

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Carrera de Ciencias Biológicas



LAS MONTAÑAS COMO TANQUES DE AGUA: VARIACIÓN ALTITUDINAL DE LA OFERTA HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO ANISACATE, CÓRDOBA

Tesinista: Agostina Seco

Firma:

Directora: Dra. María Poca

Firma:

Co-directora: Dra. Ana María Cingolani

Firma:

Septiembre 2021

Grupo de Estudios Ambientales
Instituto de Matemática Aplicada San Luis (CONICET-UNSL)

**LAS MONTAÑAS COMO TANQUES DE AGUA:
VARIACIÓN ALTITUDINAL DE LA OFERTA HÍDRICA DE
LA CUENCA DEL RÍO ANISACATE, CÓRDOBA**

Tribunal examinador:

Nombre y Apellido:

Firma:

Nombre y Apellido:

Firma:

Nombre y Apellido:

Firma:

Calificación:

Fecha:

Agradecimientos

A mi directora Dra. María Poca y a mi co-directora Dra. Ana Cingolani por haberme brindado la posibilidad de realizar la tesina con ellas, por guiarme, acompañarme y enseñarme tanto durante cada una de las etapas de este proceso.

A los integrantes del comité evaluador, Dra. Melisa Giorgis Dr. Diego Gurvich y Dr. Jorge Martínez, por sus valiosos aportes que han mejorado significativamente el trabajo final.

A Marcelo Nosetto, por su ayuda con mediciones de campo y discusiones de datos. A George Castellanos, por su apoyo y enseñanza en relación al uso de GIS. Al CIRSA-Instituto Nacional del Agua, particularmente a la Ing. Andrea Rico, por proporcionar amablemente datos meteorológicos de la zona de estudio. Al personal del APRHI, por su buena predisposición para realizar la medición de caudal del punto más bajo y caudaloso de la cuenca en el río Anisacate con un perfilador acústico de corriente. A la Administración de Parques Nacionales, por brindar permiso para realizar mediciones de esta Tesina en el Parque Nacional Quebrada del Condorito.

A mi familia, amigos y novio por haberme apoyado incondicionalmente durante esta etapa, por estar siempre cuando lo necesitaba.

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Universidad Nacional de Córdoba, pública y gratuita y del Instituto de Matemática Aplicada de San Luis perteneciente al CONICET y la Universidad Nacional de San Luis. Este trabajo contó con el apoyo financiero de FONCyT bajo el proyecto PICT 2018-03143 Pmo.BID.

1. Resumen	5
2. Introducción	6
3. Objetivos, hipótesis y predicciones	9
3.1. Objetivo general	9
3.2. Objetivos específicos	9
3.3. Hipótesis y predicciones	9
4. Materiales y métodos	10
4.1. Área de estudio	10
4.2. Diseño de muestreo	11
4.3. Delimitación de las secciones y obtención de datos biofísicos	12
4.4. Mediciones de caudal y estimación de rendimiento	17
4.5. Análisis de datos.....	18
4.5.1. Variación estacional del rendimiento hídrico	18
4.5.2. Variación espacial del rendimiento hídrico e identificación de secciones con mayor rendimiento.....	18
4.5.3. Variación altitudinal del rendimiento hídrico	18
4.5.4. Rendimiento hídrico y variables biofísicas.....	19
5. Resultados	20
5.1. Variación estacional del rendimiento hídrico	20
5.2. Variación espacial del rendimiento hídrico e identificación de secciones con mayor rendimiento	20
5.3. Variación altitudinal del rendimiento hídrico	23
5.4. Rendimiento hídrico y variables biofísicas.....	23
6. Discusión	29
7. Referencias bibliográficas	36
8. Material suplementario	42
A. Detalles técnicos de las mediciones de caudal.....	42
B. Tablas suplementarias.....	43
C. Figuras suplementarias	47

1. Resumen

Los ríos originados en las sierras de Córdoba son fundamentales en la provisión de agua a la población. A pesar de su rol clave, aún no se conoce cómo varía la oferta hídrica a través de gradientes altitudinales en las montañas, ni qué variables biofísicas ejercen mayor control sobre el rendimiento hídrico. Identificar y caracterizar zonas críticas de provisión de agua es esencial para brindar herramientas certeras de manejo de los recursos hídricos de la región. En este trabajo se hipotetizó que el rendimiento aumentaría conforme lo hiciera la altitud, dada la relación negativa entre altitud y temperatura y positiva entre altitud y precipitación. Para poner a prueba esta hipótesis se midió caudal base en las estaciones seca y lluviosa en 14 puntos entre los 463 y 2261 metros de altitud en la cuenca del Anisacate. A partir de estas mediciones se estimó el caudal correspondiente a las 14 secciones independientes entre sí (es decir, no anidadas). También se estimaron, a partir de capas de información geográfica, 14 variables topográficas y de cobertura y actividad vegetal de cada sección. Se transformó el caudal a rendimiento hídrico considerando el área de cada sección, para permitir la comparabilidad entre ellas, y se analizó su relación con las variables biofísicas. Los resultados indicaron que, al contrario de lo esperado, el rendimiento de las estaciones seca y húmeda disminuyó con la altitud, controlando la variabilidad debida a otros factores biofísicos. Adicionalmente, los análisis evidenciaron que el rendimiento en la estación seca aumentó con mayor cobertura de pastizales con roca y/o suelo desnudo, mientras que en la estación húmeda el rendimiento fue menor con mayor cobertura de pajonales. Dado que ambos tipos de cobertura se correlacionaron negativamente, los resultados sugieren que los controles del rendimiento hídrico no serían tan diferentes entre ambas estaciones. Este trabajo resalta la importancia de desarrollar estrategias de conservación en las zonas media e inferior de la cuenca, que se encuentran actualmente desprotegidas, para asegurar el recurso hídrico en la región.

2. Introducción

Los servicios hidrológicos son aquellos servicios ecosistémicos que involucran el suministro de agua en cantidad y calidad, la seguridad frente a inundaciones, la generación de electricidad y la provisión de sitios de recreación por parte de los ecosistemas acuáticos (Brauman et al. 2007). Las montañas juegan un papel clave en la provisión de servicios hidrológicos, ya que constituyen una fuente fundamental de agua dulce de la que dependen las zonas bajas aledañas, razón por la cual se denominan tanques de agua naturales (Messerli et al. 2004; Viviroli et al. 2007).

La fracción de precipitación que abandona las cuencas en forma líquida por vía superficial depende del clima, la topografía, la litología y la cobertura vegetal (Zhang et al. 2001; Brown et al. 2005; Trancoso et al. 2017). En términos generales, el clima es el principal determinante del balance hídrico, ya que gobierna el suministro de humedad y energía a través de las precipitaciones y evapotranspiración potencial (Beck et al. 2015; Trancoso et al. 2017). Por su parte, el tamaño de la cuenca determina la cantidad de agua que ingresa a la misma. Por lo tanto, el clima y el tamaño de la cuenca son los principales determinantes del caudal o flujo de agua por unidad de tiempo en un punto determinado de un cauce dado. La interacción entre clima y vegetación regula la evapotranspiración, mientras que las características del paisaje, e.g. pendiente o rugosidad, determinan la forma en que el agua no evaporada es transportada dentro del territorio de soporte de la cuenca, lo cual en última instancia define las características del caudal (Trancoso et al. 2017; Jobbágy et al. en prensa).

Una característica relevante del caudal es que este varía en el tiempo dependiendo de la proporción de caudal de tormenta y caudal base que predomine. El caudal de tormenta se conforma principalmente por el agua resultante de la escorrentía superficial y, en sistemas con lluvias torrenciales, representa la mayor parte del caudal luego de un evento de lluvia. El caudal base, en cambio, representa el agua entre eventos de lluvia y constituye un flujo clave que, en el caso de río permanentes, se mantiene aún durante la estación seca alimentado por descargas subterráneas (Robinson & Ward 1990; Zhang & Schilling 2006). Este último depende del balance entre los distintos

procesos ecohidrológicos que tienen lugar luego de eventos de lluvia: intercepción, evaporación, escorrentía superficial y subsuperficial y transpiración. Como resultado de estos procesos, sólo una fracción de la precipitación infiltra en el suelo y es almacenada, pudiendo incorporarse luego hacia los arroyos y sostener un caudal base, si no es consumida por las plantas o evaporada del suelo (Wittenberg & Sivapalan 1999; Smakhtin 2001). Los procesos que determinan qué fracción del agua infiltrará el suelo y será almacenada, pueden ser afectados por diversos atributos de la cuenca como la topografía y la geología, propiedades relativamente invariables en el tiempo, y otros como la cobertura del suelo y el clima, que están sujetos a fluctuaciones intra e inter-anales y al mismo tiempo están experimentando cambios acelerados a nivel global (Asbjornsen et al. 2011; Mercado-Bettín et al. 2017; Trancoso et al. 2017). Dado que las cuencas son tan diversas en sus atributos, para poder comparar sus caudales y detectar relaciones con otras variables biofísicas sin que el área sea el factor preponderante de control, suele dividirse el caudal por el área de la cuenca, obteniendo así el llamado caudal específico o rendimiento hídrico, que se expresa en términos de lámina de agua (mm día^{-1}).

El rendimiento hídrico, en general, se relaciona positivamente con la precipitación, pero negativamente con la temperatura. A mayor temperatura, mayor demanda evaporativa de la atmósfera y consumo de las plantas, por lo que el rendimiento disminuye (Fu et al. 2007; Xu et al. 2010). La altitud, por su parte, afecta el rendimiento hídrico dado que la temperatura disminuye conforme la altitud aumenta. Por esta razón, en las montañas se generan mayores excedentes hídricos que en las zonas llanas aledañas, lo cual explica su rol como tanques de agua naturales (Wilson & Guan 2004). En un estudio comparativo de montañas alrededor del mundo, Viviroli & Weingartner (2004) encontraron una disminución del rendimiento hídrico en las tierras bajas con respecto a las zonas de montañas. Si bien estos trabajos muestran lo que sucede al tomar montañas completas como cuencas únicas y compararlas con cuencas que están predominantemente en las llanuras, también cabría esperar un patrón similar dentro de una misma montaña. Es decir, que las cabeceras de cuenca, situadas en las partes más altas y frías, aporten más al rendimiento hídrico que las partes más bajas y cálidas. Sin embargo, existen otros factores

biofísicos que pueden modificar significativamente el patrón de rendimiento hídrico con respecto al esperado por el clima y altitud solamente. Por un lado, cuanto mayor es la pendiente, la velocidad de pérdida de agua por escorrentía aumenta y, por lo tanto, las chances de infiltración disminuyen afectando negativamente el rendimiento hídrico basal, pero aumentando el caudal de tormenta (Vivoni et al. 2007). La cobertura vegetal, por su parte, obstaculiza la escorrentía (Popp et al. 2009) y mejora las propiedades del suelo (Neary et al. 2009) aumentando, en conjunto, la probabilidad de infiltración y percolación del agua en el suelo. Sin embargo, a medida que la estructura vegetal es más compleja, la pérdida de agua a través de interceptación, evaporación desde la canopia y transpiración aumenta. El balance entre estos procesos puede resultar positivo o negativo para el rendimiento hídrico basal de una cuenca, dependiendo de cuál de ellos predomine (Bruijnzeel, 1989, 2004; Ghimire et al. 2014; Poca et al. 2018a).

Las montañas del centro de Argentina presentan un régimen hídrico marcadamente estacional con precipitaciones restringidas a la época de mayor demanda evaporativa, es decir, desde octubre a abril. Las sierras de Córdoba, en particular, son fundamentales en la provisión de agua a tres millones de personas situadas en las zonas bajas (Cingolani et al. 2015). Sin embargo, y en paralelo a la degradación de la parte alta debida al disturbio por pastoreo y fuego (Cingolani et al. 2013,2014; Renison et al., 2010), la población ocupando el área baja crece exponencialmente (INDEC, 2012) aumentando la demanda y escasez de agua durante la época seca (Berardo, 2014; Dasso et al. 2014).

A pesar de su papel clave en la provisión de agua, aún no existen estudios que demuestren cómo varía la oferta hídrica a través de gradientes altitudinales en las sierras de Córdoba. Analizar la variación altitudinal del rendimiento hídrico basal en estaciones contrastantes del año contribuirá a la determinación de zonas críticas para la provisión de agua. Esto es esencial para brindar herramientas certeras de manejo y contribuir al ordenamiento territorial de los pisos altitudinales de las montañas a fin de prevenir la escasez de agua y los conflictos sociales asociados. Asimismo, podría contribuir a predecir los efectos que tendría un aumento global de temperatura sobre la disponibilidad de agua en la región.

3. Objetivos, hipótesis y predicciones

3.1. Objetivo general

Determinar cuál es la zona altitudinal de la cuenca del río Anisacate, más relevante para el rendimiento hídrico basal a través de un análisis altitudinal de caudal.

3.2. Objetivos específicos

- Describir los patrones de variación altitudinal del rendimiento hídrico en el momento de flujo base de las estaciones seca y lluviosa en la cuenca del río Anisacate.
- Identificar la zona altitudinal con mayor rendimiento hídrico basal dentro de la cuenca.
- Analizar la relación entre el rendimiento hídrico basal y los factores topográficos, climáticos y cobertura vegetal que varían dentro de la cuenca.

3.3. Hipótesis y predicciones

Se espera que el rendimiento hídrico sea mayor en las zonas altitudinales superiores a lo largo del gradiente de la cuenca del río Anisacate debido a la relación inversa entre altitud y temperatura y positiva entre altitud y precipitación. La relación entre el rendimiento hídrico y las demás variables biofísicas a lo largo del gradiente se analizará de manera exploratoria.

4. Materiales y métodos

4.1. Área de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo en la cuenca del río Anisacate de la Provincia de Córdoba, Argentina, que posee un área de aporte de 465 km² (Díaz et al. 2016a). El río Anisacate es un importante curso de agua para la Provincia, siendo tributario del río Segundo o Xanaes, y del cual toman agua la ciudad de Alta Gracia y muchos pueblos como Anisacate, La Paisanita, La Bolsa, entre otros. Es decir, abastece a más de 50mil habitantes directamente de tomas de los tributarios sin un reservorio de agua (dique) intermedio. Sus nacientes se encuentran en los ríos La Suela y San José que, a su vez, son formados en las porciones más altas de la ladera oriental de las Sierras Grandes de Córdoba (Figura 1a). La Pampa de Achala, donde se localizan las nacientes, presenta una altitud promedio de 2100 m s.n.m. Esta región se caracteriza por tener suelos predominantemente poco profundos (<50 cm), aunque pueden alcanzar varios metros de profundidad en los valles (Cabido et al. 1987). El relieve serrano es accidentado con zonas escarpadas y una gran proporción de roquedales en la parte más alta. Allí los arroyos y ríos presentan fuertes pendientes, tramos rectilíneos y curvaturas angulosas (Colladon & Velez 2011), pero luego de atravesar las Sierras Chicas, el río Anisacate discurre en forma meandrosa a través de la llanura (Dasso et al. 2014).

Las Sierras Grandes resultaron del levantamiento de una falla inversa durante una etapa del Terciario superior de la orogenia de los Andes, presentando al lado occidental pendientes más pronunciadas (valores medios de ~10%) que las pendientes del lado oriental (~5%, Martinez et al. 2016). Litológicamente, la cuenca alta está formada por rocas cristalinas de carácter ígneo (granito del Batolito de Achala), y principalmente metamórficas en la cuenca media y baja (gneises; Figura 1a) alternadas con sedimentos modernos. La permeabilidad de las rocas cristalinas depende de la frecuencia de fallas, fracturas y diaclasas presentes en el material, lo que determina que las rocas graníticas sean menos permeables y más proclives al escurrimiento excesivo que las metamórficas. Por el contrario, los materiales de origen sedimentario, presentes en menor medida en la cuenca son los más

permeables, con diferencias que responden a las texturas de los suelos, aumentando la infiltración con las texturas gruesas (Ugarte et al. 2006).

La región presenta clima monzónico con precipitaciones restringidas a los meses más cálidos, entre octubre y abril (Garreaud et al. 2009). La temperatura media anual varía de acuerdo con la altitud, siendo menor en las zonas más altas (1700-2200 m s.n.m.), donde es de 8,6°C y no hay meses libres de heladas. La precipitación en esta zona es de 921 mm anuales (promedio para el periodo 1992–2017) (Colladon 2014; Colladon 2018) y el caudal base de invierno de los ríos perennes originados allí varía entre 7 y 146 mm/año (Cingolani et al. 2015 y citas allí). En la zona más baja (600-700 m s.n.m.), la temperatura media alcanza los 15,5°C (Colladon 2004) y la precipitación es de 623 mm anuales (promedio para el periodo 1992-2012) (Colladon 2014). El caudal medio anual del río Anisacate, medido a 900 m s.n.m es de 327 mm/año (promedio para el periodo 1925-1979; Díaz et al. 2016a).

En un estudio en las cabeceras de estas cuencas, Cingolani et al. (2015) encontraron que las microcuencas más rugosas y con alta proporción de afloramientos rocosos y valles profundos tienen mayor rendimiento hídrico en la estación seca en comparación a cuencas con lomas suaves y alta cobertura de pastizales. Sin embargo, en dicho trabajo no incluyeron mediciones de flujo base de la estación húmeda. Por otro lado, trabajos de Poca et al. (2018a, b) en la misma zona y a lo largo de un año hidrológico, demostraron que a escala de sitio la simplificación de la estructura vegetal, la reducción de la profundidad del suelo y de su capacidad de infiltración asociadas al disturbio, reduce la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de la zona saturada y no saturada.

4.2. Diseño de muestreo

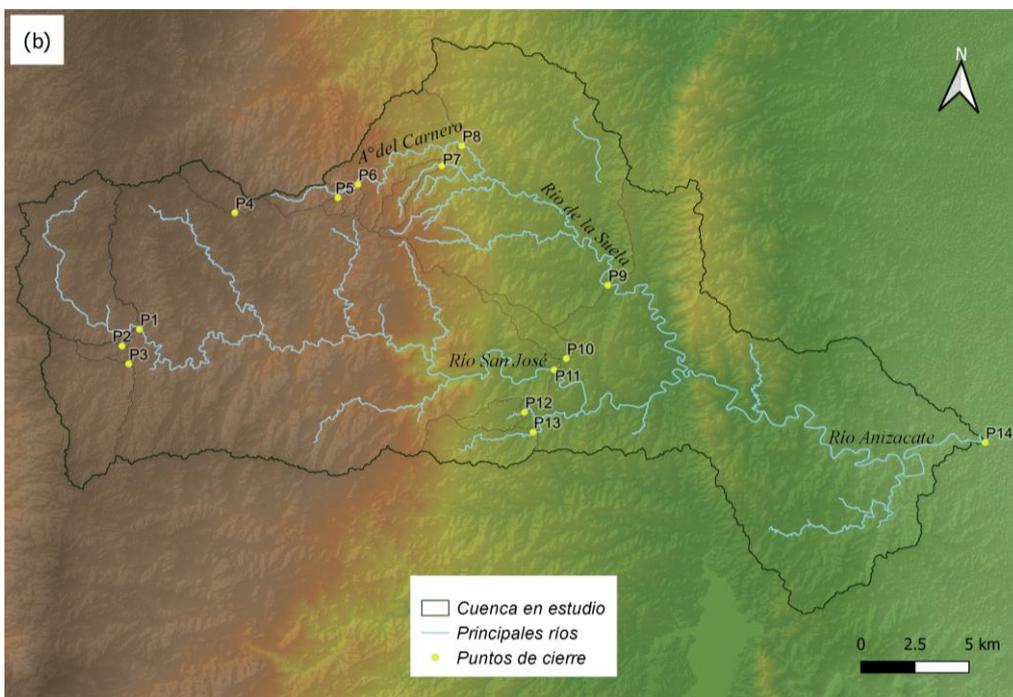
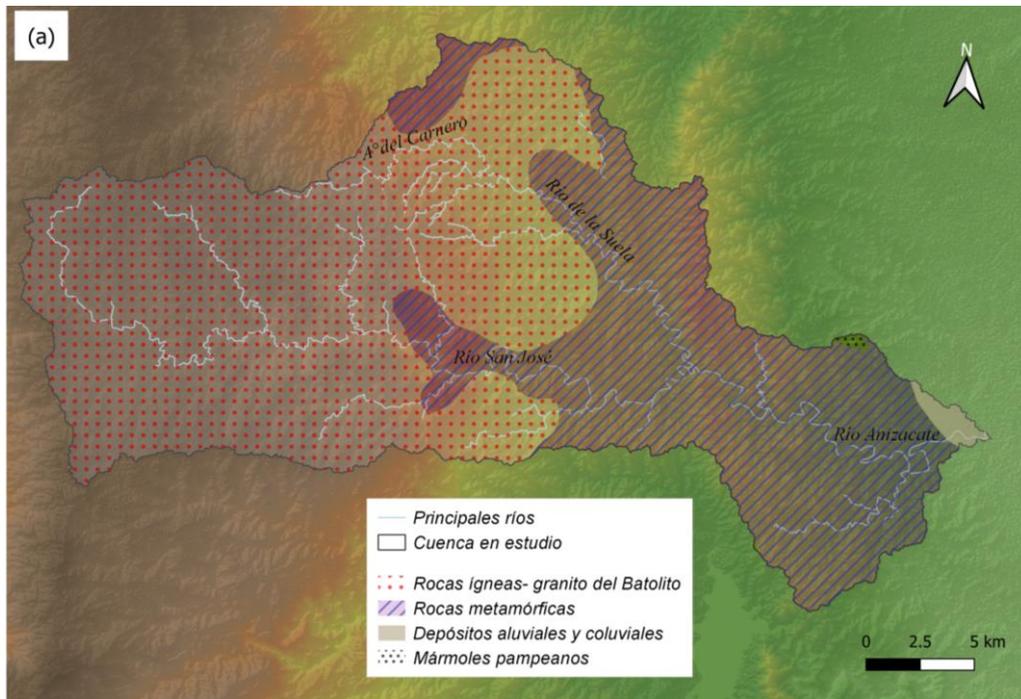
Se seleccionaron 14 puntos de medición a lo largo de la cuenca del río Anisacate, abarcando el rango altitudinal entre los 463 y 2261m s.n.m. (Figura 1b). Los puntos de cierre de cada sección, es decir, donde se realizó la medición de caudal, se identificaron en la Figura 1b con la letra P acompañada

del número correspondiente entre 1 y 14. Los sitios de medición se seleccionaron principalmente por su accesibilidad desde la ruta. En cada uno de ellos se midió el caudal dos veces, una vez en la estación seca, y otra vez en la estación húmeda. En la estación seca las mediciones se realizaron durante los días 22 y 23 de agosto de 2019, sin eventos de lluvia entre medio de ambos; mientras que en la estación húmeda la medición de todos los puntos de muestreo se realizó en el mismo día, el 24 de febrero de 2020. En ambos casos, se procuró que las fechas no coincidieran con eventos de lluvia cercanos para asegurar que se trate del momento de caudal base y no del caudal de tormenta. Cada uno de los puntos de medición comprende un área de aporte determinada dentro de la cuenca. Sin embargo, algunas de estas áreas son anidadas, es decir, abarcan secciones asociadas a otros puntos de medición. Este es el caso de las secciones definidas por los puntos de medición sobre arroyo del Carnero, del río La Suela y del río San José, que son los principales afluentes que constituyen el río Anisacate. Para independizar los datos, y tener secciones que no se superpongan entre sí, se descontó el área y caudal de la/s sección/es ubicadas aguas arriba del resto del área de aporte al punto de medición de dicha sección. De esta manera se separó el aporte de las diferentes áreas de la cuenca, quedando definidas 14 secciones completamente independientes, que son las que se analizan en este trabajo (ver Figura 1c). Algunas de estas son cuencas completas, mientras que otras son secciones de cuencas; con el objetivo de simplificar, de aquí en adelante se las llamará "secciones" de manera indistinta, y se identificarán con la letra S seguida de un número entre 1 y 14. El identificador S1 fue asignado a la sección de mayor altitud media, mientras que S14 corresponde a aquella que comprende el extremo de menor altitud.

4.3. Delimitación de las secciones y obtención de datos biofísicos

Para delimitar cada una de las secciones a estudiar, primero se delimitaron las cuencas correspondientes al área de aporte de cada punto de medición. Para ello se utilizaron las herramientas de hidrología incluidas dentro del paquete de herramientas de análisis espacial del software ArcGIS 10.7 (ESRI 2018). Se importaron las coordenadas geográficas de los 14 puntos de

medición y luego de determinada la dirección y posterior acumulación de flujo hacia cada punto, se delimitaron las cuencas. Posteriormente, para obtener los polígonos correspondientes a cada sección, se utilizó la herramienta de geoprocésamiento vectorial que permite, a través de un recorte por capa de máscara, excluir las áreas anidadas (Figura 1c).



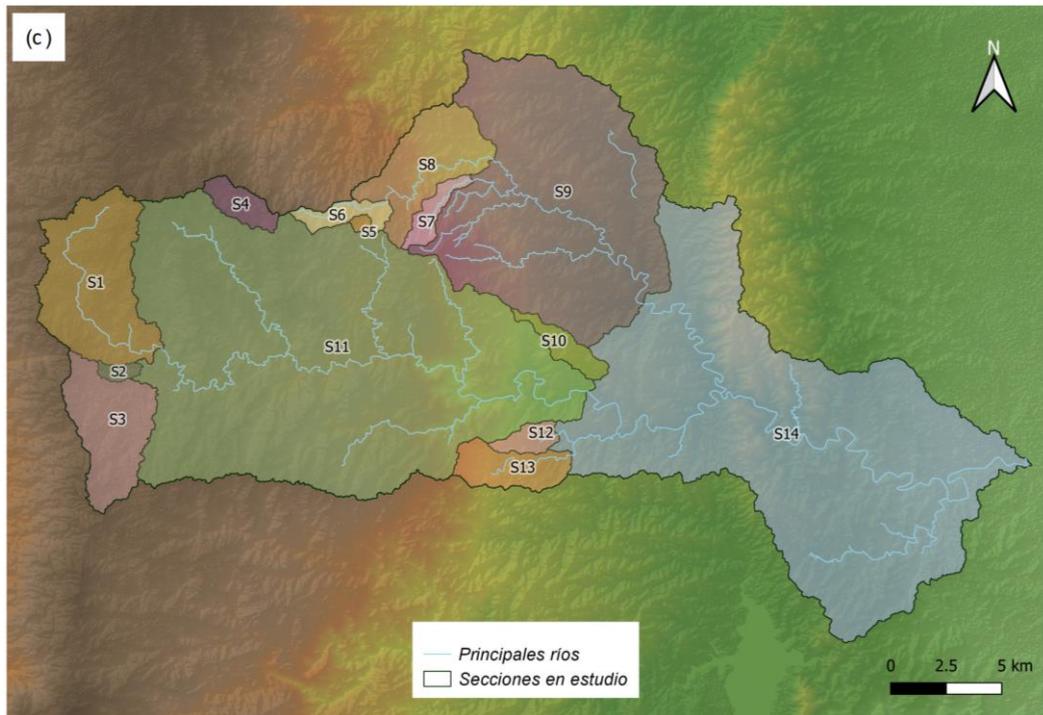


Figura 1. Cuenca del río Anisacate, Provincia de Córdoba. En (a) se visualizan los principales ríos de la cuenca en estudio y la litología predominante, en (b) los puntos de medición, y en (c) las 14 secciones utilizadas en el presente estudio.

A partir de un Modelo Digital de Elevación de Terreno (DEM, por sus siglas en inglés) se obtuvo una capa de altitud y se calculó una capa de inclinación de la pendiente y otra de índice de rugosidad del terreno (TRI, por sus siglas en inglés; Riley et al 1999). El TRI mide la diferencia entre valores de altitud de un píxel central y los ocho píxeles que lo rodean. Luego, esas ocho diferencias son elevadas al cuadrado y promediadas. La raíz cuadrada del promedio resulta en el índice de rugosidad de la celda central.

Las capas de precipitación fueron creadas utilizando datos disponibles de los anuarios pluviométricos del Instituto Nacional del Agua (INA) (Rico et al. 2018, 2019; Colladon, 2020), registrados por estaciones remotas que el INA tiene distribuidas dentro de la cuenca Anisacate y San Antonio. También se utilizaron los datos de una estación meteorológica del grupo de trabajo (ver Tabla MS1, Material Suplementario). En total se utilizaron datos de 23 estaciones pluviométricas. En cuanto a la temporalidad, se definieron dos criterios diferentes para las precipitaciones a asociar a cada periodo de

medición de caudal. Para la estación seca, se consideró la precipitación acumulada durante los doce meses previos a la fecha (P12-ES). Este criterio se basa en estudios de Cingolani et al. (2015, 2020) que encontraron que el rendimiento hídrico de la estación seca está estrechamente relacionado a la precipitación de la estación húmeda anterior. En el caso de la estación húmeda, considerar la precipitación acumulada de doce meses previos a la fecha de muestreo implicaría incluir dos estaciones húmedas diferentes y de manera parcial. Por lo tanto, en este caso se optó por considerar la precipitación acumulada durante los seis meses anteriores a la medición (P6-EH), período que a su vez presenta una correlación muy fuerte con los datos correspondientes a doce meses previos ($r= 0,99$; $p= <0,001$). Para abarcar la variabilidad espacial, a partir de la ubicación geográfica de las 23 estaciones pluviométricas en la región de estudio, se realizó una interpolación de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) con los datos de precipitación calculados según cada estación (seca y húmeda). Como resultado de la interpolación se obtuvieron dos capas ráster de precipitación, una correspondiente a la precipitación acumulada durante los doce meses previos a la medición de agosto de 2019, y otra para la precipitación acumulada de los seis meses anteriores al muestreo en febrero de 2020.

Dado que las estaciones pluviométricas del INA no miden temperatura se consideró la posibilidad de obtenerla a partir de Worldclim o del satélite MERRA 2 (Gelaro et al., 2017). Sin embargo, luego de un análisis preliminar de estos datos, se observó que los mismos no proveen información adecuada para la zona y período estudiado, ya que no reflejan la variación real de la temperatura en el gradiente altitudinal. Si bien no se dispone de datos adecuados para este período en particular, la altitud refleja la diferencia de temperatura entre las secciones a lo largo del gradiente (Colladon 2004), por lo que se decidió utilizar la altitud como un proxy de la temperatura.

Además, se contó con una capa vectorial (shape) de los cursos de agua permanentes y temporarios del área de estudio (APRHI, 2021) y una capa ráster de vegetación (Cingolani et al. en preparación) con las siguientes unidades: pajonales, pastizales con roca y/o suelo desnudo (de aquí en adelante pastizales_rsd), matorrales, bosque nativo, bosques exóticos,

céspedes y roquedales (ver descripción de cada unidad de vegetación en la Tabla MS2, Material suplementario).

El área (km²) de cada sección se calculó a partir del área plana de su respectivo polígono. Una vez obtenidas las capas de variables biofísicas, éstas se superpusieron con los polígonos de las secciones y se calculó para cada uno el promedio de todos los píxeles para obtener un único valor de altitud (m s.n.m.), rugosidad, pendiente (%) y precipitación acumulada para cada estación (mm) para cada sección. Adicionalmente, se calculó la longitud de la red de drenaje por polígono y se la dividió por el área de cada sección para obtener la densidad de la red de drenaje (km/km²). Finalmente, a partir de la capa de vegetación se estimó para cada sección la proporción (%) de cobertura para cada unidad de vegetación.

Se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) como un estimador de la actividad de la vegetación y evapotranspiración real. Este índice se obtuvo a partir de la plataforma GLAM (<https://glam.nasaharvest.org/>) con datos del producto MOD13Q1, generado cada 16 días a una resolución espacial de 250 metros (Didan, 2015). Para cada sección se descargó una tabla con los valores de NDVI promedio de todos los píxeles que caían en la sección; un valor para cada día que pasó el satélite dentro del período considerado para cada estación (seca y húmeda). Luego se calculó para cada sección el NDVI promedio de todos los días de la estación seca (NDVI12-ES), por un lado, y de la húmeda (NDVI6-EH) por el otro. Vale aclarar que el periodo considerado para cada estación es el mismo que se utilizó para la estimación de precipitación.

Tabla 1. Variables biofísicas calculadas para cada sección.

Variable	Unidad	Obtenida a partir de
Altitud media	m s.n.m.	DEM
Área	km ²	Cálculo del área plana del polígono
Rugosidad (TRI) media	-	Capa ráster de TRI
Pendiente media	%	Capa ráster de inclinación de la pendiente
Densidad de drenaje	(km/km ²)	Capa vectorial de red de cursos de agua

P12-ES y P6-EH	mm	Capa ráster resultado de interpolación
NDVI12-ES y NDVI6-EH	-	Plataforma GLAM con datos de MOD13Q1
Cobertura de pajonales	%	Capa de vegetación
Cobertura de pastizales_rsd	%	Capa de vegetación
Cobertura de matorrales	%	Capa de vegetación
Cobertura de bosques nativos	%	Capa de vegetación
Cobertura de bosques exóticos	%	Capa de vegetación
Cobertura de céspedes	%	Capa de vegetación
Cobertura de roquedales	%	Capa de vegetación

4.4. Mediciones de caudal y estimación de rendimiento

El flujo de agua (caudal) se estimó mediante la integración de velocidad-área. En cada uno de los puntos de medición de caudal se seleccionó, en la estación seca (agosto 2019) un segmento de sección recta, sin piletones profundos o curvas y se tomaron, a intervalos regulares de distancia y a lo ancho de toda la sección, medidas de velocidad de la corriente y profundidad. Para determinar la velocidad se utilizó un sensor Doppler portátil, excepto en el sitio P14, donde se recurrió a un perfilador de corriente acústico por tratarse de un curso demasiado caudaloso (ver detalles técnicos en material suplementario). El caudal (m^3/s) se calculó como la suma de los productos entre velocidad, profundidad y posición de cada punto de medición en la sección. Las mismas mediciones se hicieron en estación húmeda (febrero 2020).

Como se indicó anteriormente, en aquellos puntos de medición que comprenden secciones anidadas se descontó el caudal de aguas arriba al caudal medido en el punto en cuestión. Por ejemplo, el punto de medición P14 recibe el aporte de todas las secciones en estudio, pero restando la sumatoria del caudal registrado en todos los puntos anteriores (P1-P13) se obtuvo el caudal que se genera específicamente en la sección 14 (ver figura 1). Naturalmente esto se realizó para ambas fechas de medición. El valor de caudal obtenido para cada sección en la estación seca y húmeda se transformó a rendimiento hídrico dividiendo por el área de dicha sección (m^2), lo que

resulta en unidades de lámina de agua (m/s). Luego ese valor fue transformado finalmente en mm/día ($1 \text{ mm} = 1000 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$).

4.5. Análisis de datos

4.5.1. Variación estacional del rendimiento hídrico

En primer lugar, a modo exploratorio, se analizó la variación estacional del rendimiento hídrico en el conjunto de secciones mediante una prueba t apareada. Este análisis se hizo únicamente para corroborar que efectivamente el rendimiento de la estación húmeda fue más alto que el de la estación seca, dado que puede haber años secos muy atípicos donde el rendimiento en la estación húmeda baje a niveles similares a los de la estación seca.

4.5.2. Variación espacial del rendimiento hídrico e identificación de secciones con mayor rendimiento

Se analizó de manera visual la variación espacial del rendimiento hídrico para detectar las secciones con mayores y menores rendimientos en cada estación. Para esto se crearon mapas que representan el rendimiento de cada sección mediante un gradiente de colores que va desde azul oscuro hasta blanco (representando de mayor a menor rendimiento hídrico, ver resultados).

4.5.3. Variación altitudinal del rendimiento hídrico

Se construyeron regresiones lineales entre la altitud media de las secciones y el rendimiento hídrico de cada estación empleando el término simple y el término cuadrático. El término cuadrático se incluyó para considerar posibles relaciones unimodales entre altitud y rendimiento, en una o en ambas estaciones.

4.5.4. Rendimiento hídrico y variables biofísicas

A modo exploratorio, para describir y sintetizar como co-varían las características biofísicas de las 14 secciones se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés). Partiendo de una matriz de 14 secciones x 16 variables biofísicas (detalladas en la Tabla 1), se seleccionaron los primeros dos ejes del PCA que explican la mayor proporción de la varianza. Estos dos ejes fueron usados como variables resumen de las tendencias biofísicas principales de las secciones dentro del gradiente. Por otro lado, se exploró la asociación entre todos los pares de variables mediante correlaciones de Pearson (Figura MS1, Material Suplementario).

Se buscaron, por medio de una regresión a pasos manual “hacia adelante” (“forward regresión análisis” en inglés), los modelos de uno, de dos y de tres términos con mejor ajuste para el rendimiento hídrico de cada estación (variables dependientes o respuesta), independientemente de la significancia. Para todas las variables se consideró sólo el término simple, excepto en el caso de la altitud, para la cual también se incluyó el término cuadrático. Para cada variable de respuesta (rendimiento en estaciones seca y húmeda) se buscó, en primer lugar, el modelo de término único con mejor ajuste (R^2 más alto). Luego se incorporaron variables una por una hasta encontrar el modelo con dos términos que produjera el mayor aumento del R^2 . Se procuró que las variables agregadas no se correlacionen significativamente entre sí. Finalmente, se agregó un tercer término a los modelos siguiendo el mismo procedimiento. Para el caso de las variables precipitaciones y NDVI que fueron medidas para dos períodos diferentes, se incorporaron según la estación correspondiente (e.g. P12-ES con rendimiento hídrico de estación seca y P6-EH con rendimiento hídrico de estación húmeda). Adicionalmente, como un análisis complementario que tuviera en cuenta la variación conjunta de todas las variables biofísicas, se construyeron regresiones de dos términos, con los dos ejes del PCA como variables independientes, y el rendimiento hídrico de cada estación como variables dependientes. Para todos los análisis de datos se utilizó Rstudio versión 1.3.1056 (RStudio Team, 2020) y los paquetes Hmisc, ggplot2, corrplot y ggcorrplot, además de los paquetes base ya incluidos en el software.

5. Resultados

5.1. Variación estacional del rendimiento hídrico

Con era de esperar, el rendimiento hídrico de la estación húmeda fue significativamente mayor que el de la estación seca ($t= 5,96$, $p<0,001$; Figura 2). En promedio, el rendimiento de la estación húmeda fue cinco veces mayor que el de la estación seca. En términos absolutos esto representa un incremento promedio de 0,57 mm diarios. La máxima variación estacional fue registrada en las secciones S6 y S14, donde el rendimiento en la estación húmeda fue nueve veces mayor respecto a la seca; mientras que la mínima se observó en la sección S10, donde la estación húmeda tuvo algo menos que el doble de rendimiento hídrico que la estación seca.

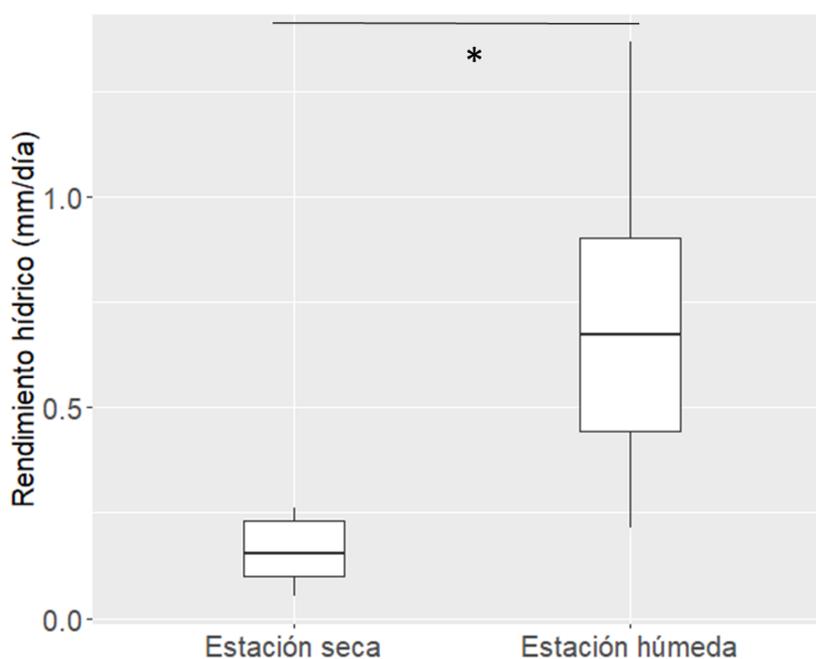


Figura 2. Gráfico de cajas del rendimiento hídrico para cada estación analizada. El asterisco indica diferencias significativas entre las estaciones ($p<0,001$).

5.2. Variación espacial del rendimiento hídrico e identificación de secciones con mayor rendimiento

Las secciones que exhibieron rendimientos hídricos máximos variaron entre las dos estaciones, mientras que las que menos rindieron fueron las

mismas en ambas estaciones (Ver Figura 3a y b). Para la estación seca, las secciones que más rindieron fueron S10, S5 y S8 situadas a altitudes intermedio-altas; mientras que durante la estación húmeda, la sección S14, situada en la parte inferior del gradiente, y las secciones S6 y S5, ubicadas en la parte superior, se encontraron dentro de las más rendidoras. Por su parte, las secciones S1, S2, S3 y S4, del extremo superior del gradiente altitudinal, presentaron rendimientos hídricos mínimos en ambas estaciones.

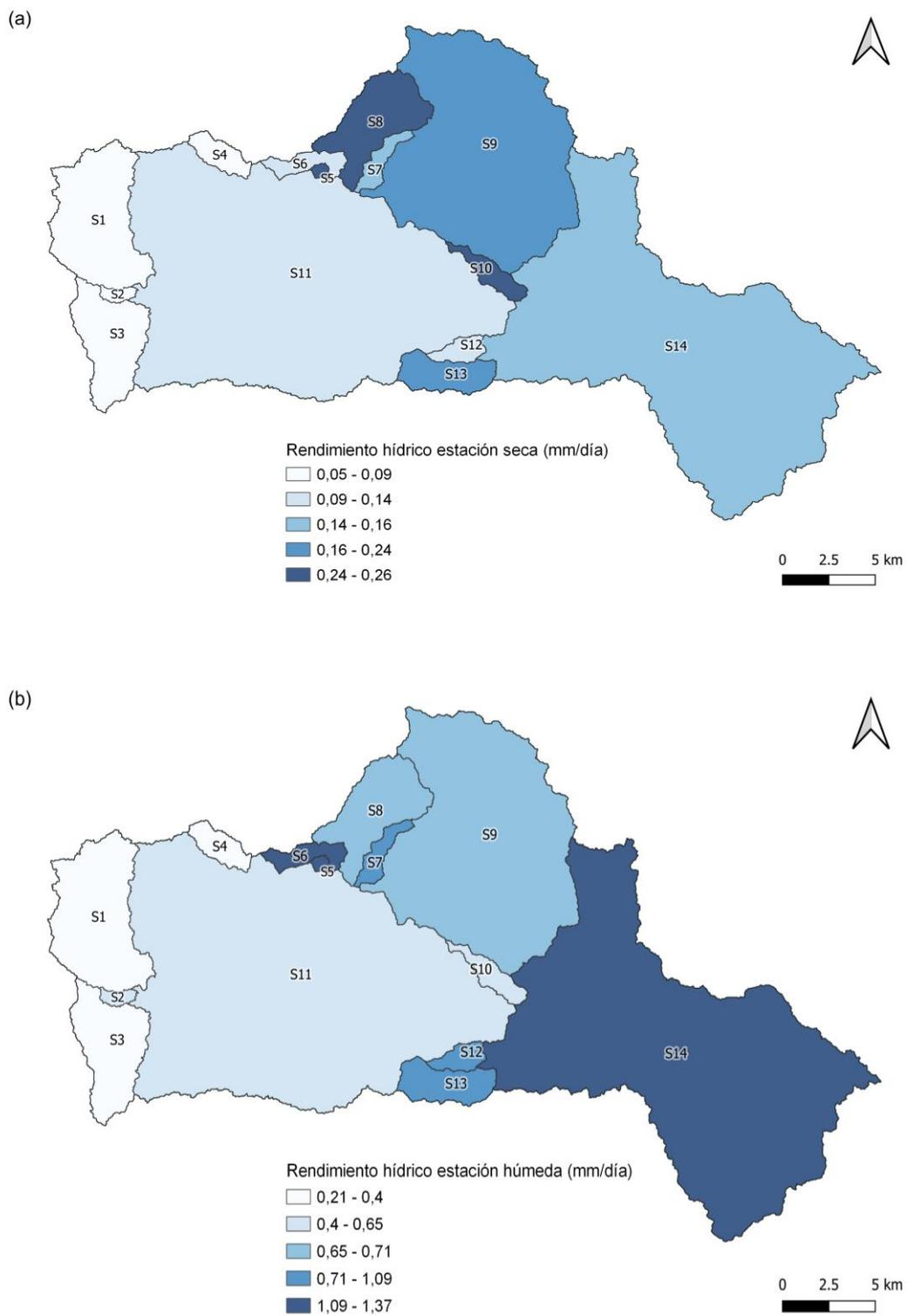


Figura 3. Representación del rendimiento hídrico de las estaciones seca (a) y húmeda (b) de cada sección.

5.3. Variación altitudinal del rendimiento hídrico

El rendimiento hídrico de la estación seca se relacionó cuadráticamente con la altitud media de las secciones, siendo las secciones situadas a altitudes intermedias (entre los 1000 y 1600 m.s.n.m) las más rendidoras ($R^2 = 0,61$, $p < 0,05$; Figura 4). Por otro lado, no se detectó una relación significativa entre el rendimiento hídrico en la estación húmeda y la altitud de las secciones ($p = 0,17$, Figura 4).

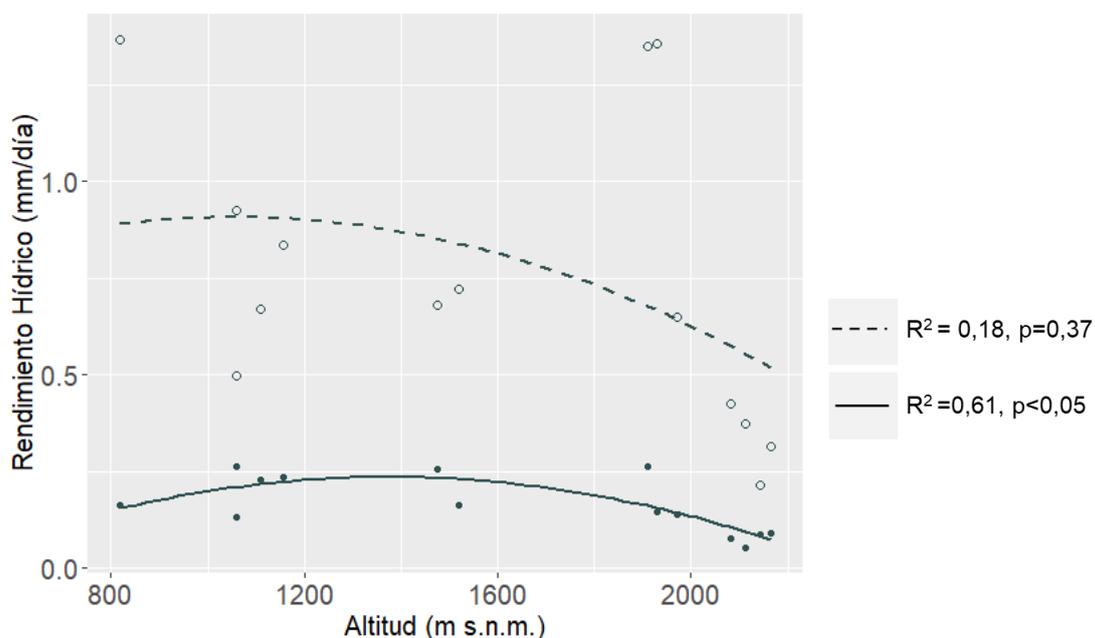


Figura 4. Relación entre el rendimiento hídrico y la altitud media de cada sección para las estaciones seca (línea y puntos sólidos) y húmeda (línea discontinua, puntos vacíos; no significativa).

5.4. Rendimiento hídrico y variables biofísicas

Los valores obtenidos para cada sección de las variables topográficas, climáticas y de cobertura vegetal, junto con el caudal y rendimiento hídrico basal calculado para cada estación se incluyeron en la Tabla MS3 del Material Suplementario. La variación en las características biofísicas de las secciones fue resumida en conjunto en los dos primeros ejes del espacio multivariado de un PCA (Figura 5). El eje 1 del PCA explicó el 38,2% de la varianza y describe un gradiente de altitud y de cobertura vegetal en el que las secciones situadas

al extremo negativo del eje tienen mayor altitud, mayor cobertura de roquedales y una mayor densidad de drenaje que las secciones situadas hacia el extremo positivo del eje, que presentan menor altitud y mayor cobertura de bosques y matorrales nativos y NDVI. Por su parte, el eje 2 del PCA, que absorbió un 24,9% de la varianza total, describe un gradiente desde secciones con mayor precipitación, terrenos más escarpados y rugosos, y mayor cobertura de pastizales con roca y/o suelo desnudo en el lado positivo, hacia secciones con menor precipitación, mayor cobertura de pajonales y menos escarpadas y rugosas en el sector negativo del mismo.

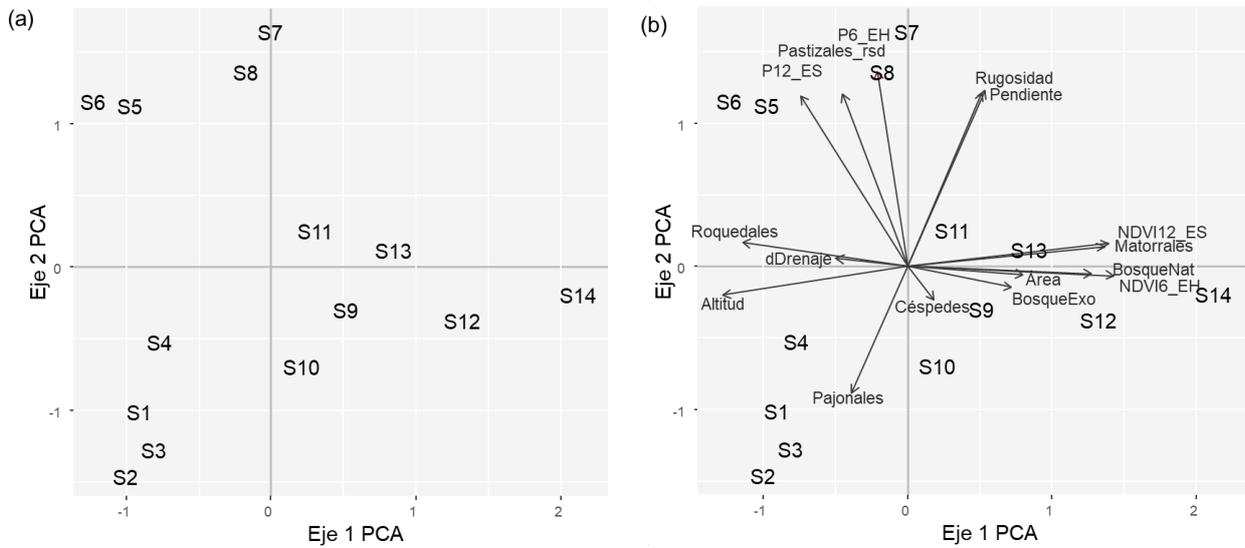


Figura 5. (a) Ubicación de cada una de las secciones en el espacio multivariado de los ejes 1 y 2 del PCA. (b) Contribución de las variables biofísicas a los ejes 1 y 2 del PCA.

Para el rendimiento hídrico de la estación seca, la Tabla 2 resume el mejor modelo de regresión de uno, dos y tres términos. El mejor modelo de un solo término mostró una relación negativa entre el rendimiento y la altitud (Tabla 2, Figura 6a). El modelo de dos términos con mejor ajuste incluyó, además de la altitud, a la cobertura de pastizales con roca y/o suelo desnudo (Tabla 2, Figura 6b), indicando que, a valores fijos de altitud, las secciones con mayor cobertura de este tipo de pastizales rindieron más. El mejor modelo de tres términos agregó a las anteriores variables la cobertura de bosques exóticos, relacionada negativamente con el rendimiento hídrico (Tabla 2, Figura

6c). Sin embargo, esta última relación debe ser interpretada con precaución, ya que está determinada principalmente por una única sección que tiene una cobertura de bosques exóticos más alta que el resto (14%, en comparación a un rango de variación en el resto de las secciones entre 0 y 2,5%) y un muy bajo rendimiento hídrico.

Tabla 2. Mejor modelo de regresión de uno, dos y tres términos para **predecir** el rendimiento hídrico en la estación seca (mm/día) a partir de las variables biofísicas. Para cada modelo se reporta el coeficiente, el p-valor, la varianza explicada (%) y el coeficiente de regresión (R^2).

	Coeficiente	p	Varianza explicada (%)	R^2
<i>Modelo de un término</i>				
Intercepto	3,07 E ⁻¹	<0,001		
Altitud	- 8,9 E ⁻⁵	0,025	0,35	0,35
<i>Modelo de dos términos</i>				
Intercepto	2,3 E ⁻¹	<0,001		
Altitud	-1,03 E ⁻⁴	0,001	0,35	
Pastizales_rsd	3,05 E ⁻³	0,002	0,38	0,73
<i>Modelo de tres términos</i>				
Intercepto	2,8 E ⁻¹	<0,001		
Altitud	-1,2 E ⁻⁴	<0,001	0,35	
Pastizales_rsd	2,9 E ⁻³	0,001	0,38	
Bosques exóticos	-6,7 E ⁻³	0,04	0,09	0,82

Para el rendimiento hídrico de la estación húmeda, la Tabla 3 resume el mejor modelo de regresión de uno, dos y tres términos. El mejor modelo con un solo término incluyó la cobertura de pajonales, relacionada negativamente con el rendimiento en dicha época (Tabla 3, Figura 6d). La incorporación de la cobertura de céspedes, relacionada negativamente con el rendimiento, al modelo anterior mejoró significativamente el ajuste (Tabla 3, Figura 6e). Esto indica que las secciones con mayor cobertura de pajonales y céspedes rindieron menos que aquellas con bajas coberturas de este tipo de fisonomías. El mejor modelo con tres términos incorporó la altitud que, aunque no fue

significativa ($p=0,14$), describe una tendencia negativa con el rendimiento (Tabla 3, Figura 6f).

Tabla 3. Mejor modelo de regresión de uno, dos y tres términos para predecir el rendimiento hídrico en la estación húmeda (mm/día) a partir de las variables biofísicas. Para cada modelo se reporta el coeficiente, el p-valor, la varianza explicada (%) y el coeficiente de regresión (R^2).

	Coeficiente	p	Varianza explicada (%)	R^2
<i>Modelo de un término</i>				
Intercepto	1,28	<0,001		
Pajonales	-0,01	<0,001	0,62	0,62
<i>Modelo de dos términos</i>				
Intercepto	1,55	<0,001		
Pajonales	-0,02	<0,001	0,62	
Céspedes	-0,03	0,03	0,14	0,76
<i>Modelo de tres términos</i>				
Intercepto	1,8	<0,001		
Pajonales	-0,02	<0,001	0,62	
Céspedes	-0,03	0,02	0,14	
Altitud	-0,0002	0,14	0,05	0,81

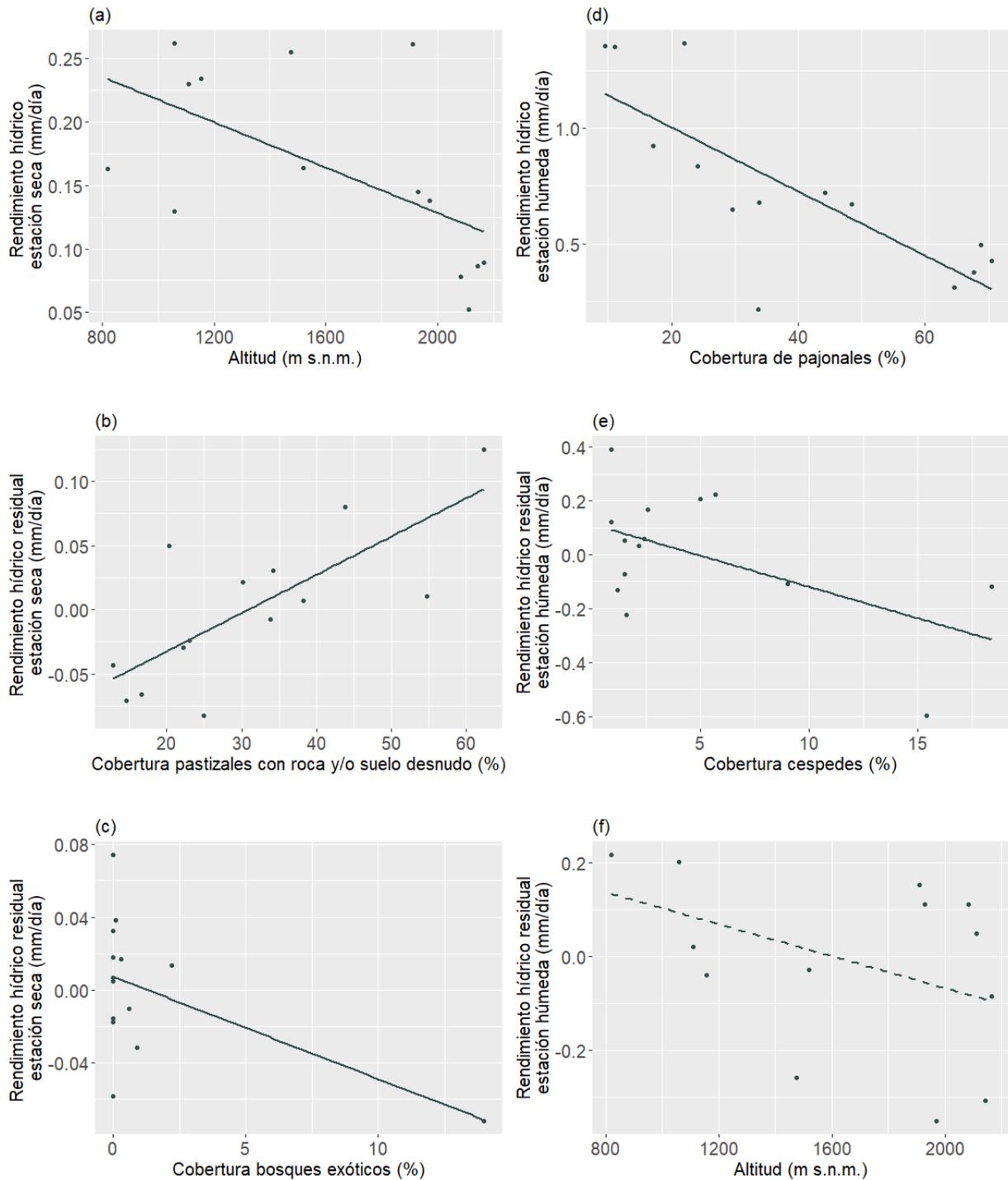


Figura 6. Representación gráfica de los modelos de regresión de una, dos y tres variables para el rendimiento hídrico (mm/día) de las estaciones seca (columna izquierda: a-c) y húmeda (columna derecha: d-f). En cada caso, el rendimiento hídrico residual representa la proporción de la varianza del rendimiento no explicada por el modelo anterior. Las relaciones no significativas fueron representadas mediante líneas discontinuas.

Por otra parte, a través de una regresión múltiple, se detectó una relación positiva y significativa entre el rendimiento hídrico de la estación seca y el eje 2 del PCA (Tabla 4). Es decir, en secciones más escarpadas y rugosas, con mayor precipitación y cobertura de pastizales con roca y/o suelo desnudo el rendimiento fue mayor (Tabla 4, Figura 7a). A su vez, existe una tendencia positiva, aunque no significativa, entre el eje 1 del PCA y el rendimiento en esta estación (Tabla 4, Figura 7b). De manera similar, el rendimiento hídrico de la estación húmeda se relacionó positiva y significativamente con el eje 2 (Tabla 5, Figura 8a) y mostró una tendencia positiva con el eje 1 del PCA (Tabla 5, Figura 8b). Sin embargo, en ambos casos, el ajuste de estas regresiones fue más bajo que el ajuste de los modelos de dos términos cuando se consideran las variables independientes.

Tabla 4. Modelo de regresión lineal múltiple entre el rendimiento hídrico (mm/día) de la estación seca y los dos primeros ejes del PCA. Se reporta el coeficiente, el p-valor, la varianza explicada (%) y el coeficiente de regresión (R^2).

	Coeficiente	p	Varianza explicada (%)	R^2
Intercepto	0,16	<0,001		
Eje 2 PCA	0,02	0,04	0,30	
Eje 1 PCA	0,009	0,25	0,08	0,38

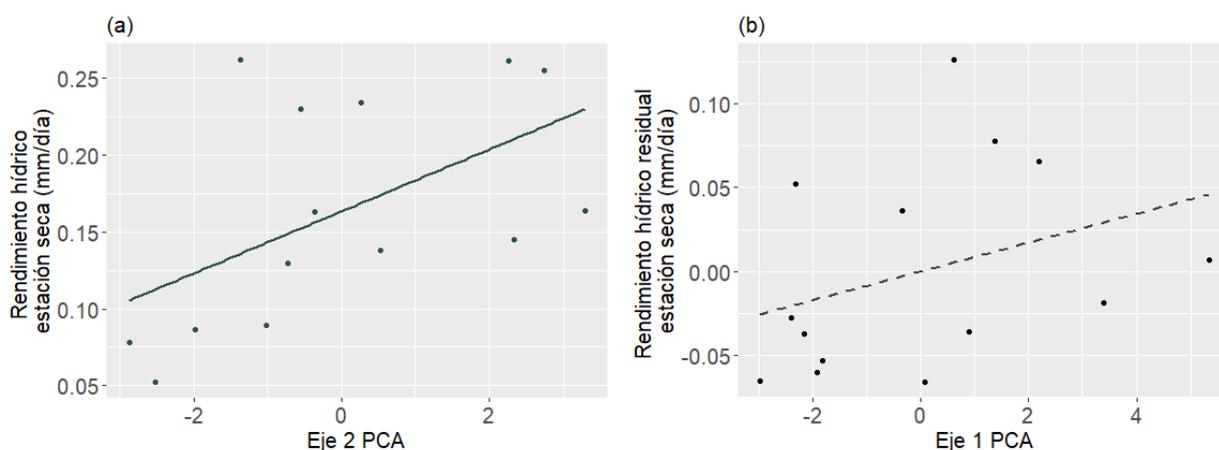


Figura 7. (a) Rendimiento hídrico de la estación seca en función del eje 2 del PCA y (b) rendimiento hídrico residual (no explicado por el eje 2 del PCA) en función del eje 1 del PCA (relación no significativa). Los detalles del modelo se indican en la Tabla 4.

Tabla 5. Modelo de regresión lineal múltiple entre el rendimiento hídrico (mm/día) de la estación húmeda y los dos primeros ejes del PCA. Se reporta el coeficiente, el p-valor, la varianza explicada (%) y el coeficiente de regresión (R^2).

	Coeficiente	p	Varianza explicada (%)	R^2
Intercepto	0,74	<0,001		
Eje 2 PCA	0,11	0,02	0,34	
Eje 1 PCA	0,05	0,18	0,10	0,44

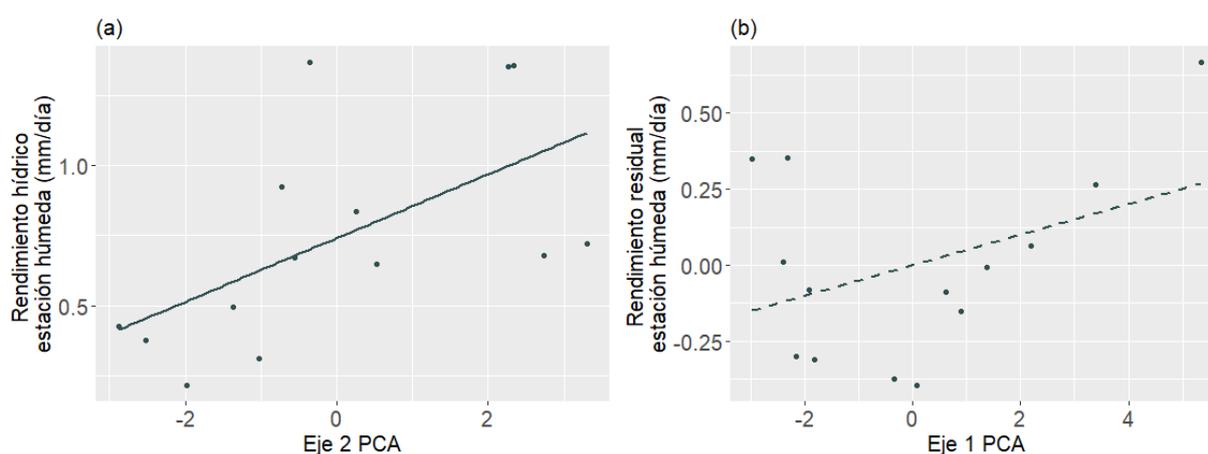


Figura 8. (a) Rendimiento hídrico de la estación húmeda en función del eje 2 del PCA y (b) rendimiento hídrico residual (no explicado por el eje 2 del PCA) en función del eje 1 del PCA (relación no significativa). Los detalles del modelo se indican en la Tabla 5.

6. Discusión

La cuenca del río Anisacate, en promedio, mostró una variación temporal de rendimiento hídrico que indicó que éste fue cinco veces mayor en la estación húmeda respecto a la estación seca. La variación estacional del rendimiento hídrico observada es comparable con la de otros estudios llevados a cabo en la zona (Tabla 6). En conjunto, estos resultados muestran que el rendimiento está fuertemente ligado a la distribución estacional de las precipitaciones en la región. Vale destacar que en este trabajo se estimó el rendimiento hídrico a partir de datos de caudal base de un solo día para cada estación, lo cual sugiere que la magnitud de diferencia respecto al caudal de

tormenta puede ser significativamente mayor a lo aquí reportado. Por ejemplo, en La Trucha, una cuenca de área similar a la sección S2 pero ubicada a 700 metros más abajo, al sur de la cuenca del Anisacate, se registraron picos de caudal de hasta 1 m³/s durante episodios de lluvia intensa (Martínez et al. 2016), que implican un incremento de 60 veces el rendimiento de la estación seca.

Tabla 6. Valores de caudal medio y rendimiento hídrico de las estaciones seca y húmeda, área y rango altitudinal de tres cuencas del mismo cordón serrano en la Provincia de Córdoba, obtenidos a partir de otros estudios. En cada caso se indica además el período de recolección de datos.

	La Trucha ¹	Anisacate-Santa Ana ²	San José ³
Caudal estación seca estación húmeda (m ³ /s)	0,02 0,2	1,03 8,16	1,5 7,3
Área (km ²)	1,9	465	425
Rendimiento hídrico estación seca estación húmeda (mm/día)	0,094 0,94	0,19 1,52	0,3 1,48
Rango altitudinal (m s.n.m.)	1207-1374	900-2259	919-2259
Período	Mar 2005- Feb 2006	1925-1980	1955-1981

Los valores de rendimiento detallados fueron calculados según datos de caudal medio, integrando valores de nivel base y de tormenta.

¹: Estimación en función de los datos de Martínez et al. (2016)

²: Díaz et al. (2016b)

³: Lecomte et al. (2011).

Este trabajo tuvo como objetivo principal analizar la variación altitudinal del rendimiento hídrico basal de dos estaciones contrastantes del año en la cuenca del río Anisacate. La predicción originalmente planteada sugería que el rendimiento hídrico aumentaría conforme lo hiciera la altitud, debido a que el balance climático se hace más favorable en dicho gradiente (a mayores altitudes, menor evapotranspiración potencial por menor temperatura y mayor precipitación). Contrario a lo esperado, el rendimiento hídrico no fue mayor en la zona superior del gradiente altitudinal, independientemente de la estación del año considerada. En la estación seca, el rendimiento fue significativamente mayor en aquellas secciones situadas a altitudes intermedias; en el caso de la estación húmeda, la relación del rendimiento con la altitud no fue significativa. El caudal base de la estación seca depende del flujo subterráneo de agua almacenada en el suelo o grietas de las rocas hacia los cursos de agua. Por lo

tanto, los resultados indicarían que las secciones situadas a altitudes intermedias tienen una mayor percolación de agua hacia capas profundas del suelo, mayor capacidad almacenamiento de agua en el suelo y/o menores pérdidas de agua por evapotranspiración. Curiosamente, las secciones situadas en la zona altitudinal superior fueron las menos rendidoras en ambas estaciones (S1, S2, S3 y S4). Estos resultados no apoyan aquellos encontrados para otros lugares semiáridos del mundo que evidencian la relación negativa entre el rendimiento hídrico y la temperatura, y positiva con las precipitaciones (Fu et al. 2007; Xu et al. 2010; Wilson & Guan 2004).

En la estación seca, si bien el rendimiento hídrico mostró una relación unimodal con la altitud, al incorporar otros posibles factores reguladores se observó que el mejor modelo de dos términos combina un efecto negativo de la altitud, con uno positivo de la cobertura de pastizales con roca y/o suelo desnudo. La varianza explicada por este modelo es mucho más alta que la explicada por el modelo que describe la relación unimodal ($R^2=0,73$, $R^2=0,62$, respectivamente). Al considerar el mejor modelo de tres términos, se agrega un efecto negativo de la cobertura de bosques exóticos. De este modo, puede interpretarse que, si se mantienen los otros dos factores constantes, el efecto de la altitud sobre el rendimiento hídrico de la estación seca es negativo.

En la estación húmeda, el mejor modelo de un solo término indicó que el rendimiento disminuye a medida que aumenta la cobertura de pajonales; mientras que al agregar un segundo término el mejor modelo indicó la relación negativa con la cobertura de céspedes. Si bien la altitud se incluyó en el modelo de la estación húmeda como un tercer término no significativo, el tamaño del efecto no es despreciable y fue en el mismo sentido que para la estación seca, lo cual sugiere que existe una tendencia. En definitiva, la relación entre el rendimiento y la altitud, controlando la variabilidad por otros factores, fue claramente negativa para la estación seca, y también mostró una tendencia negativa para la estación húmeda, lo cual es contrario a lo esperado.

Diversos estudios realizados en la zona han demostrado la existencia de fracturas en las rocas del batolito de Achala en la porción más alta de la

cuenca, por las que infiltra y circula agua que luego se reincorpora a los cursos de arroyos y ríos a través de flujo subsuperficial (Pasquini et al 2002; Lecomte et al. 2011; Martinez et al. 2016). La contribución del flujo subsuperficial al caudal base aumenta aguas abajo (Lecomte et al. 2011), por lo que en este trabajo se hipotetiza que a través de las fracturas de las secciones superiores se producen trasvases de caudal hacia las secciones situadas en la parte media e inferior del gradiente altitudinal, lo cual podría explicar la relación negativa del rendimiento conforme aumenta la altitud. De esta manera, el aparente menor rendimiento de las secciones superiores sería en realidad en términos de agua superficial, debido a que estas secciones podrían estar teniendo fugas de agua a través de flujo subsuperficial el cual alimentaría a las secciones situadas aguas abajo (Fan Y. 2019).

Dado que la cobertura de pajonales se correlacionó negativamente con la cobertura de pastizales con roca y/o suelo desnudo (Figura MS1, Material Suplementario), el control del rendimiento no sería tan diferente entre ambas estaciones. Es importante destacar que los pastizales con roca y/o suelo desnudo pueden tener una alta proporción de afloramientos rocosos (25-60%) (Cingolani et al. En preparación). El mecanismo por el cual los afloramientos rocosos podrían contribuir a incrementar el caudal posiblemente involucra el aumento de la precipitación efectiva en los parches de vegetación dentro de la sección no cubierta por afloramientos. Es decir, en los afloramientos el agua de lluvia escurre directamente hacia sectores con complejo vegetación-suelo en los que el agua es capaz de infiltrar y alimentar un flujo subsuperficial (Cingolani et al. 2015; Poca et al. 2018a, b). Por el contrario, algunos trabajos sugieren que en la medida que la cobertura vegetal es mayor, como podría ser la de la cobertura de pajonales (y menor con la de pastizales con roca y/o suelo desnudo) la pérdida de agua por evapotranspiración prevalece por sobre el efecto positivo de la vegetación de favorecer las oportunidades de infiltración y flujo subterráneo de agua (ver discusión en Bruijnzeel, 1989, 2004). Sin embargo, esto es contradictorio a lo encontrado para las cabeceras de la cuenca de estudio a escala de sitio por Poca et al. (2018a, b), quienes observaron que a medida que la vegetación es más estructurada se promueve la intercepción de agua de niebla y las propiedades edáficas que favorecen la

infiltración y almacenamiento de agua en la capa saturada y no saturada del suelo. A futuro sería importante diseñar estudios que permitan investigar a escala de paisaje la dinámica temporal y espacial de posibles 'subsídios' de agua desde los afloramientos rocosos hacia parches con vegetación.

El efecto negativo de los bosques exóticos sobre el rendimiento en la estación seca podría explicarse teniendo en cuenta las altas tasas de evapotranspiración que pueden tener las especies exóticas. Un ejemplo de ello es el estudio de Jobbágy et al. (2013), quienes mostraron que el caudal de cuencas con plantaciones de *Pinus* spp. en la zona de Calamuchita, al sur de la cuenca del Anisacate, es menor comparado a cuencas cubiertas por pastizal natural. Los investigadores encontraron que esto se debe a que estos bosques exóticos sostienen la evapotranspiración a lo largo de todo el año a diferencia de los pastizales. En este sentido, resulta fundamental el control de especies exóticas invasoras para optimizar el rendimiento. Si bien actualmente las leñosas invasoras se encuentran en bajas densidades, están expandiéndose rápidamente y hacia zonas altas de la montaña (Giorgis et al. 2011). Sin embargo, hay que tomar con cautela este resultado, ya que la relación negativa y significativa entre el rendimiento hídrico de la estación seca y la cobertura de bosques exóticos parece forzada por una única sección en la que se detectó un 14% de cobertura de este tipo de vegetación y un rendimiento muy bajo. El resto de las secciones prácticamente no tuvieron cobertura de bosques exóticos. Por otro lado, la influencia negativa de los céspedes sobre el rendimiento en la estación húmeda apoya los resultados de Poca et al. (2018a, b) mencionados anteriormente, indicando que este tipo de cobertura vegetal poco estructurada tendría efectos desfavorables sobre las propiedades del suelo relacionadas con la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua.

El modelo de regresión entre el rendimiento hídrico y los ejes del análisis multivariado, que combinaron todas las variables biofísicas estudiadas, reveló que las secciones menos rendidoras, además de estar situadas a mayores altitudes, tener menor cobertura de pastizales con roca y/o suelo desnudo y mayor cobertura de pajonales y céspedes, también fueron más planas y menos rugosas. Estudios previos en las cabeceras de cuencas de la zona demostraron que las microcuencas dominadas por paisajes de lomas suaves y

una alta proporción de llanuras rinden menos que aquellas con paisajes más escarpados, con una alta proporción de valles profundos y afloramientos rocosos (Cingolani et al. 2015). Estudios futuros que incluyan intencionalmente secciones de ambos extremos topográficos, tanto planas como rugosas, facilitarán la confirmación o no el patrón altitudinal de rendimiento hídrico encontrado en este trabajo.

Los resultados obtenidos en este estudio señalaron que en la cuenca del río Anisacate el rendimiento hídrico de las estaciones seca y lluviosa, cuando se controla por otros factores, disminuyó conforme aumentó la altitud a diferencia de lo esperado. Adicionalmente, el análisis de la relación entre el rendimiento y las variables biofísicas sugiere que los factores que ejercen un mayor control sobre el rendimiento no serían tan diferentes entre estaciones, tal como se evidenció a través de la relación negativa con la cobertura de pajonales y céspedes y positiva con la cobertura de pastizales con roca y/o suelo desnudo, situados en zonas de mayor rugosidad.

A la luz de los resultados de este trabajo, para asegurar el recurso hídrico en la región y prevenir la escasez de agua y posibles conflictos sociales, es imperiosa la necesidad de implementar estrategias de manejo orientadas a la conservación de las zonas media e inferior de la cuenca del Anisacate. Hoy en día, gran parte de la cuenca media y baja se encuentra desprotegida y, por lo tanto, es más vulnerable frente a la creciente urbanización, turismo, invasión de especies exóticas y mayor frecuencia de incendios que tienen lugar en esta zona (INDEC, 2012; Giorgis et al. 2011 Cingolani et al. 2008). Si bien la parte más alta de la cuenca y una pequeña porción de la zona media se encuentran protegidas por el Parque Nacional Quebrada del Condorito y por la Reserva Provincial Pampa de Achala respectivamente; la Reserva Provincial, en particular, no cuenta con un plan de manejo vigente a la fecha.

Este fue el primer estudio de la variación de la oferta hídrica a lo largo del gradiente altitudinal en las sierras de Córdoba. A futuro sería interesante profundizar en el análisis de los mecanismos detrás de los patrones de variación del rendimiento hídrico observados, a través de herramientas de geoquímica e isótopos ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, ^{222}Rn) que permitan cuantificar la contribución del flujo subsuperficial preferencial al caudal en distintas zonas de

la cuenca. También sería útil considerar la litología de las secciones como una variable explicatoria adicional de la variación del rendimiento debido a la importancia de la permeabilidad de las rocas en el almacenamiento de agua. Finalmente, debido a que el punto de toma de agua para los pueblos de La Paisanita, La Bolsa y Anisacate se encuentra aguas arriba del sitio de medición 14, sería importante relevar el consumo de agua diario para estimar mejor el rendimiento hídrico de esa sección – Sin embargo, vale aclarar que esto más que modificar el patrón encontrado lo enfatizará, ya que la sección 14 ya fue de por sí la más rendidora sin considerar el agua extraída para consumo.

7. Referencias bibliográficas

- APRHI, 2021. Cursos de agua de la Provincia de Córdoba. Página web: <https://portal-aprhi.opendata.arcgis.com/datasets/APRHI::cursos-de-agua-2/about>. Descargada el día 20/06/2021.
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G. R., Alvarado-Barrientos, M. S., Rebel, K., Van Osch, F. P., Rietkerk, M., ... & Dawson, T. E. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant–water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1-2), 3-22.
- Beck, H. E., De Roo, A., & van Dijk, A. I. (2015). Global maps of streamflow characteristics based on observations from several thousand catchments. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1478-1501.
- Berardo, R. (2014). The evolution of self-organizing communication networks in high-risk social-ecological systems. *International Journal of the Commons*, 8(1).
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K. E., & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 32, 67-98.
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of hydrology*, 310(1-4), 28-61.
- Bruijnzeel, L. A. (1989). forestation and dry season flow in the tropics: A closer look. *Journal of Tropical Forest Science*, 229-243.
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, ecosystems & environment*, 104(1), 185-228.
- Cabido, M., Breimer, R., & Vega, G. (1987). Plant communities and associated soil types in a high plateau of the Córdoba mountains, central Argentina. *Mountain Research and Development*, 25-42.
- Capone M.E., y Mortarino N., Rico A., Dasso C., Catalini C. Procesamiento Primario de Datos de Precipitación Suministrados por el Sistema de Adquisición de Datos Hidrometeorológicos a Tiempo Real en la Provincia de Córdoba. AÑO HIDROLÓGICO 2017-2018. Convenio Marco entre Instituto Nacional del Agua – Ministerio de Gobierno y Seguridad de la Provincia de Córdoba. Adecuación y Mantenimiento de Estaciones Telemétricas de tecnología ALERT, con fines de Adquisición de Datos Hidrometeorológicos a Tiempo Real. Expediente INA N° 17799/17 Protocolo INA N° 1556.
- Cingolani, A. M., Vaieretti, M. V., Giorgis, M. A., La Torre, N., Whitworth-Hulse, J. I., & Renison, D. (2013). Can livestock and fires convert the sub-tropical

mountain rangelands of central Argentina into a rocky desert?. *The Rangeland Journal*, 35(3), 285-297.

Cingolani, A. M., Vaieretti, M. V., Giorgis, M. A., Poca, M., Tecco, P. A., & Gurvich, D. E. (2014). Can livestock grazing maintain landscape diversity and stability in an ecosystem that evolved with wild herbivores?. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 16(4), 143-153.

Cingolani, A. M., Poca, M., Giorgis, M. A., Vaieretti, M. V., Gurvich, D. E., Whitworth-Hulse, J. I., & Renison, D. (2015). Water provisioning services in a seasonally dry subtropical mountain: Identifying priority landscapes for conservation. *Journal of Hydrology*, 525, 178-187.

Cingolani, A. M., Poca, M., Whitworth-Hulse, J. I., Giorgis, M. A., Vaieretti, M. V., Herrero, L., ... & Renison, D. (2020). Fire reduces dry season low flows in a subtropical highland of central Argentina. *Journal of Hydrology*, 590, 125538.

Cingolani, A.M., Giorgis, M., Hoyos LE., Cabido, M. (en preparación). Mapa de la vegetación actual de las montañas de Córdoba (Argentina): bases para el ordenamiento ambiental del territorio.

Colladon, L. (2004). Temperaturas medias mensuales. Cuenca del río San Antonio, Sistema del Río Suquia, Provincia de Córdoba. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) y Centro de Investigaciones de la Región Semiárida (CIRSA).Córdoba, Argentina.

Colladon, L., (2014). Anuario pluviométrico 1992–2012. Cuenca del Río San Antonio, Sistema del Río Suquia, Provincia de Córdoba. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) y Centro de Investigaciones de la Región Semiárida (CIRSA).Córdoba, Argentina.

Colladon, L., (2018). Anuario pluviométrico 2012-2017. Cuenca del Río San Antonio, Sistema del Río Suquia, Provincia de Córdoba. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) y Centro de Investigaciones de la Región Semiárida (CIRSA).Córdoba, Argentina.

Colladon L., (2020). Anuario pluviométrico 2015-2020. Cuenca del Río Anisacate, Sistema del Río Segundo, Provincia de Córdoba. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) y Centro de Investigaciones de la Región Semiárida (CIRSA), Córdoba, Argentina.

Colladon, L., Velez, E., (2011). Sistema de Monitoreo automático de Ríos en las Sierras de Córdoba. Quinto Simposio Regional Sobre Hidráulica De Ríos, Córdoba,Argentina.

Dasso, C. M., Piovano, E. L., Pasquini, A. I., Córdoba, F. E., Lecomte, K. L., Guerra, L., & Campodónico, V. A. (2014). Recursos hídricos superficiales. In *Relatorio del XIX Congreso Geológico de Córdoba* (Vol. 2, pp. 1209-1231).

- Díaz, E., Rodríguez, A., Dölling, O., Bertoni, J. C., & Smrekar, M. (2016a). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 125-133.
- Díaz, E. B. (2016b). *Sequías Hidrológicas en la República Argentina y su relación con Variables Macroclimáticas*. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.
- Didan, K. (2015). MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2021-02-22 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>
- Dobriyal, P., Badola, R., Tuboi, C., & Hussain, S. A. (2017). A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management. *Applied Water Science*, 7(6), 2617-2628.
- ESRI 2011. *ArcGIS Desktop: Release 10.7*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Fan, Y. (2019). Are catchments leaky?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(6), e1386.
- Flener, C., Wang, Y., Laamanen, L., Kasvi, E., Vesakoski, J. M., & Alho, P. (2015). Empirical modeling of spatial 3d flow characteristics using a remote-controlled ADCP system: monitoring a spring flood. *Water*, 7(1), 217-247.
- Fu, G., Charles, S. P., & Chiew, F. H. (2007). A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. *Water Resources Research*, 43(11).
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., et al. (2017). The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419– 5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Ghimire, C. P., Bruijnzeel, L. A., Lubczynski, M. W., & Bonell, M. (2014). Negative trade-off between changes in vegetation water use and infiltration recovery after reforestation degraded pasture land in the Nepalese Lesser Himalaya. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 4933-4949.
- Giorgis, M. A., Tecco, P. A., Cingolani, A. M., Renison, D., Marcora, P., & Paiaro, V. (2011). Factors associated with woody alien species distribution in a newly invaded mountain system of central Argentina. *Biological Invasions*, 13(6), 1423-1434.
- Hersch, R. W. (2008). *Streamflow measurement*. CRC press.

- INDEC (2012). Censo nacional de población, hogares y viviendas 2010: censo del Bicentenario: resultados definitivos, Serie B No. 2. Buenos Aires, Argentina.
- Jobbágy, E. G., Acosta, A. M., & Noretto, M. D. (2013). Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología austral*, 23(2), 87-96.
- Jobbágy, E. G., Pascual, M., Barral, M. P., Poca, M., Silva, L. G., Oddi, J., ... & Villagra, P. E. En prensa. Representación espacial de la oferta y la demanda de los servicios ecosistémicos vinculados al agua. *Ecología Austral*, 31, XXX-XXX.
- Lecomte, K. L., García, M. G., Fórmica, S. M., & Depetris, P. J. (2011). Hidroquímica de ríos de montaña (Sierras de Córdoba, Argentina): Elementos mayoritarios disueltos. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*, 18(1), 43-62.
- Martínez, J. O., Campodonico, V. A., Formica, S. M., & Depetris, P. J. (2016). Weathering assessment in the Achala Batholith of the Sierra de Comechingones, Córdoba, Central Argentina. II: major hydrochemical characteristics and carbon dynamics. *Environmental Earth Sciences*, 75(7), 1-19.
- Mercado-Bettín, D., Salazar, J. F., & Villegas, J. C. (2017). Global synthesis of forest cover effects on long-term water balance partitioning in large basins. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-18.
- Messerli, B., Viviroli, D., & Weingartner, R. (2004). Mountains of the world: vulnerable water towers for the 21st century. *Ambio*, 29-34.
- Neary, D. G., Ice, G. G., & Jackson, C. R. (2009). Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest ecology and management*, 258(10), 2269-2281.
- Pasquini, A. I., Grosso, L. B., Mangeaud, A. P., & Depetris, P. J. (2002). Geoquímica de ríos de montaña en las Sierras Pampeanas: I. Vertientes y arroyos del batolito de Achala, provincia de Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 57(4), 437-444.
- Poca, M., Cingolani, A. M., Gurvich, D. E., Saur Palmieri, V., & Bertone, G. (2018a). Water storage dynamics across different types of vegetated patches in rocky highlands of central Argentina. *Ecohydrology*, 11(7), e1981.
- Poca, M., Cingolani, A. M., Gurvich, D. E., Whitworth Hulse, J. I., & Saur Palmieri, V. (2018b). La degradación de los bosques de altura del centro de Argentina reduce su capacidad de almacenamiento de agua. *Ecología Austral*, 28; 1; 4-2018; 235-248

Popp, A., Blaum, N., & Jeltsch, F. (2009). Ecohydrological feedback mechanisms in arid rangelands: Simulating the impacts of topography and land use. *Basic and Applied Ecology*, 10(4), 319-329.

Renison, D., Hensen, I., Suarez, R., Cingolani, A. M., Marcora, P., & Giorgis, M. A. (2010). Soil conservation in Polylepis mountain forests of Central Argentina: is livestock reducing our natural capital?. *Austral Ecology*, 35(4), 435-443.

Rico A., Mortarino N., Procesamiento Primario de Datos de Precipitación Suministrados por el Sistema de Adquisición de Datos Hidrometeorológicos a Tiempo Real en la Provincia de Córdoba. AÑO HIDROLÓGICO 2019-2020. Convenio Marco entre el Ministerio de Gobierno de la Provincia de Córdoba y el Instituto Nacional del Agua. Periodo 2019. Adecuación y Mantenimiento de Estaciones Telemétricas de tecnología ALERT, con fines de Adquisición de Datos Hidrometeorológicos a Tiempo Real 1 Julio 2020. Prot: 1602 EX 2018/-64959604-APN-INA#MI.

Rico A., Mortarino N., Catalini C. Procesamiento Primario de Datos de Precipitación Suministrados por el Sistema de Adquisición de Datos Hidrometeorológicos a Tiempo Real en la Provincia de Córdoba. AÑO HIDROLÓGICO 2018-2019. Convenio Marco entre Instituto Nacional del Agua – Ministerio de Gobierno y Seguridad de la Provincia de Córdoba. Adecuación y Mantenimiento de Estaciones Telemétricas de tecnología ALERT, con fines de Adquisición de Datos Hidrometeorológicos a Tiempo Real. Expediente INA EX2018-6495960 4-APN-INA#MI. 31 de julio de 2019. N°-2019-68765786-APN-CIRSA#INA

Riley, S. J., DeGloria, S. D., & Elliot, R. (1999). A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Int. J. Soil Sci*, 5.

Robinson, M., & Ward, R. (1990). *Principles of hydrology*. New York, NY, USA:: McGraw-Hill.

RStudio Team (2020). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.

Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of hydrology*, 240(3-4), 147-186.

Trancoso, R., Phinn, S., McVicar, T. R., Larsen, J. R., & McAlpine, C. A. (2017). Regional variation in streamflow drivers across a continental climatic gradient. *Ecohydrology*, 10(3), e1816.

Ugarte, R.M., Barbeito, O., Ambrosino, S.N., Felicci, G. (2006). Mitigación De la amenaza por inundaciones repentinas en las comunas del sur de Punilla, provincia de Córdoba INA-CIRSA.

- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water resources research*, 43(7).
- Viviroli, D., & Weingartner, R. (2004). The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrology and earth system sciences*, 8(6), 1017-1030.
- Vivoni, E. R., Entekhabi, D., Bras, R. L., & Ivanov, V. Y. (2007). Controls on runoff generation and scale-dependence in a distributed hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1683-1701.
- Wilson, J. L., & Guan, H. (2004). Mountain-block hydrology and mountain-front recharge. *Groundwater recharge in a desert environment: The Southwestern United States*, 9, 113-137.
- Wittenberg, H., & Sivapalan, M. (1999). Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *Journal of hydrology*, 219(1-2), 20-33.
- Xu, Z., Liu, Z., Fu, G., & Chen, Y. (2010). Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River basin during the past 50 years. *Journal of arid Environments*, 74(2), 256-267.
- Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research*, 37(3), 701-708.
- Zhang, Y. K., & Schilling, K. E. (2006). Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940 s: Effect of land use change. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 412-422.

8. Material suplementario

A. Detalles técnicos de las mediciones de caudal

Para obtener las medidas de velocidad de flujo se utilizó un sensor Doppler portátil que emite sonido hacia el agua y recibe el eco desde las partículas suspendidas en la corriente. La diferencia de frecuencia (efecto Doppler) entre el sonido transmitido y el eco es usada para calcular la velocidad de las partículas y burbujas de aire y, por lo tanto, del agua en la que están suspendidas (Herschy 2008; Dobriyal et al., 2017). Para el punto de cierre de la sección 14, que fue el más caudaloso, se usó un “*acoustic Doppler current profiler (ADCP)*”. La diferencia entre el medidor portátil y el ADCP es simplemente que éste último se monta sobre una pequeña lancha que se tira con una soga que lo atraviesa a lo largo de todo el ancho de la sección del río, perpendicular a la corriente. Al moverse manualmente de un lado de la sección a la otra, el sensor va registrando e integrando la velocidad a través de todo el perfil de profundidad de cada punto de medición (Herschy 2008; Flener et al., 2015).

B. Tablas suplementarias

Tabla MS1. Información sobre las estaciones pluviométricas utilizadas en este trabajo para la interpolación y construcción de capas de precipitación para cada estación del año que permitieron estimar el valor de precipitación integrado para cada sección.

Nombre	Código	Latitud	Longitud	P12-ES (mm)	P6-EH (mm)
Santo Tomás	100	-31,5653	-64,8264	1037	554
Puesto Pereyra/Los Gigantes	200	-31,4489	-64,8089	1098	634
La Casita	300	-31,4833	-64,7417	1283	796
Cañada Larga/Copina	400	-31,575	-64,7116	1350	819
El Galpón	500	-31,5081	-64,82	910	611
Bo El Canal	600	-31,4458	-64,5147	723	647
Confluencia El Cajón	700	-31,4897	-64,6389	726	634
Puesto Garay	900	-31,4153	-64,7353	1551	846
Confluencia Malambo	1010	-31,4983	-64,6791	955	796
Ensenadas/El Cóndor	1200	-31,58497	-64,79179	1259	679
Anisacate	1600	-31,72361	-64,40472	926	532
La Quebrada	1700	-31,4883	-64,5997	1044	465
El Cajón	1800	-31,4428	-64,6919	1172	806
San Bernardo	2200	-31,5633	-64,5464	1027	594
Observatorio Bosque Alegre	2300	-31,59805	-64,54972	861	441
Paso de las Piedras	2600	-31,6617	-64,837	1025	518
La Suela	2800	-31,6425	-64,5897	1000	700
San Clemente	3000	-31,6952	-64,6336	1021	642
Parque Nacional El Condorito	3200	-31,7137	-64,7632	1084	580
Santa Ana	3301	-31,64972	-64,54278	1185	595
COSAG	3800	-31,69444	-64,53472	914	579
LOMITAS	0	-31,61439	-64,79552	975	609
Cuesta Blanca	1	-31,48164	-64,57969	1037	592

Tabla MS2. Descripción de las características principales de cada clase de vegetación de las sierras de Córdoba según Cingolani et al, en preparación, que se utilizaron en este trabajo para estimar para cada sección el porcentaje de los distintos tipos de cobertura vegetal. Se indican las unidades de vegetación, sus características, especies dominantes y distribución aproximada para cada clase de vegetación.

Clase	Unidades de vegetación incluidas	Características	Especies dominantes	Distribución aproximada
Bosques nativos	Bosque nativo serrano	Más de 40% de cobertura arbórea Altura máxima de 15 m.	Molle (<i>Lithraea molleoides</i>) Orco quebracho (<i>Schinopsis marginata</i>) Tala (<i>Celtis tala</i>)	Asciende hasta los 1500 m s.n.m.
	Bosque nativo subandino		Tabaquillo (<i>Polylepis australis</i>) Maitén (<i>Maytenus boaria</i>)	Desciende hasta los 1400 m s.n.m.
Bosques exóticos	Bosque exótico	Más de 70% de cobertura leñosa, arbórea y/o arbustiva. Puede superar los 20 m de altura.	Pinos (<i>Pinus spp.</i>) Siempreverde (<i>Ligustrum lucidum</i>)	Entre los 671 y los 1314 m s.n.m. Principalmente 900 y 1300 m.
Matorrales nativos	Matorral serrano cerrado	<u>Cerrado</u> : más de 50% de cobertura arbustiva; <u>abierto</u> : entre 30 y 60%. Estrato arbóreo rara vez supera 25%. Superficie descubierta (suelo o roca) inferior a 15%.	Espinillo (<i>Vachellia caven</i>) Romerillo (<i>Baccharis aliena</i>) Garabato macho (<i>Senegalia gillesii</i>). <u>abierto</u> : abundantes pajas (<i>Festuca hieronymi</i> y/o <i>Jarava pseudoichu</i>)	Hasta los 1700 m s.n.m. sin alcanzar el piso subandino de las sierras.
	Matorral serrano abierto			
	Matorral subandino	Cobertura leñosa de 20 a 70%. Mas rocoso que serrano (15-40%)	Arbustos de tabaquillo, o más raramente de maitén.	A partir de los 1300m

Pajonales	Pajonales finos sin arbustos	Estrato herbáceo cubre más de 55%	<i>Festuca hieronymi</i> <i>Festuca tucumanica</i> y/o <i>Deyeuxia hieronymi</i>	Por encima de los 1040 m.
	Pajonales finos con arbustos		<i>Festuca hieronymi</i>	Por debajo de los 1400 m.
	Pajonales gruesos		<i>Poa stuckertii</i>	Por encima de 2000 m s.n.m.
Céspedes	Césped	Estrato herbáceo de plantas bajas cubre más de 50%. Arbustos escasos, árboles inexistentes.	Gramíneas y dicotiledóneas <i>Alchemilla pinnata</i> , <i>Piptochaetium montevisensis</i> , <i>Dichondra</i> spp, <i>Krapovickasia flavescens</i>	En todas las franjas altitudinales. Más abundantes por encima de los 2100 m.
Pastizales con roca y/o suelo desnudo	Pastizal arbustivo ralo	Cobertura vegetal entre 60 y 85%, con estrato arbustivo disperso cubriendo 25% aproximadamente	Pajas <i>Jarava pseudoichu</i> , <i>Festuca hieronymi</i> y arbustos de espinillo y romerillo, entre muchos otros.	En todas las franjas altitudinales.
	Pastizal con roca	Cobertura vegetal entre 40 y 75%.	<i>Deyeuxia hieronymi</i> o <i>Festuca</i> spp	Por encima de los 1100 m
Roquedales	Afloramiento con pedregal	Más de 70% de cobertura de roca	Proporción similar de afloramientos rocosos y áreas de roca expuesta por erosión.	Por encima de los 1185, concentrada entre los 1700 y 2100.
	Pavimento de erosión	Más de 85% de cobertura de roca	Predomina la roca expuesta por erosión	

Tabla MS3. Valores de las variables biofísicas y medidas de caudal y rendimiento hídrico obtenidos para cada una de las 14 secciones (S) consideradas en este trabajo.

ID	Altitud media (m s.n.m.)	Área (km ²)	Rugosidad (TRI)	Pendiente media (%)	Densidad de drenaje (km/km ²)	P12-ES (mm)	P6-EH (mm)	NDVI12-ES	NDVI6-EH	Pajonales (% cobertura)	Pastizales_rsd (% cobertura)	Matorrales (% cobertura)	Bosques Nativos (% cobertura)	Bosques Exóticos (% cobertura)	Céspedes (% cobertura)	Roquedales (% cobertura)	Caudal estación seca (m ³ /día)	Caudal estación húmeda (m ³ /día)	Rendimiento estación seca (mm/día)	Rendimiento estación húmeda (mm/día)
S1	2143	49,7	9,1	6,5	0,9	1030	535	0,4	0,4	33,7	22,2	1,3	0	0,0	15,4	27,5	4295	10729	0,1	0,2
S2	2082	2,1	8,0	5,7	1,2	1025	518	0,4	0,4	70,4	12,9	0,1	0	0,0	0,9	15,6	162	886	0,1	0,4
S3	2112	29,8	9,1	6,6	1,0	1029	523	0,4	0,4	67,7	16,6	1,2	0,1	0	2,2	12,2	1560	11149	0,05	0,4
S4	2165	7,0	9,4	6,8	1,2	1244	675	0,4	0,4	64,5	23,1	7,7	0,1	0,0	1,5	4,0	625	2188	0,1	0,3
S5	1909	1,0	12,1	9,1	0,9	1349	818	0,4	0,4	11,1	62,4	2,1	0	0,0	5,7	18,7	262	1354	0,3	1,3
S6	1929	6,4	13,8	10,4	1,7	1318	790	0,4	0,4	9,6	54,7	2,9	0	0,0	5,0	27,7	935	8745	0,1	1,3
S7	1520	5,5	22,8	17,1	0,7	1349	819	0,5	0,5	44,2	33,9	11,1	0,1	0,0	1,5	9,2	909	3997	0,2	0,7
S8	1476	29,1	17,9	13,3	1,2	1345	818	0,5	0,5	33,8	43,9	11,9	0,8	0,1	1,2	8,4	7429	19805	0,2	0,7
S9	1110	158,2	11,3	8,5	0,9	1040	685	0,5	0,5	48,4	30,2	16,6	1,1	0,3	2,4	1,1	36322	105956	0,2	0,7
S10	1059	6,7	10,8	8,2	1,2	1019	649	0,5	0,5	68,8	20,3	8,1	0	0,0	2,6	0,2	1763	3335	0,3	0,5
S11	1970	312,1	16,0	11,8	1,1	1078	620	0,5	0,5	29,6	38,2	16,1	6,3	0,6	1,6	7,6	43094	202061	0,1	0,6
S12	1059	4,9	11,9	9,0	1,1	1021	642	0,6	0,6	17,1	25,0	18,4	6,7	14,0	18,4	0,4	635	4519	0,1	0,9
S13	1155	13,9	14,5	11,0	1,3	1021	642	0,5	0,6	24,2	34,2	25,5	4,2	2,2	9,0	0,7	3260	11641	0,2	0,8
S14	819	284,9	15,6	11,6	0,8	956	578	0,6	0,6	22,0	14,6	47,7	12,3	0,9	0,9	0,2	46494	389334	0,2	1,4

C. Figuras suplementarias

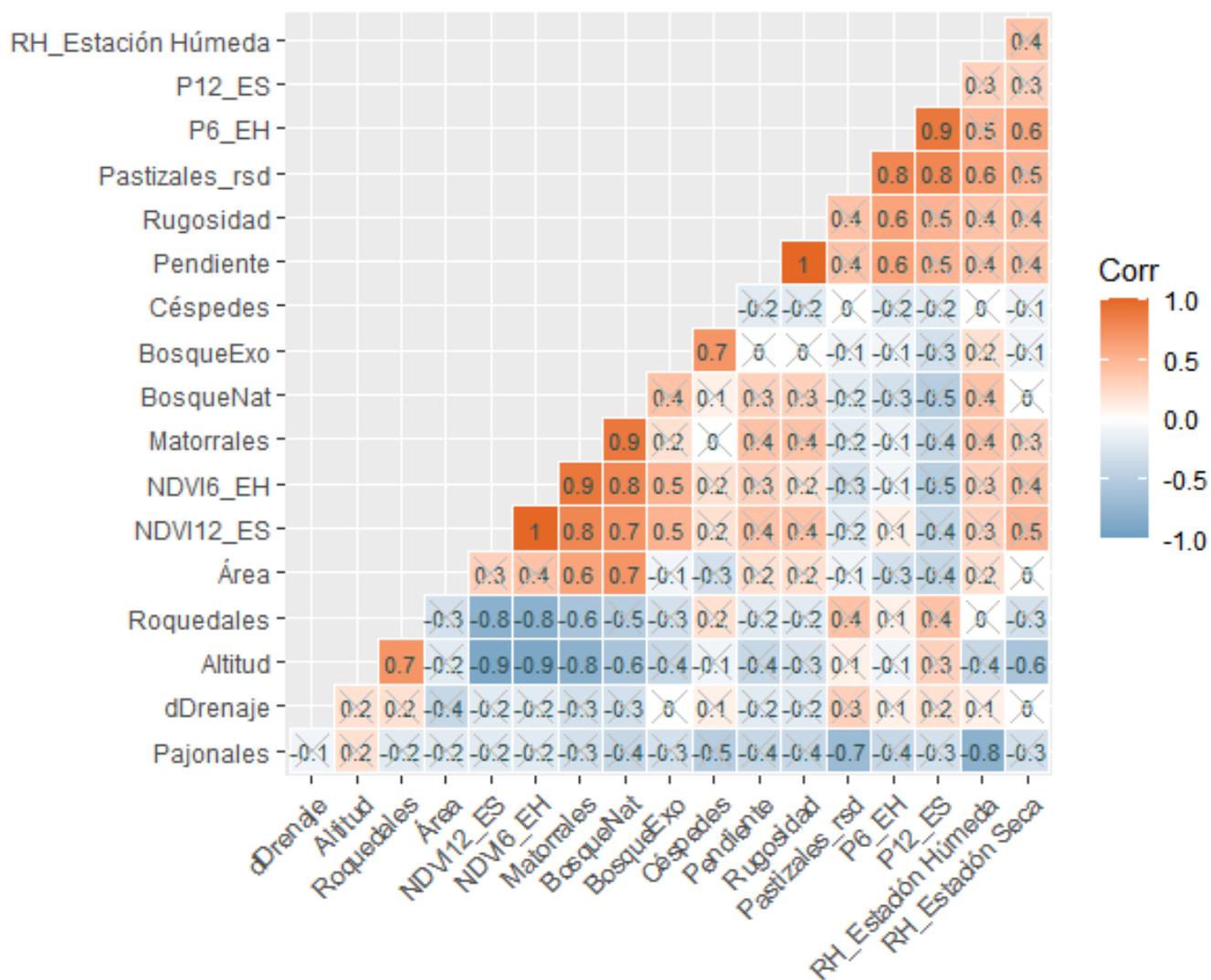


Figura MS1. Coeficientes de correlación de Pearson entre todos los pares de variables 16 biofísicas medidas y las dos estimaciones de rendimiento (para cada estación) para cada sección en este trabajo (N = 14). Las asociaciones no significativas ($p > 0,05$) fueron tachadas con una cruz para simplificar la interpretación de la figura.