la explotación de los suelos para la generación de commodities de exportación, y causan modificaciones en los territorios agrarios de Uruguay.

**Palabras clave:** cambio climático, cuenca, inundaciones, Sistema de Información Geográfica, Uruguay.

**Ideas destacadas:** artículo de investigación sobre el cambio de uso del suelo como uno de los factores que más influye en el aumento de las inundaciones en las áreas urbanas de Uruguay, con base en tres ejemplos, los cuales se analizan en cuanto a cuenca y se consideran las transformaciones en los usos del suelo y los cambios climáticos.



RECIBIDO: 24 DE JUNIO DE 2020. | EVALUADO: 7 DE FEBRERO DE 2021. | ACEPTADO: 11 DE OCTUBRE DE 2021.

### CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Schön, Feline; Achkar, Marcel. 2022. "Cambios de uso del suelo e inundaciones en espacios urbanos en Uruguay: tres casos de estudio." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 31 (2): 414-433. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.88561>

\* La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación con el código POS\_EXT\_2017\_1\_147332. El artículo brinda resultados de una investigación de doctorado.

+ Universidad de la República, Montevideo – Uruguay. ✉ [fschon@fcien.edu.uy](mailto:fschon@fcien.edu.uy) – ORCID: : 0000-0001-8222-5198.

\* Universidad de la República, Montevideo – Uruguay. ✉ [achkar@fcien.edu.uy](mailto:achkar@fcien.edu.uy) – ORCID: : 0000-0001-7082-8557.

✉ Correspondencia: Feline Schön, Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Facultad de Ciencias, Igúa 4225, Montevideo.

## Changes in Land Use and Flooding in Urban Spaces in Uruguay: Three Case Studies

### Abstract

In this paper, three case studies are analyzed in Uruguay at the basin level, to identify the factors that favor the flood phenomenon. Transformations in land use and eventually climate change are considered. Over a 30-year period, land use modifications were evaluated using a Geographic Information System, and the variability of rainfall and river levels was analyzed. The three basins show completely different behavior from their land use change, and show increasing trends in rainfall over the period analyzed. It is evident that land use change is one of the most influential factors in the increase of flooding in urban areas. These transformations are mostly related to the exploitation of soil for the generation of commodities for export and generate modifications in the agrarian territories in Uruguay.

**Keywords:** climate change, basin, floods, Geographical Information Systems, Uruguay.

**Highlights:** research article, land use change as one of the most influential factors in the increase of flooding in urban areas of Uruguay, based on three examples. Analyzing them at the basin level considering the transformations in land use and climate changes.

## Mudanças no uso do solo e inundações em espaços urbanos no Uruguai: três estudos de caso

### Resumo

Neste artigo, são analisados três estudos de caso das bacias no Uruguai, com o objetivo de identificar os fatores que favorecem a ocorrência de inundações. São consideradas as mudanças no uso do solo e eventualmente as mudanças climáticas. Também foram avaliadas, ao longo de um período de trinta anos as modificações no uso do solo, por meio de um Sistema de Informação Geográfica, e analisou-se a variabilidade da precipitação e dos níveis dos rios. As três bacias hidrográficas apresentam um comportamento totalmente diferente na mudança no uso do solo, e manifestam tendências crescentes de precipitação no período analisado. É evidente que a mudança no uso do solo é um dos fatores que mais influenciam o aumento das inundações nas áreas urbanas. Essas transformações estão principalmente relacionadas com a exploração dos solos para a geração de commodities de exportação e geram modificações nos territórios agrícolas do Uruguai.

**Palavras-chave:** mudança climática, bacia hidrográfica, inundações, Sistema de Informação Geográfica, Uruguai.

**Ideias destacadas:** artigo de pesquisa sobre mudanças no uso da terra como um dos fatores mais influentes no aumento das inundações em áreas urbanas do Uruguai, baseado em três exemplos, que são analisados em termos de bacia hidrográfica, considerando as transformações no uso do solo e as mudanças climáticas.

## Introducción

El cambio ambiental global es resultado de las transformaciones mundiales producidas por los modos de la producción capitalista (Ulloa 2017), que se caracterizan por modificaciones de procesos y estructuras ambientales de una manera irreversible (Steffen et ál. 2004). Esta crisis se expresa, entre otras, en la explotación de la naturaleza, la destrucción sistemática de ecosistemas, la mercantilización de la vida y el crecimiento de la desigualdad (Romero 2006). El cambio ambiental global implica el análisis de las modificaciones de los procesos climáticos y los cambios en el uso del suelo. Desde una mirada crítica, es necesario analizar las causas y también identificar estrategias de manejo del territorio, en las cuales las relaciones entre la sociedad y la naturaleza están en la base del enfoque (Blanco et ál. 2017).

Entre las consecuencias del cambio ambiental global se identifica el aumento de eventos extremos, tanto las sequías como las inundaciones en áreas urbanas que afectan cada vez más a las poblaciones locales. Una tendencia que según los pronósticos sigue incrementando (Birkmann et ál. 2010; Jha, Bloch y Lamond 2012; Xiao, Yi y Tang 2016).

Esta realidad también se puede encontrar en América Latina donde se han observado, en los últimos años, eventos climáticos extremos como inundaciones, sequías, lluvias torrenciales y drásticas variaciones en la temperatura (Santelices y Rojas 2016). Las desregulaciones se asocian al calentamiento global y a las perturbaciones de ecosistemas y paisajes, con importantes impactos sobre la producción económica, así como sobre las condiciones de vida de las poblaciones humanas (Steffen et ál. 2011).

El cambio ambiental en América Latina se muestra también en los cambios del uso de suelo. En el bioma Pampa, por ejemplo, se han observado intensivas transformaciones, desplazando pastizales y pasturas por monocultivos de raíces cortas de un manejo anual, como la soja y el maíz, que responde a una nueva demanda mundial por *commodities* agrícolas (García et ál. 2010; García et ál. 2018). Estas transformaciones van de la mano con cambios en la matriz productiva, con una pérdida de biodiversidad importante, y también aumenta la escorrentía superficial en momentos de precipitaciones. Esto implica la disminución en el tiempo de respuesta de infiltración y escurrimiento de los ríos frente al evento de precipitación, el caudal crece más rápido y puede incrementar el riesgo para la población local (Aguayo, Azocar y Henríquez 2006). Por lo cual, el uso del suelo

de una cuenca también tiene su vinculación con la variabilidad de eventos de inundaciones o sequías, ya que puede favorecer o reducir eventos extremos cuando su uso está directamente relacionado con el incremento o la disminución de la capacidad de infiltración del agua al suelo (Bernal 2017; Gallegos y Perles 2019).

La economía de Uruguay basada en la producción primaria, ganadería, agricultura y cadenas agroindustriales, presenta un aumento en su vulnerabilidad frente a las tendencias de variabilidad climática asociada al cambio ambiental global (Carrquiry, Lanfranco y Lozanoff 2007; Giménez et ál. 2009). La fuerte presencia del modelo agroexportador viene acompañado con la implementación de los monocultivos, la siembra directa y el avance de la frontera agrícola. Este desarrollo se implementa en la década de los noventa y se extiende en todo el país, tomando fuerza a partir de 2002, cuando la expansión e intensificación agrícola llegan a tierras que no se habían usado para este fin, debido a una demanda global de los nuevos *commodities* (García et ál. 2010). Estos cambios en el uso de suelo están afectando también al régimen hidrológico y por eso impactan la frecuencia o el tamaño de eventos de inundaciones en áreas urbanas. Mientras el sector agropecuario ha sufrido importantes sequías, un fenómeno climático se observa en aumento (Bidegain et ál. 2012; Caorsi et ál. 2018): en varios departamentos, entre un 5 % y un 15 % de la población tuvieron que evacuar sus hogares por eventos de inundaciones en 2015 (mvotma 2016).

En Uruguay por lo general los ríos tienen poca pendiente y una velocidad importante de llenado y de drenaje; además, por falta de contención frecuentemente salen de sus cauces e inundan áreas linderas (Conde, Rodríguez-Gallego y Rodríguez-Graña 2002). Alrededor del 50 % de las localidades, distribuidas en todo el territorio nacional, se encuentran parcialmente en áreas de humedales (Schön, Domínguez y Achkar 2018), que son un sistema de transición entre los ecosistemas acuáticos y terrestres que permanecen inundados gran parte del año (Achkar et ál. 2016); así mismo, la ubicación de los asentamientos frente al cauce genera uno de los problemas sociales más graves en el país.

La ubicación de las áreas urbanas en humedales constituye un factor de riesgo frente a inundaciones que afectan a las poblaciones humanas, ya que se trata de suelos bajos y generalmente forman parte de la planicie de inundación de los cursos de agua (Schön 2021). En cada departamento se encuentra por lo menos un 15 % de las localidades en áreas de humedales

y en total se ubica un 4,8 % de la población viviendo en áreas de humedales. Se muestra que mientras más grandes son las ciudades, una superficie mayor se encuentra en humedales y más se inundan, por ejemplo, todas las capitales departamentales se desarrollan parcialmente en áreas de humedales (Schön, Domínguez y Achkar 2018) como resultado de un desarrollo urbano sin planificación territorial adecuada, que interactúa con procesos de segregación y exclusión territorial (Schön, Domínguez y Achkar 2018). Durante las últimas décadas se viene observando que los eventos de precipitaciones y su intensidad han incrementado y se ha iniciado la generación de políticas de adaptación en algunas ciudades (Equipo Aguas Urbanas y Gestión de Riesgo 2014a, 2014b).

En el presente trabajo se demuestra, con base en tres casos de estudio, que el cambio de uso del suelo es uno de los factores que más influye en el aumento de las inundaciones en las áreas urbanas de Uruguay. Los tres casos son las cuencas de tres capitales departamentales, que están en diferente ubicación espacial y representan distintas situaciones de transformación de uso de suelo. Estas tres ciudades fueron identificadas como prioritarias para su análisis, en un trabajo que describe la situación de inundación de las localidades urbanas de Uruguay (Schön, Domínguez y Achkar 2018), y fueron analizadas en el contexto de sus cuencas hídricas. Las cuencas hídricas son sistemas territoriales complejos y su gestión ambiental constituye una estrategia fundamental para la mitigación de eventos extremos y disminución del riesgo para su población (Camarasa- Belmonte, Caballero y Iranzo 2018; Ferrando 2006; López, Camarasa y Mateu 2007). Se analiza en cada cuenca los factores que favorecen el fenómeno de inundaciones, y se consideran las transformaciones en los usos del suelo y los cambios climáticos que forman parte del cambio ambiental en el país. Así se demuestra las interrelaciones entre el uso de suelo y el nivel del río que indica inundaciones en las áreas urbanas.

## Área de estudio

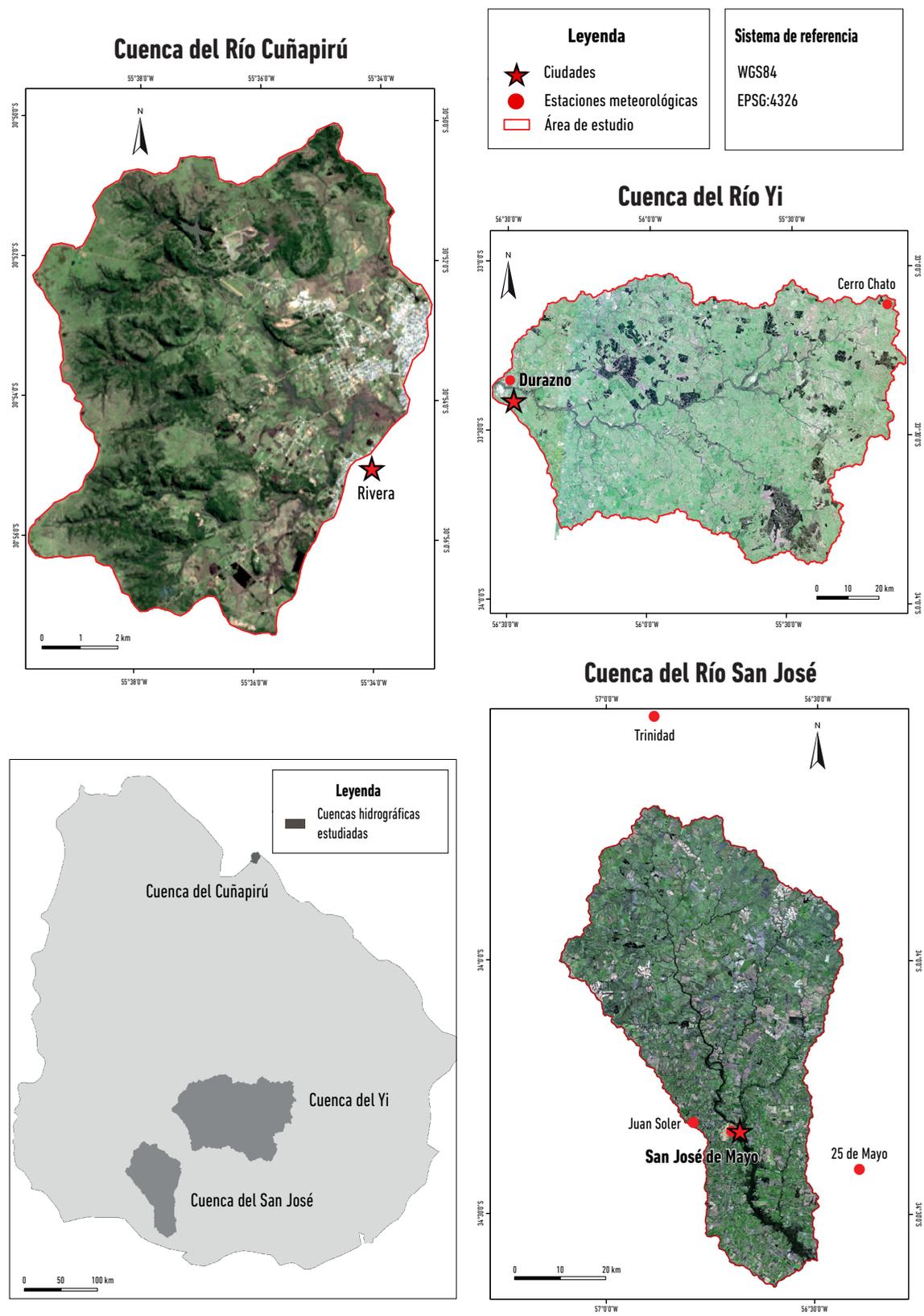
Uruguay se encuentra en el bioma Pampa, en la zona baja de la cuenca del río de la Plata, su ubicación geográfica es 30°-35° de latitud sur y de 56°-58° de longitud oeste. El clima es templado subtropical y no presenta una estación lluviosa, ya que el promedio de las precipitaciones se distribuye a lo largo del año (Achkar

et ál. 2016). En la Figura 1 se presentan los tres casos de estudio: la ciudad de San José de Mayo en el sur del país, con la cuenca del río San José; la ciudad de Durazno en el centro del país y la cuenca del río Yi; y la ciudad de Rivera en el norte del país con la cuenca del Cuñapirú. Los criterios tomados en cuenta para la selección de los casos de estudio fueron: el patrón espacial de las localidades en áreas de humedales, la presencia de eventos de inundación, la ubicación de por lo menos el 45 % de las secciones censales urbanas en humedales y la cantidad de inundaciones registradas por el Sistema Nacional de Emergencias de Presidencia de la República —en adelante, SINAER— (Schön, Domínguez y Achkar 2018; Schön 2021).

La cuenca del río San José ocupa una superficie de 3.565 km<sup>2</sup>, se encuentra en el sur del país, el relieve se caracteriza por colinas de pendientes fuertes al norte y lomadas redondeadas de pendientes moderadas a suaves en el centro sur. La cuenca cuenta además con importantes planicies fluviales asociadas a bañados permanentes y estacionales, donde los suelos predominantes son vertisoles y brunosoles (MGAP 1994). La ciudad más grande de la cuenca es San José de Mayo, con 36.743 habitantes (INE 2011), que forma parte del sistema urbano metropolitano de Montevideo, y se encuentra en la cuenca baja, por lo cual se estudió toda la cuenca del San José (véase figura 1).

La cuenca del río Yi, que ocupa una superficie de 13.580 km<sup>2</sup>, se encuentra en el centro del país en una zona de poca pendiente y se caracteriza históricamente con uso pastoril. La ciudad de Durazno, con 34.372 habitantes (INE 2011), es la más grande de la cuenca y es una de las ciudades que sufre más inundaciones en el país (Silveira et ál. 2015). El área estudiada implica gran parte de la cuenca, ya que Durazno se encuentra en la zona media de ella, donde se limitó el área de estudio, que tiene una superficie de 889.573 ha (véase figura 1).

La cuenca del Cuñapirú se encuentra en el norte del país y es de una importancia estratégica por su función de recarga del acuífero Guaraní. La ciudad más grande de la cuenca es Rivera con 78.900 habitantes (INE 2011), y está ubicada en las nacientes de la cuenca. Es una zona que se caracteriza por sierras rocosas, e históricamente el uso del suelo principal es ganadero extensivo mixto y un uso agrícola de chacras pequeñas y monocultivos forestales (Achkar et ál. 2004). El área estudiada, que es de las nacientes de la cuenca hasta la ciudad de Rivera, tiene una superficie de 9.415 ha (véase figura 1).



**Figura 1.** Localización de la cuenca de los ríos San José, Yi y Cuñapirú, ciudades y estaciones meteorológicas. Datos: elaborada a partir de imágenes satelitales Landsat 8.

## Metodología

La estrategia metodológica se basó en analizar la cuenca del río San José, del río Yi y del arroyo Cuñapirú para conocer las variables que influyen en el aumento de las inundaciones entre 1987 y 2019. Los análisis fueron realizados para un periodo de treinta años, que permiten evaluar tendencias climáticas (OMM 2011). Para este fin, se evaluaron las modificaciones en los usos del suelo en las tres cuencas a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG), con verificación en campo. Así mismo, se analizaron las variabilidades de las precipitaciones y de los niveles de los ríos, cuando son accesibles.

### Clasificación de uso del suelo

Para detectar las principales transformaciones de los usos del suelo en las cuencas en el periodo de estudio, se trabajó con imágenes satelitales de 1987 y 2017 en el caso del San José; y de 1987 y 2019 en lo que respecta al Yi y al Cuñapirú. Se considera este periodo, ya que permite comparar con las series de precipitaciones de treinta años y además incluye una fecha anterior al tiempo de intensificación agraria que se procesa en Uruguay, según los resultados obtenidos por Díaz et ál. (2018), Domínguez et ál. (2018) y Gazzano, Achkar y Díaz (2019). El ciclo hidrológico se modifica sustancialmente por la intensificación productiva, por esta razón se vincula de forma directa con impactos negativos a la capacidad de regulación del suelo frente a posibles eventos de inundación (Benavides et ál. 2018; Rollán y Bachmeier 2014). Para ello se descargó del sitio web del Servicio Geológico de EE. UU. (USGS por sus siglas en inglés), una imagen TM/Landsat-5 por cuenca para 1987, con las fechas del 09.06.1987 para la cuenca del San José, del 09.11.1987 para la cuenca del Yi y del 31.10.1987 para la cuenca del Cuñapirú. Además, una imagen TM/Landsat-8 de la cuenca del Yi del 21.09.2019 y una del 21.09.2019 de la cuenca del Cuñapirú. Del sitio web de Copernicus Open Access Hub se descargó una imagen MSI/Sentinel-2 para el caso de San José de 2017.

En las cuencas hidrográficas se analizó el uso de suelo a escala 1:30.000, ampliando el nivel de detalle en las zonas urbanas a escala 1:10.000. Se realizaron clasificaciones supervisadas de las imágenes satelitales por medio del método de distancias mínimas para cada una de las cuencas, y se consideraron entre cinco y seis clases dependiendo de la característica específica de cada cuenca. Estas representan en todas las cuencas la categoría del *Campo natural* que es la clase más genérica, ya que está conformada por pastizales de diferente productividad. Por su

parte, la clase *Infraestructura* incluyó zonas industriales, residenciales y de caminería. En las cuencas del San José y del Yi, en la categoría de *Cultivos* se incluyeron parcelas de praderas plantadas con fines forrajeros, puesto que sustituyen por completo la cobertura vegetal y presentan una firma espectral similar a los cultivos; también se incluyeron zonas de suelo descubierto, debido a que estas superficies se encuentran asociadas a unidades agrícolas. Por la ausencia de cultivos en la cabecera de la cuenca del Cuñapirú, para esta área no se aplicó esta categoría. Después, se estableció la categoría de *Monte nativo/Bosque* que en su mayoría está representada por bosques ribereños, pero en el caso de la cuenca del San José incluye de igual forma los cultivos forestales, porque no se encuentran grandes superficies forestadas. En las otras dos cuencas se generó la categoría *Cultivo forestal* en la cual se unen los montes de abrigo y las grandes superficies forestadas de la industria forestal. Además, se trabajó con la categoría de *Cuerpos de agua* en la cuenca del San José y en la del Cuñapirú; y por último, la categoría de *Humedales* en la cuenca del Cuñapirú y del Yi, que representa áreas bajas que no están cubiertas por árboles y que se diferencian del campo natural por permanecer inundadas en forma permanente o la mayor parte del año.

### Precipitaciones

En el contexto de cambio climático actual se dan tendencias de aumento de las precipitaciones tanto acumuladas como eventos extremos, con diferencias estacionales (Bidegain et ál. 2017). Por lo cual se trabajó con las series de precipitaciones históricas de 1987 a 2018 de tres estaciones meteorológicas en la cuenca del San José: Juan Soler, 25 de Agosto y Trinidad; con las series de dos estaciones meteorológicas en la cuenca del Yi: Ciudad de Durazno y Cerro Chato; y con una serie de la estación meteorológica en la cuenca del Cuñapirú: Ciudad de Rivera (véase figura 1). La información fue proporcionada por el Instituto Uruguayo de Meteorología —en adelante, INUMET—. Para evaluar tendencias en las series generadas de precipitaciones acumuladas por estación, se aplicó el test Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975). Este es un test no paramétrico que evalúa comportamientos monótonos de series de datos y ha sido ampliamente utilizado para evaluar tendencias en series temporales hidrometeorológicas (Alvarino et ál. 2018; Caorsi et ál. 2018; Hirsch y Slack 1984). Este test de tendencias también fue usado para el índice R20 (Haylock et ál. 2006; Zhang et ál. 2011), que considera los eventos diarios extremos, cuando la

precipitación diaria acumulada sobrepasa los 20 mm, un procedimiento recientemente usado en la cuenca del Plata (Bidegain et ál. 2017).

### Nivel del caudal

En las ciudades de San José y Durazno se analizaron las tendencias de las crecidas con la finalidad de evaluar el posible incremento en la frecuencia de estos eventos en términos generales y estacionales. Se exploró la presencia de tendencias mediante el test Mann-Kendall. Los datos fueron proporcionados por la Dirección Nacional de Aguas (Dinagua). En Rivera no fue posible este análisis, ya que no existe una toma del nivel del Cuñapirú, por lo cual se trabajó con los registros del SINAE (2019) sobre los eventos de inundaciones registrados en la ciudad de Rivera, interrelacionándolos con los datos de la serie

de precipitaciones y, además, se consultó a técnicos de la Intendencia de Rivera sobre la situación y las tendencias de los eventos de inundación en la ciudad.

### Resultados

Los resultados de las clasificaciones de uso del suelo y cambios detectados en las tres cuencas entre 1987 y 2017/2019, se presentan en la Tabla 1 y la Figura 2. Además, se exponen las tendencias de las precipitaciones en las cuencas entre 1987 y 2018, las tendencias del nivel de los ríos San José en la ciudad San José de Mayo y del Yi en la ciudad de Durazno en el mismo periodo. Así mismo, se relacionan los eventos de inundaciones registrados por el sinae (2019) con las precipitaciones en la ciudad de Rivera entre 1987 y 2018.

**Tabla 1.** Variaciones en los usos del suelo de las tres cuencas expresadas en porcentaje sobre la superficie total de la cuenca

Uso (%)	Cuenca					
	San José		Yi		Cuñapirú	
	1987	2017	1987	2019	1987	2019
Bosque/monte	14,6	5,9	3	3,6	35	35
Campo natural	69,5	58,4	77,7	60,7	45	42,7
Humedal	-	-	11,3	8,8	14,5	9
Cultivos	15,6	34,8	6,3	17,3	-	-
Cultivo forestal	-	-	0,4	8,3	0,2	1
Infraestructura	0,3	0,6	1,3	1,3	5	12
Cuerpos de agua	0,1	0,2	-	-	0,3	0,3

Fuente: Schön 2021.

### Cuenca del San José

Los resultados de las clasificaciones de usos del suelo a partir de imágenes satelitales de los años 1987 y 2017 en la cuenca del San José sugieren que hubo transformaciones importantes en los usos del suelo, principalmente asociada a la expansión de monocultivos cerealeros y a la disminución de áreas destinadas a pastizales mejorados y praderas para la actividad ganadera-lechera (véase figura 2).

En 1987 los pastizales y las praderas naturales predominaban en el uso del suelo de la cuenca del San José, cubrían aproximadamente el 69,5 % de la superficie total y se asociaban en especial a la producción forrajera. Mientras que el área destinada a cultivos cubría un 15,6 %, los bosques ocupaban un 14,6 % de la cuenca y los cuerpos de agua representaban el 0,1 % y la infraestructura el 0,3 %. La superficie destinada a cultivos se ubicaba principalmente

en la zona sur de la cuenca y en la zona norte predominaban los pastizales y las praderas (categoría campo natural) vinculados a ganadería extensiva (véase figura 2).

En 2017, el uso predominante en la cuenca son los monocultivos cerealeros (soja, maíz, sorgo), los cuales cubren aproximadamente el 34,8 % de la superficie de la cuenca. Este aumento de la superficie cultivada se debe a la expansión agrícola en el norte de la cuenca. La categoría del campo natural disminuye un 58,4 % de la cuenca. Como también los bosques que reducen su presencia y en la actualidad cubren el 5,9 % de la superficie. Tanto la infraestructura como los cuerpos de agua no han pasado por grandes cambios, aumentaron mínimamente en su superficie a un 0,6 % la infraestructura y a un 0,2 % los cuerpos de agua (Figura 2).

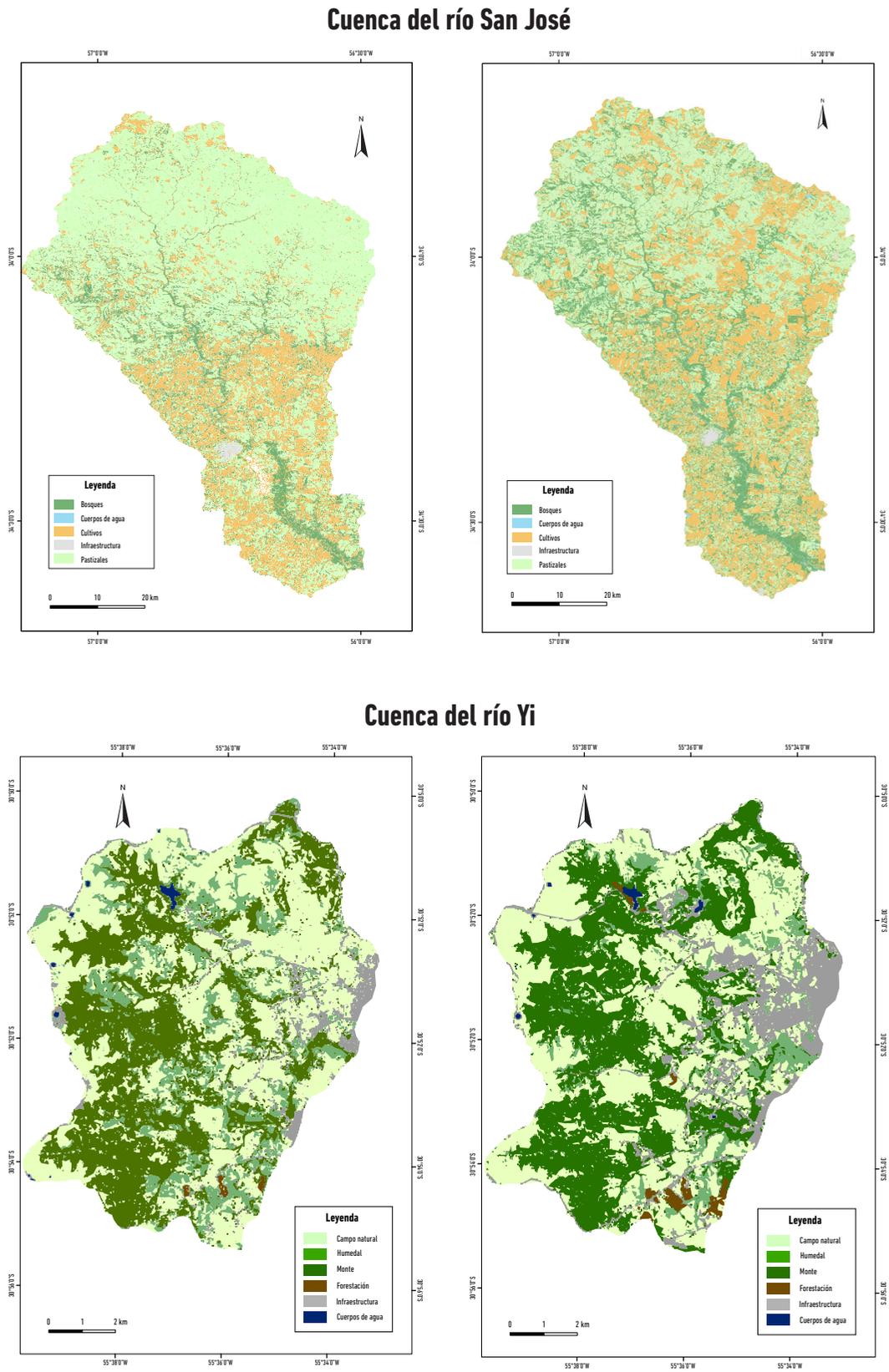
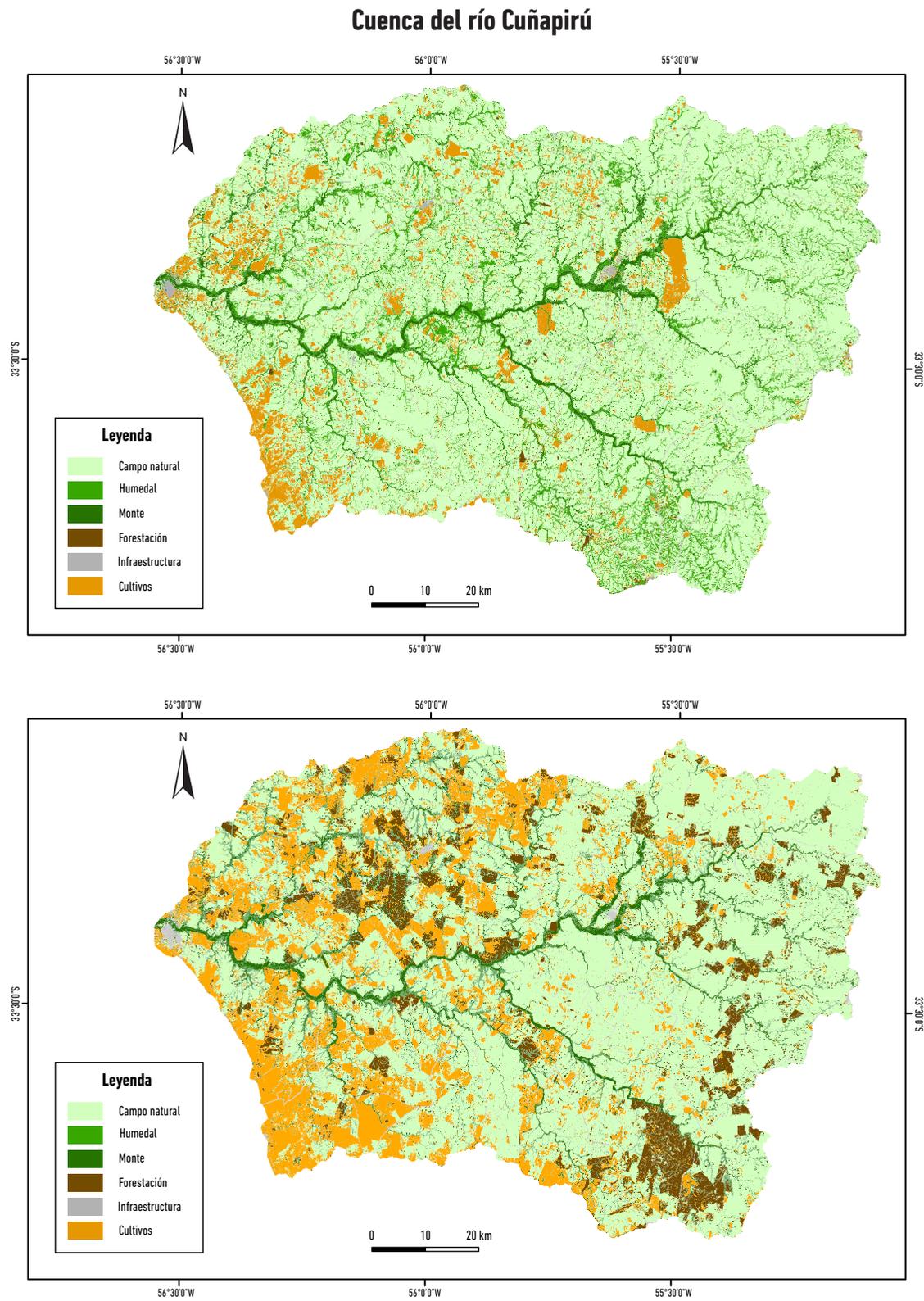


Figura 2. Cambios en el uso de suelo en las tres cuencas estudiadas.  
Fuente: Schön 2021.



**Figura 2.** Cambios en el uso de suelo en las tres cuencas estudiadas.  
Fuente: Schön 2021.

El análisis de las series de precipitaciones realizado a partir de la sumatoria estacional de precipitaciones acumuladas arrojó resultados estadísticamente significativos o parcialmente significativo de tendencia creciente en invierno para las tres estaciones de la cuenca del San José entre 1987 y 2018. En los eventos de precipitaciones fuertes mayores a 20 mm (R20), se ve en las tres series de la cuenca una tendencia de aumento durante el invierno en la Figura 3 se muestra la situación de Juan Soler como ejemplo para la cuenca del río San José.

En la ciudad de San José de Mayo se muestra una tendencia creciente significativa de niveles del caudal superior a 5 y 7 metros en invierno (a partir del nivel 5 comienza el desborde y el proceso de inundación en áreas urbanas de la ciudad), que es superior a las detectadas de las series de precipitación, puesto que la sumatoria de eventos diarios superiores al R20 durante el invierno y de los eventos superiores a 5 metros presentaron diferencias estadísticamente significativas (véase figura 3). Aunque las inundaciones registradas por el SINAE (2019) entre 1987 y 2018 surgen en todas las estaciones, ya que cinco fueron registradas en verano, cinco en otoño, tres en invierno y dos en primavera. El evento de inundación que afectó más a la población fue en verano de 1998 y se evacuaron 1.600 personas; en la Figura 4 se puede identificar el área de riesgo por los eventos de inundación.

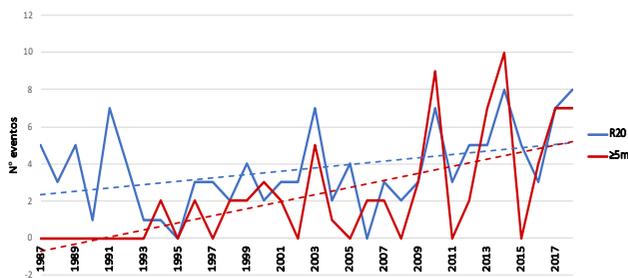
### Cuenca del Yi

Los resultados de las clasificaciones de usos del suelo a partir de imágenes satelitales de 1987 y 2019 en la cuenca del Yi sugieren que hubo transformaciones importantes en los usos del suelo, principalmente asociadas a la expansión de monocultivos cerealeros y el aumento de áreas dedicadas a la industria forestal; estas tendencias implican la disminución del campo natural (véase figura 2).

En la cuenca del Yi la mayor parte del área de estudio se identifica por *Campo natural* para 1987 con un 77,7 %, seguido por la categoría de *Humedales* con un 11,3 % y *Áreas cultivadas* con un 6,3 %. El *Monte nativo* que en su mayoría es bosque ribereño ocupa solo un 3 % del área. La *Infraestructura* está representada con un 1,3 % y el *Cultivo forestal* con un 0,4 %; en esta época en su mayoría son montes de abrigo, solo se encuentran pequeños parches de *Cultivos forestales* en el área de estudio (véase figura 2).

En 2019 disminuye el *Campo natural* de la cuenca a un 60,7 %, también los *Humedales* reducen a un 8,8 %. El *Monte nativo* prácticamente mantiene su superficie con un 3,6 %. La *Infraestructura* permanece igual con

un 1,3 % y aumenta significativamente la superficie dedicada al *Cultivo forestal* con un 8,3 % debido a la presencia de la industria forestal y también el cultivo que ocupa actualmente un 17,3 % de la cuenca, con lo que llega casi a triplicarse durante el periodo analizado (véase figura 2).



**Figura 3.** Precipitaciones diarias en la estación Juan Soler y nivel del río San José durante el invierno.

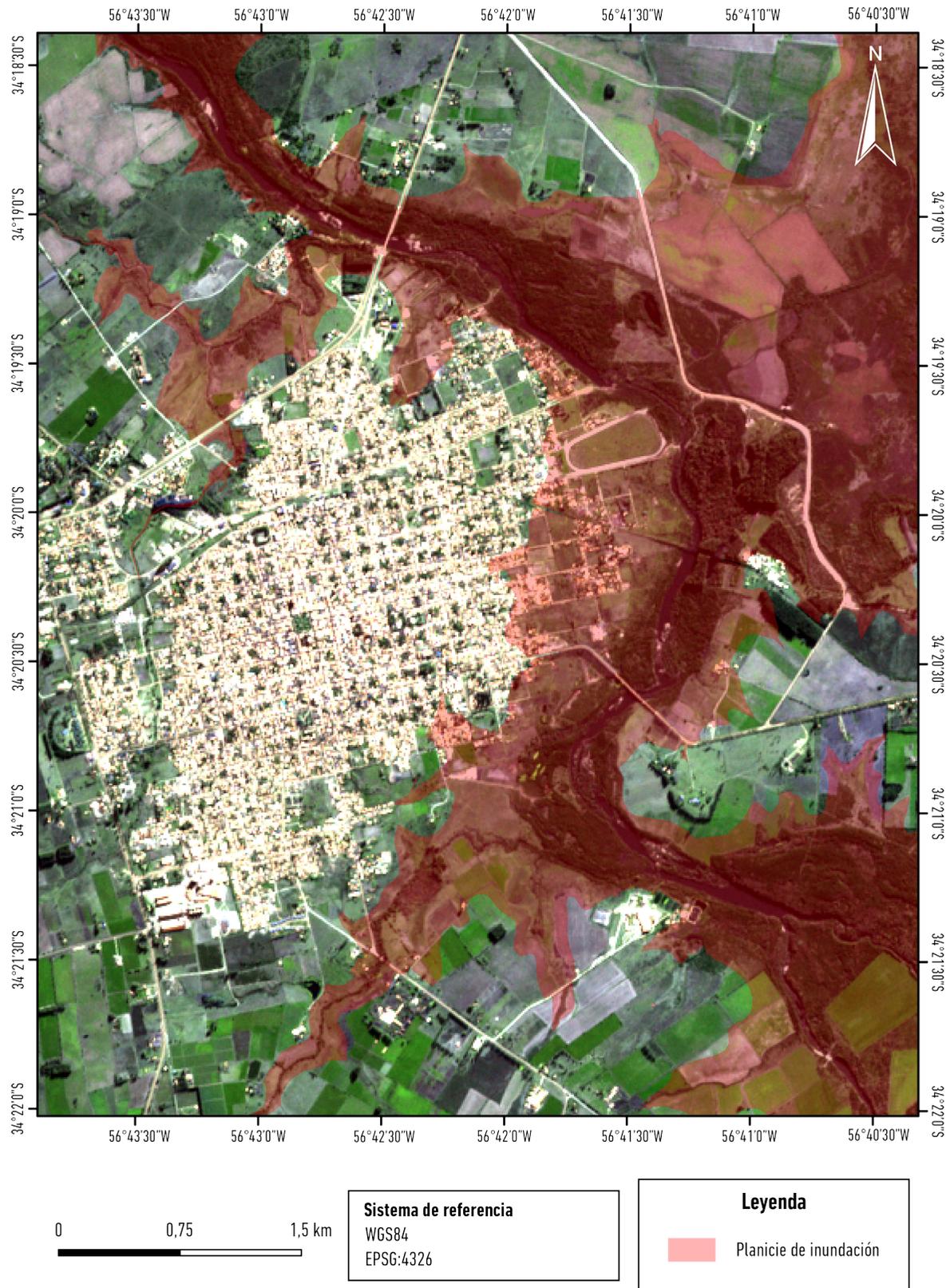
Datos: elaborado con base de datos de INUMET 2019.

*Nota:* en azul se presenta la suma de eventos de precipitación y su tendencia (línea punteada), y en rojo el nivel del río en San José de Mayo y su tendencia (línea punteada).

También en la cuenca del Yi, en la ciudad de Durazno se muestra en el análisis de la serie de las precipitaciones un resultado estadísticamente significativo de tendencia creciente en invierno entre 1987 y 2018. Pero en la zona de las nacientes, representada por la serie de precipitaciones de Cerro Chato, no se encuentran tendencias de aumento en las precipitaciones por el test de Mann-Kendall. En la serie de precipitaciones diarias mayores a 20 mm (R20) en Durazno se encuentra una tendencia de incremento durante el invierno (Figura 5).

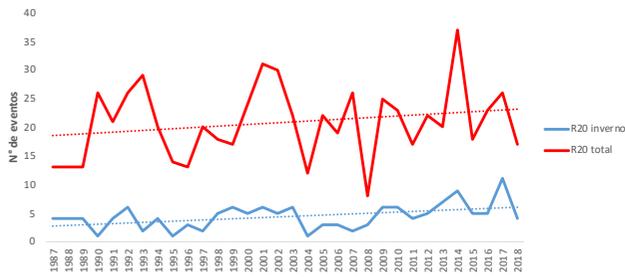
En la ciudad de Durazno se muestra un aumento del nivel del río en la serie 1987-2018. Al enfocar los días de riesgo de inundación urbana moderado (7,5 m) y riesgo alto (8,5 m) también se puede verificar una tendencia de aumento general con el test Mann-Kendall, y de igual forma en otoño-invierno se muestra una tendencia estadística significativa, que no se presenta en primavera-verano. Al analizar solo los días cuando el río muestra un riesgo alto para la sociedad duraznense, se muestra la misma tendencia de incremento en su nivel de cauce con el test de Mann-Kendall.

En Durazno fueron 31 eventos de inundación registrados entre 1987 y 2018, según el SINAE (2019), y su máxima evacuación y autoevacuación llegó a un total de 6.500 personas en 2007; los eventos de inundación surgen en el periodo analizado en todas las estaciones: diez en primavera, tres en verano, once en otoño y ocho en invierno. En la Figura 6 se identifica el área de riesgo por eventos de inundación en la ciudad de Durazno.



**Figura 4.** Área de riesgo por inundaciones en San José de Mayo.

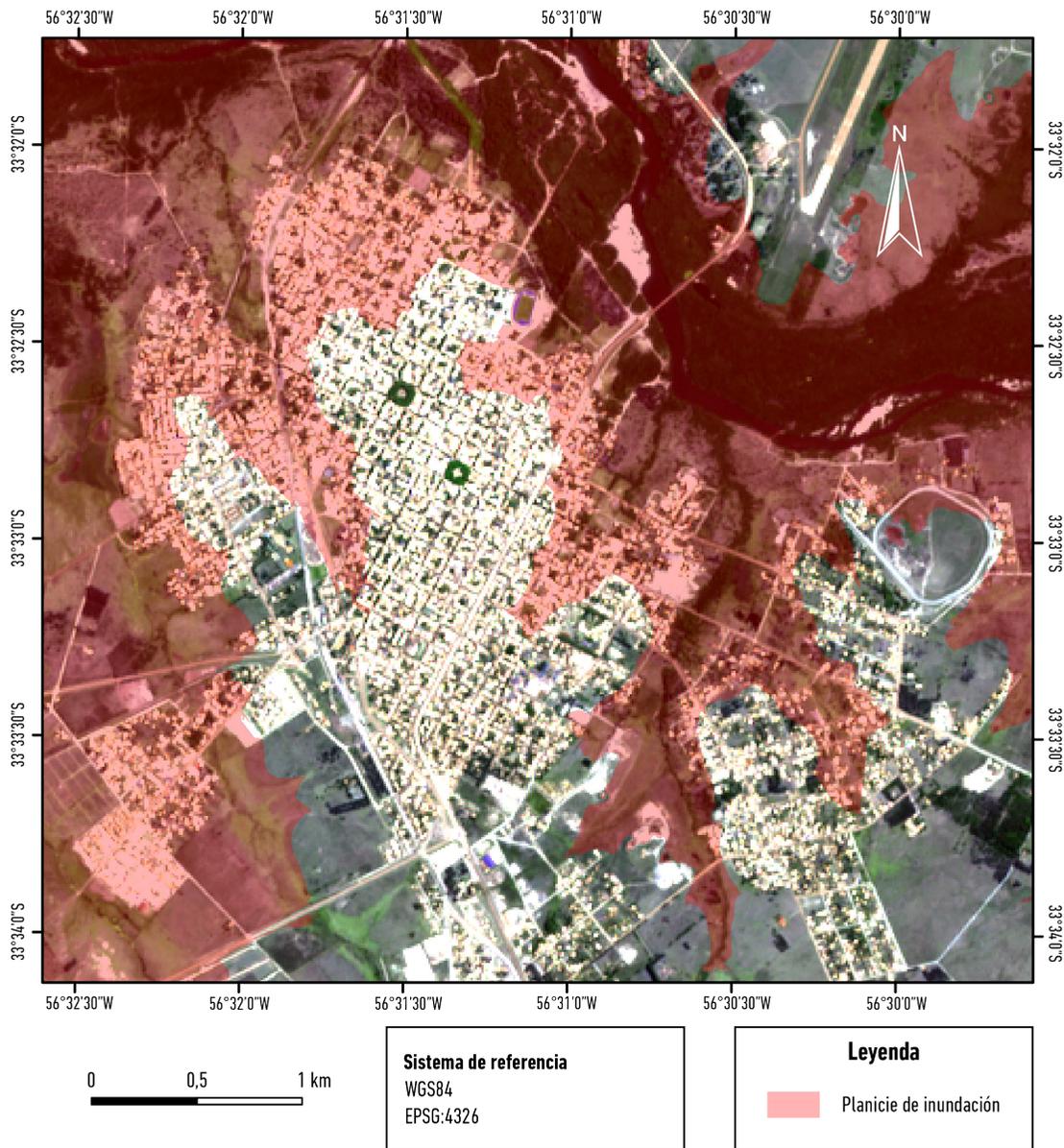
Datos: fotografías aéreas de 1966 presentadas en la imagen satelital MSI/Sentinel-2 del 10 de junio de 2017.



**Figura 5.** Precipitación diaria r20 en invierno y general en Durazno. Datos: elaborado con base de datos de INUMET 2020. Nota: suma de los eventos diarios de precipitación invernal (línea azul continua) mayores a 20 mm en la estación Durazno y durante todo el año (línea roja continua), y sus respectivas líneas de tendencia (líneas de puntos).

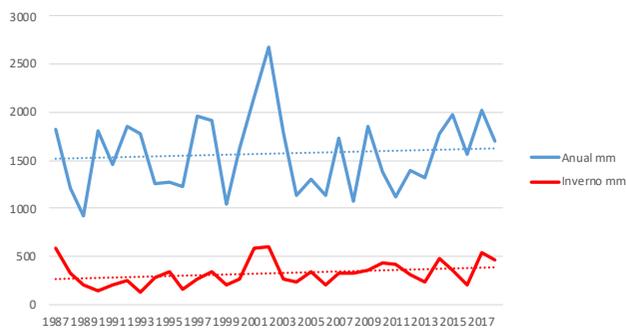
**Cuenca del Cuñapirú**

En la cabecera del Cuñapirú disminuyó el *Campo natural* y los *Humedales* que ocupaba el 45 % y el 14,5 % de la superficie en 1987, al pasar al 42,7 % y al 9 %, respectivamente, en 2019. Además, aumentó la *Infraestructura*, de 5 % a 12 %, por la expansión urbana de la ciudad de Rivera, al ocupar principalmente áreas de humedales. El *Monte natural* se mantuvo durante el periodo analizado en un 35 %, igual que los cuerpos de agua, que ocupan un 0,3 % de la superficie, e incrementó el *Cultivo forestal* de un 0,2 % a un 1 % (véase figura 2).



**Figura 6.** Área de riesgo en Durazno. Datos: basados en MDT de IDEUY sobre imagen satelital Sentinel 2 del 20 de enero de 2021.

También en la cuenca del Cuñapirú la serie de precipitaciones a partir de la sumatoria estacional de las precipitaciones acumuladas muestra un resultado estadísticamente significativo de tendencia de aumento en invierno en la ciudad de Rivera (1987-2018) (Figura 7). No se muestra ninguna tendencia del índice  $r_{20}$  por estaciones, pero sí en agosto que se encuentra en la estacionalidad de invierno. El Cuñapirú no cuenta con una toma de cota en Rivera, por lo cual no se ha podido analizar el nivel del río en relación con las precipitaciones.



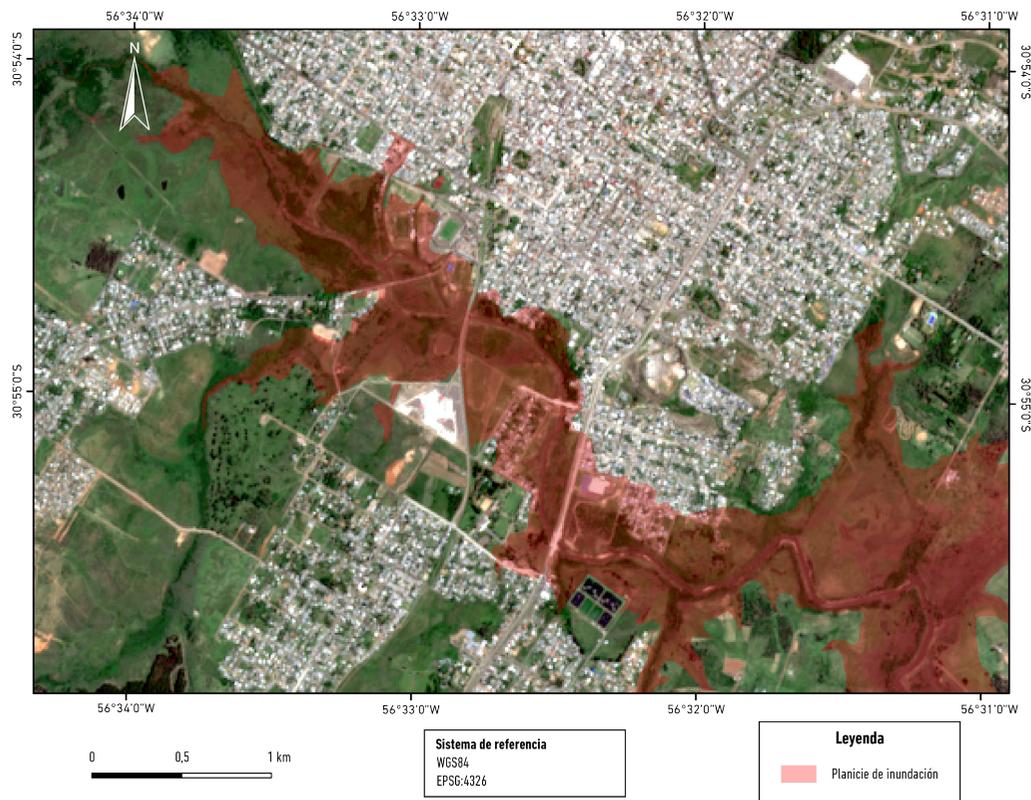
**Figura 7.** Precipitación acumulada en Rivera.

Datos: elaborado con base en datos de INUMET (2020).

*Nota:* suma de precipitaciones (mm) por año (línea azul continua) y en invierno (línea roja continua), y sus respectivas líneas de tendencia (líneas punteadas).

Al considerar los datos del SINAÉ (2019) de los eventos de inundaciones registrados, no se reconocieron eventos en invierno, pero sí en todas las otras estaciones: tres en primavera, seis en verano y cinco en otoño. En su mayor evento de inundación, que fue en verano de 2015, se evacuaron y autoevacuaron en total 1.051 personas. Se muestra además un aumento en los eventos de inundaciones según el registro del SINAÉ (2019) entre 1987 y 2018.

Analizando los datos de precipitación en relación con los momentos de inundaciones registradas, no se muestra una correlación entre el evento y las precipitaciones. Se observa que la cantidad de precipitación varía mucho para que se registre un evento con evacuados. Así mismo, se registra una precipitación acumulada durante tres días, de 0,5 mm hasta de 227,9 mm que llevan a evacuaciones en la ciudad. Como Rivera se ubica cerca de las nacientes del Cuñapirú, tampoco pueden incidir mucho las precipitaciones acumuladas, ya que desde cuando se registran las precipitaciones el agua demora no más de 20 minutos en llegar a la ciudad. Una observación que también fue confirmada por técnicos de la Intendencia de Rivera que además explicaron que puede ser que con precipitaciones de 40 mm se inunda gran parte de la ciudad o 100 mm sin que haya que evacuar, se monitorea en el momento



**Figura 8.** Área de riesgo de eventos de inundación en Rivera.

Datos: basado en MDT de IDEUY sobre imagen satelital Sentinel 2 del 20 de enero de 2021.

conociendo los barrios afectados, pero no se maneja un indicador de precipitaciones o niveles del río. En la Figura 8 se identifica el área de riesgo frente a eventos de inundación en la ciudad de Rivera.

## Discusión

Los principales cambios en los usos del suelo en la cuenca del San José y en la del Yi están relacionados con el aumento de la superficie agrícola y la implementación de los monocultivos con técnicas de siembra directa (MGAP 2009). Esta innovación conlleva impactos ambientales como la compactación del suelo y procesos de erosión (Chamorro y Sarandón 2017; Gaitán et ál. 2017; REDES 2011), que disminuyen la infiltración del agua al suelo (Pinto y Piñeiro 2018).

En la cuenca del San José, con la clasificación del uso del suelo (julio de 2017) y en las salidas de campo, otoño de 2019, se identificaron grandes superficies de suelo descubierto. Se observa un aumento significativo en la superficie destinada al cultivo en la región del norte de la cuenca, donde antes predominaban pastizales vinculados a la ganadería extensiva, ya que antiguamente solo al sur, en las cercanías de la ciudad de San José de Mayo, se cultivaba. Los suelos con altos contenidos de arcillas y con escasez de cobertura vegetal de raíces profundas tienden a compactarse, disminuye su capacidad de infiltración y generan una capa superficial y subsuperficial impermeable (Hamza y Anderson 2005; Vallejos et ál. 2014). Estas tendencias aumentan la escorrentía superficial y disminuye, por lo tanto, la regulación de inundaciones.

En la cuenca del Yi se ha implementado, además de los monocultivos cerealeros, monocultivos forestales. Como consecuencia de estas tendencias se pierden muchos territorios de pastizales naturales que tienen una riqueza en especies de distintos largos en las raíces. En esta cuenca, como en varias zonas del país, ha aumentado la superficie de las áreas forestadas significativamente, debido a que en 1987 se implementó una nueva ley forestal, la Ley n.º 15.939, que exonera tributos para áreas forestadas, subsidios estatales e indica áreas prioritarias para estos cultivos. Una de las características del suelo cubierto con monocultivos forestales es la disminución de la capacidad de mantener el agua en comparación con el campo natural cubierto con pasturas, se disminuyen las escorrentías y como consecuencia también los caudales altos (Silveira, Alonso y Martínez 2006), lo que explica que no se registre un aumento mayor de las inundaciones en la zona baja de la cuenca.

La expansión urbana registrada en la cuenca del Cuñapirú afecta las áreas de humedales de la ciudad y tiene un rol importante en las dinámicas de inundaciones. Se puede observar una expansión hacia el oeste, donde se encuentran las nacientes, pero también una densificación hacia el sur, donde se urbanizan partes del humedal.

Debido a estas circunstancias ha disminuido la superficie de *Campo natural*, *Monte nativo* y *Humedales* en las tres cuencas. Una tendencia preocupante, ya que estos aportan a la regulación del sistema hidrológico, incrementan el tiempo de retención hídrica, favorecen la purificación de aguas, controlan la erosión y la exportación de nutrientes orgánicos, así como son hábitats de numerosas especies autóctonas.

Las tres cuencas muestran un comportamiento totalmente distinto de su cambio en el uso de suelo. La cuenca del San José se ha transformado en una cuenca casi completamente ocupada por agricultura. La cuenca del Yi tiene una presencia importante de la agricultura, pero también un porcentaje significativo de la superficie que se dedica al *Cultivo forestal*. En cambio, la cabecera de cuenca del Cuñapirú no ha pasado por el mismo proceso, ya que la transformación más significativa que se registra es el aumento en el suelo urbano, pero en las tres cuencas los cambios en el uso del suelo repercuten en la disminución de la infiltración y el aumento del escurrimiento superficial del agua de las precipitaciones. Procesos que colaboran en que las tres ciudades registran un incremento de los eventos de inundaciones importantes, que han afectado a la población.

Las tendencias en las precipitaciones en el periodo analizado en los tres casos de estudio muestran un aumento de precipitaciones en invierno, menos en la estación Cerro Chato en las nacientes del río Yi, que se encuentra ubicado en la cercanía de las Sierras del Este que podrían tener una influencia en el régimen de las precipitaciones.

Además, en las tres estaciones meteorológicas de la cuenca del San José y en la ciudad de Durazno, se muestra un aumento durante el invierno en la serie de precipitaciones diarias mayores a 20 mm (R20). Solamente en la cuenca del Cuñapirú no se localiza esta tendencia, pero se encuentra una tendencia de aumento del r20 en agosto.

Estos resultados coinciden con el trabajo de Bidegain et ál. (2017) en el cual se identifican precipitaciones acumuladas y de R20 para la cuenca del Plata entre 1971 y 2015, aunque estas se reportan entre primavera y verano. De la misma manera, se muestra para el bioma Pampa comparando 1930-1960 con 1971-2000 en la temporada cálida un aumento de precipitaciones (Castaño et ál.

2007). También en el país se observan tendencias crecientes de precipitaciones para el oeste en primavera-verano (Bidegain et ál. 2012).

Por lo tanto, la tendencia de aumento en las precipitaciones coincide con las tendencias que fueron evaluadas para la región, aunque se observa una diferencia en la estacionalidad. Esto se podría asociar con efectos de parches o heterogeneidad espaciales de eventos extremos y acumulados (Frich et ál. 2002), lo cual genera distribuciones estacionales diferenciales de las inundaciones en los tres casos de estudio.

Los niveles del río San José también indican una tendencia de aumento en invierno, los cuales presentan menor magnitud que la tendencia detectada para r20 en la misma estación. Por esta razón, la tendencia de incremento del nivel del río no se podría explicar solamente por el aumento de las precipitaciones. Este resultado se podría explicar por un incremento de la escorrentía superficial, debido a la disminución de la capacidad de infiltración del suelo, resultante del aumento en el uso agrícola intensivo (Holman et ál. 2003; Viglione et ál. 2016). La coincidencia del aumento de precipitaciones y del momento de mayor superficie de suelos descubiertos, con el incremento del caudal, indica que el uso de suelo y los cambios que se han desarrollado podrían explicar en parte la diferencia entre la tendencia de precipitaciones y de los niveles altos del caudal, ya que, en la cuenca del San José, se observa un aumento significativo de la superficie cultivada. Aun así, la tendencia de incremento de caudal no implica que los eventos de inundaciones, que generan evacuados, surjan solo en invierno, sino que se desarrollan a lo largo del año con mayor presencia en verano y otoño, seguramente vinculados a procesos de compactación del suelo ocurrido en los periodos invernales de lluvias intensas y suelos descubiertos.

A pesar de que en la cuenca del Yi se observa un aumento significativo de la superficie cultivada, no se muestra el mismo comportamiento del caudal como en la cuenca del San José. No se especifica tan claramente el aumento del nivel de caudal en invierno, sino se muestra una tendencia de incremento del nivel de caudal en el periodo analizado en general y en las estaciones de otoño e invierno.

Las principales diferencias entre las dos cuencas se muestran en la magnitud de la superficie cultivada en la cuenca del San José y la presencia de los cultivos forestales en la del Yi. Por lo cual, la cuenca del Yi se tiene que entender como una cuenca de variados usos y no representativa en su comportamiento como una cuenca

dedicada al cultivo cerealero ni al *Cultivo forestal*. Se podrían explicar las diferencias en el comportamiento del caudal en el Yi con una menor superficie dedicada a los cultivos que implica suelos desnudos en el momento de las grandes precipitaciones en invierno, pero también puede afectar la disminución de escorrentías y el aumento en la infiltración debido al *Cultivo forestal* (Silveira, Alonso y Martínez 2006).

La cuenca del Yi no se puede analizar como una cuenca forestal, si se comparan los resultados con estudios realizados en el país sobre el comportamiento hídrico de cuencas forestadas, que se basan en cuencas con mayor presencia forestal, más del 10 % (Silveira, Alonso y Martínez 2006). Esto se muestra también al confrontar los resultados: los estudios de microcuencas, de 70 ha a 100 ha, y de macrocuencas, mayor a 1.000 km<sup>2</sup>, muestran una disminución alta de caudales y de la escorrentía superficial y general. Un comportamiento que no se refleja en la cuenca del Yi, pues se observa una tendencia de aumento en eventos altos de caudal, pero muestran la misma tendencia en la diferencia entre primavera-verano y otoño-invierno como las microcuencas, donde se identifica una mayor disminución de la escorrentía en primavera y verano, que en otoño e invierno (Silveira, Alonso y Martínez 2006). Al enfocar la estacionalidad de los eventos de inundación registrados por el SINAE (2019), se identifica su mayor presencia en primavera y otoño, pero también surgen en invierno y, de menor cantidad, en verano, seguramente vinculado a los cambios en las superficies y las funcionalidades de los sistemas de humedales en la cuenca.

Esta circunstancia podría estar relacionada con el crecimiento de los árboles forestales. En el país se expande notoriamente a partir de 2004 (Silveira, Alonso y Martínez 2006), que al llegar a cierta altura precisan más agua y, además, disminuyen la escorrentía superficial, por lo cual menos de las precipitaciones llegan inmediatamente al cuerpo de agua. En épocas de menos precipitaciones, como en verano, esto puede afectar más que en épocas de abundantes precipitaciones. Esto se debe, entre otras, a la cobertura forestal, que al parecer ocasiona que los suelos drenan más rápido por mayor macro y mesoporosidad, pero con menor capacidad de mantener los perfiles superficiales en la capacidad de campo; así, el agua se conduce por caminos de escorrentía preferencial que provoca el aumento en la infiltración (Silveira, Alonso y Martínez 2006).

La falta de registros del nivel de cota en Rivera, pero también la ubicación de la ciudad en las nacientes, genera

dificultades al momento de analizar los eventos de inundaciones ocurridos allí. Además, como se muestra en el análisis de los datos de precipitación en relación con los datos de eventos de inundaciones registrados, no se puede encontrar un valor que indica eventos de inundaciones basándose en las precipitaciones. Como la cuenca alta del Cuñapirú solo muestra cambios significativos en la superficie urbana, se relaciona con el desarrollo de este sobre las planicies de inundación, debido a que también disminuye el área de humedal en el periodo analizado.

Así mismo, el hecho de que han aumentado los eventos de inundaciones registrados, evidencia este presupuesto el rol de la urbanización sobre áreas no aptas. Llama la atención que incrementan las precipitaciones en invierno y los eventos con precipitaciones mayores a 20 mm en agosto, pero con una ausencia de eventos de inundaciones registradas en esta estacionalidad, y es en verano y otoño cuando más inundaciones se registraron. La expansión urbana, con relleno de humedales y presión sobre los montes ribereños, deben estar modificando la dinámica hídrica de la cuenca y ocasionando cambios que deben ser analizados en profundidad.

## Conclusión

En los tres casos analizados se registra una tendencia creciente en la ocurrencia de inundaciones en espacios urbanos. En ninguno de los casos este incremento de las inundaciones se puede explicar exclusivamente por incrementos en la precipitación. La explotación de los suelos para la generación de *commodities* destinados a la exportación produce modificaciones importantes en las cuencas analizadas. Estos cambios ambientales afectan de varias maneras a la población local, y una de estas son las inundaciones en espacios urbanos favorecidos por los cambios del uso de suelo.

Los resultados de este trabajo muestran que los cambios del uso de suelo constituyen un factor que afecta el comportamiento hidrológico y favorecen inundaciones en espacios urbanos, por lo cual, limitar u ordenar la expansión masiva de cultivos o de áreas urbanas, así como la protección del campo natural, el monte nativo y los humedales en toda la cuenca es importante para controlar, al menos parcialmente, los eventos de inundación. Para evitar un aumento en la vulnerabilidad de la población que habita en las zonas más bajas de estas ciudades por eventos de inundaciones en espacios urbanos, es necesario instrumentar mecanismos para evitar la compactación del suelo y minimizar el tiempo en que

se mantienen los suelos descubiertos, especialmente en invierno. Estos elementos deberían formar parte de la discusión sobre inundaciones urbanas, puesto que si bien hay una tendencia al incremento de las precipitaciones, este por sí solo no explica la ocurrencia creciente de inundaciones en espacios urbanos.

A partir de los resultados de esta investigación, se advierte la necesidad del análisis ambiental a escala de cuenca hídrica para enfrentar los problemas derivados de los eventos de inundación que se desarrollan en los espacios urbanos. Evidencia la importancia de desarrollar una estrategia territorial nacional para la actuación frente a espacios urbanos inundables y la creación de soluciones sustentables, basadas también en un ordenamiento urbano para regularizar la expansión, teniendo en cuenta el funcionamiento de las planicies de inundación y especialmente el comportamiento hidrológico en toda la cuenca.

## Referencias

- Achkar, Marcel, Ismael Díaz, Ana Domínguez, y Fernando Pesce. 2016. *Uruguay naturaleza, sociedad, economía: una visión desde la geografía*. Montevideo: Banda Oriental.
- Achkar, Marcel, Ricardo Cayssials, Ana Domínguez, y Fernando Pesce. 2004. *Hacia un Uruguay sustentable: gestión integrada de cuencas hidrográficas*. Montevideo: REDES - Amigos de la Tierra Uruguay.
- Aguayo, Mauricio, Gerardo Azócar, y Cristián Henríquez. 2006. "Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile." *Revista de Geografía Norte Grande*, no. 36, 61-74. <http://doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>
- Alvariño, Sofía, Alessio Bocco, Rafael Terra, Mario Bidegain, y Gabriela Cruz. 2018. "Caracterización de la variabilidad espacial y temporal de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) en Uruguay." En *Alternativas tecnológicas para el sector arrocerero en un escenario desafiante, Serie Técnica 246 de la Jornada Arroz*, editado por INIA, 6-8. Montevideo: INIA.
- Benavides, Felipe, María Elena Solarte Cruz, Vanessa Pabón, Alejandra Ordóñez, Edwin Beltrán, Carlos Torres, y Stephany Rosero. 2018. "The Variation of Infiltration Rates and Physical-Chemical Soil Properties Across a Land Cover and Land Use Gradient in a Páramo of Southwestern Colombia." *Journal of Soil and Water Conservation* 73 (4): 400-410. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.400>

- Bernal, Federico. 2017. "Inundaciones: ¿Cambio climático? ¿O deforestación, más monocultivo de soja, más oligarquía (anarquía) agraria?" Consultado el 5 de junio de 2020. <https://www.iade.org.ar/system/files/inundaciones.pdf>
- Bidegain Mario, Carolina Crisci, Laura del Puerto, Hugo Inda, Néstor Mazzeo, Javier Taks, y Rafael Terra. 2012. *Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Vol. 1 Variabilidad climática de importancia para el sector productivo*. Montevideo, Uruguay: FAO, MGAP.
- Bidegain, Mario, Max Pasten, Gustavo Nagy, Genaro Coronel, Javier Ferrer, y Ivar Arana. 2017. "Tendencias recientes de las precipitaciones e impactos asociados con ENSO en la cuenca del Río de la Plata." *Paraquaria Natural* 5 (2): 8-18.
- Birkmann, Jörn, Hans Reiner Böhm, Dirk Büscher, Mark Fleischhauer, Birte Frommer, Gerold Janssen, Gerhart Overbeck, Jochen Schanze, Sonja Schlipf, Manfred Stock, y Maike Vollmer. 2010. *Planungs- und Steuerungsinstrumente zum Umgang mit dem Klimawandel*. Berlín: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften.
- Blanco Wells, Gustavo, Griselda Günther, Ricardo Gutiérrez, Javier Gonzaga, y Valencia Hernández. 2017. "Introducción. Cambio ambiental global y políticas ambientales en América Latina." En *La política del ambiente en América Latina. Una aproximación desde el cambio ambiental global*, editado por Griselda Günther y Ricardo A. Gutiérrez, 15-36. México: CLACSO y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Camarasa-Belmonte, Ana María, María Paz Caballero López, y Emilio Iranzo García. 2018. "Cambios de uso del suelo, producción de escorrentía y pérdida de suelo. Sinergias y compensaciones en una rambla mediterránea (Barranc del Carraixet, 1956-2011)." *BAGE, Boletín de la Asociación Española de Geografía* no. 78, 127-153. <https://doi.org/10.21138/bage.2714>
- Caorsi, María Laura, Gabriela Cruz, Rafael Terra, y Laura Astigarraga. 2018. "Variación de la precipitación y la ocurrencia de sequías en la cuenca lechera del sw del Uruguay en el periodo 1939-2011." *Agrociencia Uruguay* 22 (1): 116-123. <https://doi.org/10.31285/agro.22.1.12>
- Carriquiry, Miguel, Bruno Lanfranco, y Jorge Lozanoff. 2007. "Efectos del cambio climático en la agricultura uruguaya: implicancias para las políticas públicas." *Research Reports and Working Papers* 310397, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - INIA. Consultado el 6 de junio de 2020. <https://ideas.repec.org/p/ags/iniarw/310397.html>
- Castaño, José, Walter Baethgen, Agustín Giménez, Graciela Magrin, María Travasso, Laura Olivera, Gilberto Rocca da Cunha, y José Cunha Fernandes. 2007. "Evolución del clima observado durante el periodo 1931-2000 en la región sureste de América del Sur." Consultado el 24 de febrero de 2020. [http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/ambiente/se\\_a\\_s\\_2007.pdf](http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/ambiente/se_a_s_2007.pdf)
- Chamorro, Adriana, y Santiago Sarandón. 2017. "Análisis del impacto ambiental del cambio de secuencias de cultivo en el partido de Tres Arroyos (Buenos Aires, Argentina)." *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 116 (1): 89-99.
- Conde, Daniel, Lorena Rodríguez-Gallego, y Laura Rodríguez-Graña. 2002. "Análisis conceptual de las interacciones abióticas y biológicas entre el océano y las lagunas de la costa Atlántica de Uruguay. La problemática ambiental y la gestión de las lagunas costeras Atlánticas de Uruguay." En *Perfil ambiental del Uruguay*, editado por Ana Domínguez y Rubén Prieto, 149-166. Montevideo: Nordan-Comunidad.
- Díaz, Ismael, Mauricio Ceroni Acosta, Guzmán López Orrego, y Marcel Achkar. 2018. "Análisis espacio-temporal de la intensificación agraria y su incidencia en la productividad primaria neta: propuesta metodológica para Uruguay 2000-2011." *Revista Electrónica de Medioambiente*. 19 (1): 24-40.
- Domínguez, Ana, Marcel Achkar, Fernando Pesce, e Ismael Díaz. 2018. "Las transformaciones territoriales del espacio agrario uruguayo: nuevas regionalidades." *Geo UERJ* 32: 1-23. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2018.28973>
- Equipo Aguas Urbanas y Gestión de Riesgo - ITU - FARQ - Udelar. 2014a. *Caracterización de la vulnerabilidad del área afectada por las inundaciones de febrero de 2010 en la ciudad de Durazno*. Durazno, Uruguay: Convenio Udelar - Intendencia de Durazno. Consultado el 18 de julio de 2018. [http://www.fadu.edu.uy/itu/files/2014/10/01\\_DURAZNO\\_ID.pdf](http://www.fadu.edu.uy/itu/files/2014/10/01_DURAZNO_ID.pdf)
- Equipo Aguas Urbanas y Gestión de Riesgo - itu - farq - Udelar. 2014b. *Impacto de las inundaciones de noviembre de 2009 en Artigas, Salto y Paysandú: Parte I: Resumen ejecutivo*. Montevideo: Convenio GGIR - Udelar - PNUD. Consultado el 20 de julio de 2018. [http://www.fadu.edu.uy/itu/files/2014/10/04\\_Artigas\\_Salto\\_Paysandu.pdf](http://www.fadu.edu.uy/itu/files/2014/10/04_Artigas_Salto_Paysandu.pdf)
- Ferrando, Francisco. 2006. "Sobre inundaciones y anegamientos." *Revista de Urbanismo*, no. 15, 25-42.
- Frich, Povel, Lisa Alexander, Paul Della-Marta, Byron Gleason, Malcom Haylock, Tank Amg Klein, y Todd Peterson. 2002. "Observed Coherent Changes in Climatic Extremes During the Second Half of the Twentieth Century." *Climate Research* 19 (3): 193-212. <https://doi.org/10.3354/cro19193>
- Gaitán, Juan, María Fabiana Navarro, Leonardo Tenti Vuegen, María José Pizarro, Patricia Carfagno, y Santiago Rigo. 2017. *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Buenos Aires: Ediciones INTA.
- Gallegos Reina, Antonio, y María Jesús Perles Roselló. 2019. "Relaciones entre los cambios en los usos del suelo y el incremento de los riesgos de inundabilidad y erosión: análisis diacrónico en la provincia de Málaga (1957-2007)." *BAGE*,

- Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 81: 1-38. <https://doi.org/10.21138/bage.2740>
- García, Pablo Ezequiel, Nicolás Diego Badano, Ángel Menéndez, Federico Bert, Guillermo García, Guillermo Podestá, Santiago Rovere, Andrew Verdin, Balaji Rajagopalan, y Poonam Arora. 2018. "Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: cuenca del río Salado, Buenos Aires, Argentina." *Revista Iberoamericana del Agua* 5 (2): 92-106. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495990>
- García Préchac, Fernando, Oswaldo Ernst, Pedro Arbeletche, Mario Pérez Bidegain, Clara Pritsch, Alejandra Ferenczi, y Mercedes Rivas. 2010. *Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural*. Montevideo: Udelar.
- Gazzano, Inés, Marcel Achkar, y Ismael Díaz. 2019. "Agricultural Transformations in the Southern Cone of Latin America: Agricultural Intensification and Decrease of the Above-ground Net Primary Production, Uruguay's Case." *Sustainability* 11 (24): 7011. <https://doi.org/10.3390/su11247011>
- Giménez, Agustín, José Pedro Castaño, Walter Baethgen, y Bruno Lanfranco. 2009. *Cambio climático en Uruguay, posibles impactos y medidas de adaptación en el sector agropecuario*. Serie Técnica 178. Montevideo, Uruguay: INIA.
- Hamza, M., y Walter Anderson. 2005. "Soil Compaction in Cropping Systems: A Review of the Nature, Causes and Possible Solutions." *Soil and Tillage Research* 82 (2): 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Haylock, M., T. Peterson, Lincoln Alves, Tércio Ambrizzi, Y. Anunciação, Julián Báez, Vicente Barros, M. Berlato, Mario Bidegain, Genaro Coronel, V. Corradi, Villanueva Jerónimo García, Alice Grimm, David Karoly, José Marengo, M. Marino, David Ferrán Moncunill, D. Nechet, Juan Quintana, Expedito Rebello, Matilde Rusticucci, José Luis Santos, I. Trebejo, y L. Vincent. 2006. "Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960-2000 and Links with Sea Surface Temperature." *Journal of Climate*, 19 (8): 1490-1512. <https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1>
- Hirsch, Robert, y James Slack. 1984. "A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data with Serial Dependence." *Water Resources Research* 20 (6): 727-732. <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727>
- Holman, Ian, John Hollis, Matthew Bramley, y Travis Thompson. 2003. "The Contribution of Soil Structural Degradation to Catchment Flooding: A Preliminary Investigation of the 2000 Floods in England and Wales." *Hydrology Earth System Sciences* 7 (5): 755-766. <https://doi.org/10.5194/hess-7-755-2003>
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2011. "Resultados del Censo de Población 2011: población, crecimiento y estructura por sexo y edad." Instituto Nacional de Estadística (INE), Montevideo. Consultado el 22 de julio de 2018. <https://www.ine.gub.uy/censos2011/resultadosfinales/analisispais.pdf>
- INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología). 2019. "Bases de datos de las estaciones Trinidad, 25 de Agosto, Juan Soler y San José de Mayo." Entregadas en enero 2019.
- INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología). 2020. "Bases de datos de las estaciones Rivera, Durazno, Cerro Chato." Entregadas en 07.02.2020.
- Jha, Abhas, Robin Bloch, y Jessica Lamond. 2012. *Ciudades e inundaciones: guía para la Gestión integrada del riesgo de inundaciones en ciudades en el siglo 21*. Washington: World Bank.
- Kendall, Maurice. 1975. *Rank Correlation Methods*. London: Charles Griffin.
- López García, María José, Ana María Camarasa Belmonte, y Joan Mateu Bellés. 2007. "Cambios en los usos del suelo y producción de escorrentía en ramblas mediterráneas: Carraxet y Poyo (1956-1998)." *BAGE, Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 44, 69-94.
- Mann, Henry. 1945. "Nonparametric Tests Against Trend." *Econometrica. Journal of the Econometric Society* 13 (3): 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 1994. *Unidades de suelos Coneat*. Montevideo: MGAP.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2009. *Guía de siembra directa*. Montevideo: MGAP.
- MVOTMA (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente). 2016. "Cuarta Comunicación Nacional a la Conferencia de las partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - Uruguay." Consultado el 30 de enero de 2019. [https://unfccc.int/files/national\\_reports/non-annex\\_i\\_parties/application/pdf/ingei\\_2012.pdf](https://unfccc.int/files/national_reports/non-annex_i_parties/application/pdf/ingei_2012.pdf)
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2011. "Guía de prácticas climatológicas." Consultado el 20 de diciembre de 2019. <http://tysmagazine.com/guia-de-practicas-climatologias/>
- Pinto, Priscila, y Gervasio Piñeiro. 2018. "Cultivos de servicios, una alternativa para el manejo de malezas." *II Congreso Argentino de Malezas*, Rosario, Argentina. Del 5 al 5 de junio de 2018.
- REDES 2011. *Impactos del cultivo de soja en Uruguay. Cambios en el manejo de la tierra y en el uso de agroquímicos*. Montevideo: REDES.
- Rollán, Adriana, y Omar Bachmeier. 2014. "Compactación y retención hídrica en Haplustoles de la provincia de Córdoba

- (Argentina) bajo siembra directa.” *Agriscientia* 31 (1): 1-10. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v31.n1.9835>
- Romero Lankao, Patricia 2006. “Cambio ambiental global. ¿Nuevos desafíos a viejos problemas?” *Globalización: revista web mensual de economía, sociedad y cultura*. (octubre).
- Santelices Spikin, Andrea, y Jorge Rojas Hernández. 2016. “Introduction Climate Change in Latin America: Inequality, Conflict, and Social Movements of Adaption.” *Latin American Perspectives* 43 (4): 4-11. <https://doi.org/10.1177/0094582X16644916>
- Schön, Feline. 2021. “Zonas úmidas e inundação de espaços urbanos no Uruguai.” Tesis de doctorado en Geografía, Universidad Federal de Santa María, Rio Grande do Sul (Brasil).
- Schön, Feline, Ana Domínguez, y Marcel Achkar. 2018. “Distribución territorial de áreas urbanas en zonas de humedales en Uruguay.” *Geo UERJ*, no. 33. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2018.36322>
- Silveira, Luis, Jimena Alonso, y Letizia Martínez. 2006. “Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay.” *Agrociencia* 10 (2): 75-93.
- Silveira, Luis, Christian Chreties, Magdalena Crisci, Gabriel Usera, y Jimena Alonso. 2015. “Sistema de alerta temprana para previsión de avenidas en la ciudad de Durazno.” *INNOTEC Revista del LATU*, no. 10: 56-63. <https://doi.org/10.26461/10.05>
- SINAE (Sistema Nacional de Emergencias). 2019. “Base de datos.” Entregada 15.02.2019.
- Steffen, Will, A. Sanderson, P. Tyson, J. Jäger, P.A. Matson, B. Moore III, F. Oldfield, K. Richardson, Hans Joachim Schellnhuber, B. L. Turner, y R. J. Wasson. 2004. “Global Change and the Earth System. Executive Summary.” International Geosphere-Biosphere Program Global Changes. Consultado el 12 de octubre de 2021. [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=13665](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=13665)
- Steffen, Will, Åsa Persson, Lisa Deutsch, Jan Zalasiewicz, Mark Williams, Katherine Richardson, Carole Crumley, Paul Crutzen, Carl Folke, Line Gordon, Mario Molina, Veerabhadran Ramanathan, Johan Rockström, Marten Scheffer, Hans Joachim Schellnhuber, y Uno Svedin. 2011. “The Anthropocene: from Global Change to Planetary Stewardship.” *Ambio* 40 (7) (noviembre): 739-761. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0185-x>
- Ulloa, Astrid. 2017. “Dinámicas ambientales y extractivas en el siglo XXI: ¿es la época del antropoceno o del capitaloceno en Latinoamérica?” *Desacatos*. no. 54, 58-73.
- Vallejos, Adrián, Marcio Kees, Pedro Bondía, Nora Echeverría, Juan Silenzi, Cristián Zajac, y Martín De Lucía. 2014. “Subsolado en siembra directa: efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja.” *Ciencia del Suelo* 32 (2): 291-300.
- Viglione, Alberto, Bruno Merz, Dung Viet Nguyen, Juraj Parajka, Thomas Nester, y Günter Blöschl. 2016. “Attribution of Regional Flood Changes Based on Scaling Fingerprints.” *Water Resources Research* 52 (7): 5322-5340. <https://doi.org/10.1002/2016WR019036>
- Xiao, Yangfan, Shanyhen Yi, y Zhongqian Tang. 2016. “GIS-Based Multi-Criteria Analysis Method for Flood Risk Assessment Under Urbanization.” *24th International Conference on Geoinformatics (1-5)*. IEEE Explore. <https://doi.org/10.1109/GeoINFORMATICS.2016.7578963>
- Zhang, Xuebin, Lisa Alexander, Gabriele Hegerl, Philip Jones, Albert Tank, Thomas Peterson, Blair Trewin, y Francis Zwiers. 2011. “Indices for Monitoring Changes in Extremes Based on Daily Temperature and Precipitation Data.” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2 (6): 851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>

**Feline Schön**

Doctora en Geografía, Universidade Federal de Santa María, Brasil. Magíster en Geografías de la Globalización, Goethe Universität Frankfurt Main, Alemania. *Bachelor* en Geografía Humana y Filología Española, Universität Potsdam, Alemania. Docente del Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio del Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Udelar. Investiga en Geografía urbana.

**Marcel Achkar**

Doctor en Sciences Agronomiques INP-ENSAT Toulouse (Francia), 2005. Magíster en la Universidad de la República (Uruguay), 2000. Licenciado en Geografía, Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, 1997. Docente e investigador en régimen de dedicación total del Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio del Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias de la Universidad de la República. Investiga en Geografía rural y evaluación de recursos naturales. Está en el Nivel I del Sistema Nacional de Investigadores y es Investigador Grado 4 del Pedeciba en el área de Geociencias.