

1
2 **PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO LIMAY:**
3 **MODELADO Y CALIBRACIÓN**

4 **Natalia Pessacg¹, Silvia Flaherty¹, Laura Brandizi^{2,3}, Magalí Rechencq⁴, Martín**
5 **García Asorey¹, Leandro Castiñeira⁵, Silvina Solman⁶, Miguel Pascual¹**

6
7 ¹Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales, CCT CENPAT-
8 CONICET, Puerto Madryn, Argentina

9 ²Universidad Tecnológica Nacional, Puerto Madryn, Argentina

10 ³Universidad de la Patagonia San Juan Bosco, Trelew, Argentina

11 ⁴Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente, CONICET-
12 Universidad Nacional del Comahue, CCT Patagonia Norte, Bariloche, Argentina

13 ⁵Centro de Ecología Aplicada de Neuquén, CEAN, Junín de los Andes, Argentina

14 ⁶Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera CONICET-UBA, DCAO/FCEN,
15 UMI IFAECI/CNRS, Ciudad de Buenos Aires, Argentina

16
17 Autor correspondiente: Natalia Pessacg, pessacg@cenpat-conicet.gob.ar

18
19 Manuscrito recibido el 20 de marzo de 2017; Manuscrito aceptado el 28 de junio de 2017

20
21 **RESUMEN**

22 En este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad, calibración y evaluación del
23 desempeño del modelo InVEST para simular la producción de agua media anual en la
24 Cuenca del Río Limay. La producción de agua es un servicio ecosistémico hidrológico

Artículo en edición

25 fundamental que resulta del balance entre la evapotranspiración y la precipitación,
26 dependiendo de las características del suelo y de la cobertura. Las simulaciones permitieron
27 determinar el orden de subcuencas productoras de agua, mostrando que la subcuenca que
28 más produce es la de Aluminé, seguida de la subcuenca Nahuel Huapi. El análisis de
29 sensibilidad a las bases de datos de precipitación evidenció la necesidad de utilizar bases de
30 datos de precipitación con alta resolución espacial y alta densidad de estaciones
31 meteorológicas para este tipo de estudio de modelado a escala de cuenca. La base de datos
32 de precipitación NPCG, generada para Patagonia Norte con alta densidad de estaciones
33 meteorológicas, dio resultados muy satisfactorios y permitió una buena calibración del
34 modelo. Las simulaciones realizadas con diferentes bases de datos globales o cuasi-globales
35 de precipitación mostraron una marcada dispersión en los resultados.

36 La sensibilidad al uso de diferentes bases de datos de uso/cobertura de suelo fue menor que
37 al uso de diferentes bases de precipitación. Sin embargo, se registraron cambios relevantes
38 en la producción de agua en algunas subcuencas cuando las diferencias de uso/cobertura se
39 localizaban en la cabecera de la cuenca.

40 La mejor calibración del modelo (errores menores al 10%.) se obtuvo con la base de datos
41 de uso/cobertura de suelo SERENA, con la base de precipitación NPCG y con un valor del
42 parámetro ecohidrológico $Z=15$.

43

44 **Palabras Claves:** Producción de agua, Cuenca del Río Limay, Modelo InVEST,
45 Precipitación, Uso/cobertura de suelo

46

47

48

49

50 **WATER YIELD IN THE LIMAY RIVER BASIN: MODELLING AND**
51 **CALIBRATION**

52 **ABSTRACT**

53 In this study, we carried out a sensitivity analysis and calibration of the InVEST model and
54 we tested its performance to simulate annual water yield for the Limay River Basin. Water
55 yield is an important hydrological ecosystem service which results from the evaporation-
56 precipitation budget, and also depends on land cover and soil characteristics. We evaluated
57 the sensitivity of water yield to different precipitation and land use/ land cover databases.
58 These simulations allowed us to rank the Limay River sub-basins according to their annual
59 water yield. This ranking, showed that Aluminé is the subbasin with the largest water yield,
60 followed by Nahuel Huapi subbasin. The sensitivity analysis to the precipitation databases
61 demonstrates the need for using precipitation databases with high spatial resolution and
62 high density of meteorological stations when modelling studies at the basin scale are
63 performed. The NPCG precipitation database, generated for North Patagonia with high
64 meteorological station density, produced the best results and allowed for a good model
65 calibration. The simulations performed using different global or quasi-global precipitation
66 databases showed an important dispersion in the results.

67 Results also suggest that water yield sensitivity to land use/land cover is lower than to
68 precipitation. However, when relevant mismatches among land use/land cover databases
69 were located in the headwater subbasins, simulated water yield showed important
70 differences.

71 The best model performance (error less than 10% in annual water yield) was obtained using
72 the SERENA land use/land cover database together with the NPCG precipitation database
73 and a value of 15 for the eco-hydrological parameter Z.

74

Artículo en edición

75 **Key Words:** Water Yield, Limay River Basin, InVEST Model, Precipitation, Land
76 use/land cover

77

78 1) INTRODUCCION

79 La utilización del paradigma de servicios ecosistémicos (SE) (beneficios que el hombre
80 obtiene de la naturaleza, Millenium Ecosystem Assessment 2005) se ha intensificado
81 notablemente en los últimos años, asociado a que permite estudiar los impactos de cambios
82 en el medio ambiente en términos sociales y económicos y provee un mecanismo para
83 abordar el manejo y conservación del ambiente (Redhed y otros 2016). En particular, los
84 servicios ecosistémicos hidrológicos (SEH), como calidad y cantidad de agua, son los de
85 mayor relevancia en cuencas fluviales, ya que en general son la base para el resto de los SE
86 (Sánchez-Brito y otros 2013).

87 Para abordar de forma integral los SEH es necesario realizar un mapeo de los mismos a
88 nivel de cuenca y utilizar modelos biofísicos que permitan explicar la dinámica de los
89 sistemas. Entre los más utilizados, se encuentran modelos como InVEST (Integrated
90 Valuation Ecosystem Services and Tradeoffs), ARIES (Artificial Intelligence for
91 Ecosystem Services, EVT (EcosystemS ervices and Tradeoffs), TESSA (Toolkit for
92 Ecosystem Service Site based Assesment), SOVES (Social Values for Ecosystem
93 Services), ECO-SER (Evaluación y Mapeo de Servicios Eosistémicos y vulnerabilidad
94 socio-ecológica para el ordenamiento territorial), WaSSI (Water Supply Stress Index
95 Model) y modelos hidrológicos como SWAT (Soil Water and Assessment Tool) o VIC
96 (Variable Infiltration Capacity Model). Una descripción detallada de las herramientas
97 disponibles en modelado de SEH se puede encontrar en Vigerstol y Aukema (2011).

98 El principal forzante en el modelado de los SEH es naturalmente la precipitación debido a
99 su rol conducente en el ciclo del agua. Sin embargo, la precipitación es una de las variables
100 meteorológicas más difíciles de medir regionalmente, asociado a la marcada variabilidad
101 espacial y temporal que presenta (Junzhi y otros 2012).

Artículo en edición

102 Además de la precipitación, la cobertura/uso del suelo (LULC, por sus siglas provenientes
103 del inglés: land use/land cover) típicamente constituye un importante forzante en el
104 modelado de SEH. Las categorías de LULC se derivan en general a partir de imágenes
105 satelitales y reflejan el tipo de cobertura vegetal, tipo de suelo y actividades humanas. No
106 obstante, las bases de datos de LULC suelen ser globales, generadas con diferentes
107 algoritmos, y para diferentes usos (análisis de diferentes servicios ecosistémicos, modelado,
108 etc), y necesitan constatación a campo de la identidad de distintos tipos de cobertura, lo que
109 genera diferencias importantes en las clasificaciones realizadas por diferentes bases de
110 datos para una misma región (Kaptué Tchnuenté y otros 2011).

111 Las incertezas en estas fuentes de información pueden propagarse a grandes errores en la
112 predicción del SEH *per sé*. Por ejemplo, en la Cuenca del Río Chubut se encontró que
113 errores en la precipitación del orden del 30% conducen a errores en la producción de agua
114 simulada entre el 50-150% en las diferentes subcuencas (Pessacg y otros 2015). Sin
115 embargo, hay aún pocos estudios que realicen este tipo de análisis de incertezas,
116 sensibilidad del modelo y calibración del mismo (Redhed y otros 2016).

117 Este trabajo está focalizado en la Cuenca del Río Limay (**CRL**), que abarca parte de las
118 provincias patagónicas de Río Negro y de Neuquén y que por sus características es una
119 cuenca sumamente interesante para realizar estudios ecosistémicos hidrológicos. La CRL
120 tiene una gran relevancia socio-económica ya que da sustento a distintas actividades con
121 relevancia regional y nacional, incluyendo la producción del 25% de la energía hidráulica
122 del país (Documentos Subsecretaría de Recursos Hídricos Nación); el principal aporte de
123 agua al Valle del Río Negro, donde se produce el 90% de la producción nacional de
124 manzana y pera; y el desarrollo del 40% de la actividad turística de la Patagonia
125 Continental (García Asorey y otros 2015). Para la mayoría de estas actividades socio-
126 económicas el agua dulce es esencial como así también para los ecosistemas donde se
127 desarrollan. A pesar de la importancia de esta cuenca en términos hidrológicos, no hay aún
128 estudios de SEH en la región. En Argentina, los estudios sobre SE están mayormente
129 focalizados en la región pampeana y la zona de bosques templados asociados

Artículo en edición

130 principalmente a los cambios de uso/cobertura de suelo (Balvanera y otros 2012; Laterra y
131 otros 2011a, b; Carreño y otros 2012; Paruelo y otros 2015), mientras que en Patagonia aún
132 son muy pocos los estudios que aborden la temática (Pessacg y otros 2015; Blanco y otros
133 2015; Paruelo y otros 2004).

134 Teniendo en cuenta los resultados previos, en la CRL es necesario abordar un estudio de
135 SEH considerando la sensibilidad del modelo biofísico utilizado a los datos de precipitación
136 y de uso/cobertura de suelo. Además es fundamental realizar un análisis de calibración del
137 modelo y evaluación de desempeño en la cuenca.

138 En este contexto, los objetivos de este trabajo son: 1) Modelar y caracterizar la producción
139 de agua media anual en la Cuenca del Río Limay e identificar las regiones más relevantes
140 dentro de la cuenca en términos de provisión de agua; 2) Evaluar la sensibilidad del modelo
141 a diferentes bases de datos de uso/cobertura de suelo, precipitación y parámetros; 3)
142 Calibrar el modelo y evaluar su desempeño para la región. Los resultados además sirven de
143 base para futuros estudios de impacto antropogénico en la región.

144

145 2) **DATOS Y METODOLOGÍA**

146 **2.1) Características de la Cuenca**

147 La Cuenca del Río Limay (CRL), con un área aproximada de 58.800km^2 , está situada en el
148 noroeste de la región patagónica comprendiendo parte de las provincias de Río Negro y
149 Neuquén (Fig.1). El Río Limay nace en el lago Nahuel Huapi y atraviesa la cuenca hasta la
150 unión con el Río Neuquén donde nace el Río Negro con un módulo de $650\text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Los
151 afluentes más importantes del Río Limay son los ríos Traful y Collon Cura (Martínez S.
152 2002) los cuales drenan las áreas boscosas de montañas ubicadas al oeste del área de
153 estudio. Otros afluentes que involucran importantes áreas pero que están ubicadas más al
154 este, drenan a subcuencas de la estepa patagónica. En Río Limay en conjunto con la cuenca
155 del Río Neuquén y del Río Negro forman el sistema hidrográfico más importante de la

Artículo en edición

156 Patagonia (Documentos AIC, Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos
157 Limay, Neuquén y Negro; www.aic.gov.ar).

158 El Río Limay y el Collon Cura tienen un régimen hidrológico pluvionival moderado por
159 lagos naturales en la naciente de los tributarios, con doble onda de crecida: durante el
160 invierno por las precipitaciones y en primavera por el deshielo (AIC, www.aic.gov.ar). Las
161 subcuencas de Collon Cura y del Limay superior (ubicadas al sur de la cuenca) son las que
162 tienen en promedio una frecuencia anual de nevadas mayor. Sin embargo, solo se produce
163 acumulación de nieve en un área reducida (donde se superan los 1600m de altura). En esta
164 región la nieve no tiene un rol hidrológico significativo ya que no ejerce una regulación
165 destacable sobre los picos de crecida ni es un aporte significativo durante el caudal de
166 primavera (Lascano 2007). La cabecera de cuenca de la CRL está ubicada sobre el fuerte
167 gradiente de precipitación que se encuentra en la región de la Cordillera de los Andes, que
168 va desde valores máximos mayores a los 2600 mm año⁻¹ en el límite entre Argentina y
169 Chile a 200 mm año⁻¹ a 200 km de este límite del lado argentino. La cordillera bloquea las
170 perturbaciones embebidas en el flujo del oeste y produce precipitación sobre esa región
171 (Insel y otros 2009). El ascenso de las masas de aire al oeste de la Cordillera genera
172 condiciones híper-húmedas, mientras que a medida que las masas de aire descienden se
173 secan y generan condiciones áridas y altamente evaporativas (Garreaud y otros 2013).

174 Esta cuenca soporta múltiples aprovechamientos, actividad agrícola con zonas bajo riego,
175 actividad ganadera, explotación de hidrocarburos y minería, producción de energía
176 eléctrica, turismo, y pesquerías deportivas reconocidas a nivel internacional. Además esta
177 cuenca cuenta con dos grandes Parques Nacionales con fines de conservación, Parque
178 Nacional Nahuel Huapi y Parque Nacional Lanín que cubren prácticamente todas las
179 nacientes de la cuenca. El desarrollo de todas estas actividades depende del agua y la
180 utilizan generando un impacto en el medio ambiente y en el recurso hídrico. Sumado a esto,
181 se ha encontrado que el Río Limay tiene una tendencia decreciente en el caudal anual y en
182 el caudal de verano (Vich y otros 2014).

183

184 **2.2) Modelo de producción de agua anual y datos**

Artículo en edición

185 En este trabajo se utilizó el modelo InVEST. Este modelo fue desarrollado por el *Natural*
186 *Capital Project* (www.naturalcapitalproject.org) con el objetivo de analizar la distribución
187 espacial de diferentes servicios ecosistémicos. InVEST es un modelo espacialmente
188 explícito y permite mapear, cuantificar y asignarle un valor económico a diferentes bienes y
189 servicios de la naturaleza que sustentan el bienestar humano. Este modelo cuenta con varios
190 módulos específicos para diferentes servicios ecosistémicos, entre ellos el módulo de
191 producción de agua (Reservoir Hydropower Production), versión 3.2.0, utilizado en este
192 trabajo (Sharp y otros 2016). Uno de los resultados principales de este módulo es un mapa
193 reticulado de producción de agua en la cuenca de interés. La producción de agua anual se
194 calcula para cada pixel como la relación entre la precipitación y la evapotranspiración
195 media anual basada en la curva de Budyko (Budyko 1974). La resolución de esta capa está
196 determinada por la resolución de la capa de LULC (Tabla II). Para el análisis de los
197 resultados se remuestrearon todas las bases de datos consideradas a la misma resolución
198 espacial (500 m).

199 La evapotranspiración potencial considerada en esta relación se calcula como función del
200 mapa de LULC en cada pixel. Las propiedades naturales del clima y el suelo están
201 asignadas en el modelo a través de un parámetro w dependiente del pixel y que considera
202 además un parámetro ecohidrológico Z . El parámetro ecohidrológico Z es una constante
203 empírica que captura los patrones de precipitación locales y las características
204 hidrogeológicas. En este modelo se utiliza también una capa que representa la fracción de
205 agua disponible para las plantas que a su vez está asociada a tipos de suelo (textura y
206 porosidad) (Tabla I). Además, se utiliza un mapa que representa la profundidad de suelo
207 (donde la penetración de las raíces es inhibida) (Tabla I).

208 Es recomendable interpretar los resultados del modelo a nivel de subcuenca, que en el
209 presente trabajo se computó como la suma de la producción de agua de los pixeles que
210 conforman la subcuenca

211 La principal limitación de este módulo de InVEST es que es de escala anual y que no
212 contempla la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea (Vigerstol y
213 Aukema, 2011). Por otro lado, el módulo de producción de agua no cuenta con un modelo

Artículo en edición

214 de nieve. Una descripción detallada del modelo se puede consultar en Pessacg y otros
215 (2015) y en www.naturalcapitalproject.org/invest.

216 El módulo de producción de agua requiere de diferentes fuentes de datos que son descriptos
217 en la Tabla I. El periodo de estudio considerado es 1998-2010, común a todas las bases de
218 datos de precipitación utilizadas. La delimitación de la cuenca y las sub-cuencas se realizó
219 utilizando como base las delimitaciones de la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SSRH
220 2011) y la delimitación generada con las herramientas de Análisis Espacial del paquete de
221 hidrología de ArcGIS 10.1. Para obtener esta información, sobre un modelo digital de
222 elevación (DEM) se estableció el flujo acumulado a partir de un punto de salida para cada
223 subcuenca la cual se convirtió en una capa vectorial de polígono. Las subcuencas aguas
224 abajo fueron recortadas por las subcuencas aguas arriba, de manera de eliminar la
225 superposición de las áreas de las cuencas anidadas. Luego se realizó una unión de todas las
226 subcuencas para obtener la capa vectorial requerida como insumo por el módulo.

227

228 La calibración y la evaluación del desempeño del modelo se realizó con datos de caudal
229 recopilados durante el período de estudio (1998-2010) por la Autoridad Interjurisdiccional
230 de las Cuencas Limay, Neuquén y Negro (AIC), para tres estaciones de aforo (puntos rojos
231 en la Fig.1): Estación Nahuel Huapi (punto de cierre de la subcuenca 9), Estación Estancia
232 Collunco (punto de cierre de la subcuenca 16); Estación Huechahue (punto de cierre de las
233 subcuencas 1 y 22),.

234 Los valores de escorrentía anuales se calcularon con los datos observados de caudales
235 anuales considerando las áreas de aporte de cada estación hidrométrica. A este valor de
236 escorrentía se le descontó el caudal base, que representa la reserva permanente de agua del
237 sistema. La producción de agua anual se cuantificó sumando los valores de producción de
238 agua de las subcuencas aguas arriba de cada estación hidrométrica. De esta manera se
239 puede comparar la escorrentía anual observada con la producción de agua simulada con
240 InVEST, para los puntos de cierre descriptos en la Fig. 1.

241 La dispersión entre las diferentes simulaciones realizadas se cuantificó como la desviación
242 estándar de cada simulación respecto de la simulación de referencia.

Artículo en edición

243 Estudios previos indican que la mayor sensibilidad de este modelo está asociada a los datos
244 de precipitación, a las categorías de uso/cobertura de suelo consideradas y al parámetro
245 ecohidrológico Z seleccionado (Pessacg y otros 2015; Hamel y Guswa 2015; Redhead y
246 otros 2016). Teniendo en cuenta estos resultados, en este trabajo se analizó la sensibilidad a
247 diferentes bases de datos de precipitación, de uso/cobertura de suelo y a diferentes valores
248 del parámetro ecohidrológico Z.

249

2.2.1) Bases de datos de precipitación

251 Se utilizaron 5 bases de datos reticulados de precipitación: Climate ResearchUnit (CRU),
252 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) versión 6 y versión 7, Global Precipitation
253 Climatology Centre (GPCC) y la base de datos de precipitación de NPCG (Northern
254 Patagonian Climate Grid, Bianchi y otros 2016) (Tabla II). Se consideró la media anual de
255 precipitación del período común entre bases de datos, 1998-2010.

256 Las bases de datos de precipitación reticuladas globales o cuasi-globales, en general, no
257 representan adecuadamente la magnitud y la ubicación del estrecho gradiente de
258 precipitación que se localiza en la Cordillera de los Andes y que afecta a la cabecera de la
259 CRL, asociado en gran medida a la escasa cantidad de estaciones meteorológicas
260 disponibles en la regiones de altura. Las bases de datos de precipitación reticuladas CRU y
261 GPCC tienen una resolución espacial de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, y cuentan en la CRL con datos de
262 únicamente dos estaciones meteorológicas. Las dos versiones de TRMM tienen una
263 resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, la versión v6 considera datos satelitales, mientras que
264 la versión v7 combina el algoritmo utilizado en la versión v6 con datos de precipitación de
265 estaciones meteorológicas (Huffman y otros 2007 y 2012). Sin embargo, se ha comprobado
266 que las estimaciones satelitales de precipitación tienen un pobre desempeño en zonas con
267 terreno complejo como la Cordillera de los Andes. Los errores en la estimación de la
268 precipitación en este tipo de regiones están asociados a las dificultades de los algoritmos
269 para capturar la presencia de nieve (Salio y otros 2015). La base de datos NPCG fue
270 generada específicamente para la región Patagonia Norte, y utiliza 218 estaciones
271 meteorológicas con datos de precipitación de las cuales aproximadamente el 20%

Artículo en edición

272 corresponden a la CRL. Por lo tanto, esta base de datos representa de forma más robusta el
273 gradiente de precipitación en esta zona (Bianchi y otros 2016). La base NPCG fue
274 considerada como la base de referencia para los análisis realizados.

275

276 **2.2.2) Bases de datos de uso/coertura de suelo (LULC)**

277 Para evaluar la sensibilidad del modelo al LULC se utilizaron 3 bases de datos (Tabla II):
278 1-SERENA (Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudio de los Recursos Naturales); 2-
279 Global Land Cover (GLC, United States Geological Survey Land Cover Institute); y 3-
280 MODIS (MODIS-based Global Land Cover Climatology, USGS).

281 La base de datos MODIS se utilizó como referencia para los experimentos de sensibilidad a
282 la precipitación y al parámetro Z realizados (Tabla III).

283 Las diferentes bases de datos de cobertura implican cambios en la evapotranspiración que a
284 su vez impactan en la producción de agua simulada. Uno de los insumos que utiliza el
285 modelo InVEST es una tabla biofísica que asigna a cada categoría del mapa de LULC un
286 valor específico de coeficiente de evapotranspiración (K_c). K_c es un coeficiente que
287 permite ajustar los valores de la evapotranspiración de referencia y adecuarlos en cada caso
288 al tipo de cobertura vegetal. De esta manera, al multiplicar el valor de K_c por el valor de la
289 evapotranspiración de referencia se obtiene la evapotranspiración potencial a escala de
290 pixel.

291 Tanto la base de datos de evapotranspiración de referencia como el valor de K_c se obtienen
292 de los datos de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). La
293 evapotranspiración de referencia de la FAO se estima usando el método de Penman-
294 Monteith (Allen y otros 1998) y los valores de K_c corresponden a promedios obtenidos de
295 mediciones de campo en distintos cultivos y coberturas vegetales. Las categorías de LULC
296 para cada una de las bases de datos están descritas en la Fig.2.

297 En la tabla biofísica se parametriza también la profundidad máxima de las raíces
298 representativa de cada categoría de LULC vegetada. Los valores de este parámetro son

Artículo en edición

299 empíricos y se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas por Canadell y otros (1996)
300 (Tabla I).

301 La profundidad máxima de las raíces junto con la capas de fracción de agua disponible para
302 las plantas y de profundidad de suelo (Sección 2.2.) determinan la capacidad del suelo para
303 almacenar agua.

304 En los resultados, además de evaluar las diferencias en la producción de agua a escala de
305 cuenca para simulaciones con diferentes coberturas, se analizaron en particular las tres
306 subcuencas que presentaron mayores diferencias en la producción de agua simulada
307 (subcuencas Nahuel Huapi, Aluminé y Picheleufú) En cada una de estas subcuencas se
308 calculó el porcentaje de cada cobertura de LULC para cada base de datos y el valor de K_c
309 ponderado por el área correspondiente a cada cobertura. Este análisis permite evaluar la
310 sensibilidad de la producción de agua simulada a la capa de cobertura, a través de la
311 evapotranspiración característica de diferentes categorías de LULC.

312

313 **2.2.3) Parámetro ecohidrológico Z**

314 El parámetro ecohidrológico Z es una constante empírica que por definición captura la
315 estacionalidad climática, la intensidad de la precipitación y las características topográficas
316 de la cuenca (Milly 1994; Mendoza y otros 2011). El parámetro Z puede calcularse
317 principalmente por dos métodos diferentes. El método de Donohue y otros (2012) estima Z
318 a partir de una función lineal del número de eventos de precipitación por año (n) como
319 $Z=0.2*n$. Esto implica que Z captura los patrones de precipitación, distinguiendo entre
320 subcuencas con precipitación anual similar pero con diferente intensidad. El segundo
321 método utilizó el parámetro Z como una constante de calibración, lo que permite corregir
322 procesos que este módulo de InVEST no captura.

323

324 Siguiendo el primer método, se calculó el valor de Z en dos estaciones meteorológicas en la
325 cuenca, Bariloche ($Z=26$), Los Coihues ($Z=12$) y en tres estaciones cercanas a la cuenca
326 donde se contaba con datos diarios, Neuquén ($Z=14$), Chapelco ($Z=25$) y Maquinchao

Artículo en edición

327 (Z=8). Los cálculos se realizaron para el período de estudio 1998-2010. Se consideró un
328 valor medio de Z=15 para toda la cuenca como valor de referencia.

329 A partir del segundo método, el parámetro ecohidrológico Z se estimó por calibración
330 usando datos observados de caudal y comparando con los resultados del modelo. Se
331 consideraron 5 valores diferentes de Z: 1, 10, 15 20, 30, donde 1 y 30 son los valores
332 mínimo y máximo, respectivamente, que puede tomar este parámetro en el modelo.

333

334 La Tabla III resume los 27 experimentos de sensibilidad realizados en base a
335 combinaciones los diferentes forzantes analizados: bases de datos de precipitación, bases de
336 datos de LULC y valores del parámetro ecohidrológico Z, lo que permitió generar una
337 matriz amplia a partir de la cual se puede evaluar la sensibilidad a los diferentes forzantes
338 analizados. La simulación de producción de agua realizada con la base de precipitación
339 NPCG, con la base de LULC MODIS y con el valor de Z=15 fue considerada como el
340 experimento de referencia.

341

342

343 3) RESULTADOS

344 3.1) Producción de agua en la Cuenca del Río Limay

345 La producción de agua simulada con el modelo InVEST para el experimento de referencia
346 NPCG Z15 (Fig. 3, Tabla III), evidencia que la subcuenca Aluminé situada al noroeste de la
347 cuenca (N° 22, Fig.1) es la que contribuye con una mayor producción de agua a la CRL con
348 $58 \times 10^8 \text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Fig. 3). Las subcuencas que le siguen en relevancia son la subcuenca
349 Nahuel Huapi (N° 9 Fig.1), la subcuenca del Río Chimehuin (N° 16 Fig.1); y la subcuenca
350 del Río Caleufu (N° 10 Fig.1). Las subcuencas alejadas de la cabecera de cuenca y las
351 ubicadas en la parte inferior de la cuenca producen menos de $5 \times 10^8 \text{m}^3 \text{ año}^{-1}$.

352 El Río Limay tiene tributarios importantes en dos ramas, norte y sur (Fig.1). La rama norte,
353 formada por los ríos Caleufu, Aluminé, Chimehuin que son tributarios del Collon Cura
354 (involucra las subcuencas 1, 10, 13, 16 y 22, totalizando 15820 km^2 , Fig.1), tiene una

Artículo en edición

355 contribución relativa en la producción de agua total de la cuenca del 62% en el experimento
356 de referencia. Esta rama tiene 10 lagos principales, con un área aproximada de 270 km²,
357 que atenúan el régimen pluvionival. Por otro lado, la rama sur, formada por los ríos Traful
358 y Limay Superior (involucra las subcuencas 3, 5, 6 y 8, totalizando 5650 km², Fig.1), tiene
359 una contribución relativa en la producción de agua total del 13 %. A pesar de las
360 diferencias importantes entre las contribuciones de la rama norte y sur, es relevante destacar
361 que la CRL es un sistema hidrográfico complejo con más de 40 lagos de origen glaciar,
362 ubicados en las nacientes de los principales tributarios del Río Limay, que actúan como
363 atenuadores del régimen pluvionival. De los 40 lagos más importantes, el Lago Nahuel
364 Huapi y el Lago Traful, ubicados en la rama sur, son los más grandes (70% de la superficie
365 total de los lagos de la cuenca) por lo que su efecto regulador es relevante en este sector de
366 la cuenca.

367 Por otro lado, es interesante notar que el 40% de esta cuenca está protegida por dos grandes
368 Parques Nacionales, el Parque Nacional Nahuel Huapi y el Parque Nacional Lanin. Ambos
369 parques, están situados en la cabecera de la cuenca, coincidente con las regiones donde se
370 da la mayor producción de agua. Por lo que además del rol fundamental que cumplen los
371 Parques Nacionales en conservar aéreas representativas de una región fitozogeográfica en
372 su estado natural, en esta cuenca indirectamente están protegiendo el servicio ecosistémicos
373 de producción de agua (cantidad y calidad de agua) y los bienes asociados (producción de
374 energía hidroeléctrica, turismo y pesca recreativa, etc).

375

376 **3.2) Sensibilidad a la precipitación y al parámetro ecohidrológico Z**

377 Las simulaciones forzadas con la base de datos de precipitación CRU y las dos versiones de
378 TRMM concuerdan con el experimento de referencia (forzado con la base de datos de
379 precipitación NPCG) en la distribución de subcuencas que más agua producen en la cuenca
380 (Fig.4), aunque varían en magnitud, subestimando en general la producción de agua
381 respecto a NPCG en estas subcuencas (Fig. 5). La subestimación de la producción de agua

Artículo en edición

382 en las subcuencas de la cabecera como Aluminé está en el rango -25 a -65% , asociado a
383 diferencias en las bases de precipitación respecto a NPCG en el rango de -15 a -50 %
384 (Fig.5). Las simulaciones forzadas con TRMMv7 son las que presentan los desvíos
385 menores respecto de NPCG en la mayor parte de las subcuencas de la cabecera, en
386 concordancia con los mapas de precipitación media y las diferencias en la precipitación
387 (Fig. 4 y Fig. 5).

388 Las simulaciones forzadas con TRMMv6 son las que muestran los valores inferiores de
389 producción de agua en la cuenca, debido a que esta base ubica el máximo de precipitación
390 hacia el oeste de la cabecera de cuenca (con valores mayores a 1500 mm año⁻¹, no
391 mostrado. Detalles en Fig.2 de Pessacg y otros 2015). La base de datos TRMMv6 muestra
392 en la cabecera de cuenca de la CRL valores máximos entre 600-1000 mm año⁻¹ mientras
393 que la versión TRMMv7 ubica valores medios anuales de precipitación del orden de 1500
394 mm año⁻¹ en la cabecera de la CRL (Fig. 4).

395 Las simulaciones forzadas con la base de datos GPCC son las que presentan mayores
396 diferencias respecto al resto. Estas simulaciones muestran que la subcuenca más
397 productora de agua es la del Nahuel Huapi (N° 9, Fig.1) y simulan mayor producción de
398 agua en las subcuencas internas de la CRL, en concordancia con el campo de precipitación
399 media para esta base de datos (Fig. 4) y las diferencias en la precipitación respecto a NPCG
400 (Fig. 5). En la subcuenca Aluminé, GPCC subestima en un 45% la producción de agua
401 respecto a NPCG, asociado con una subestimación de la precipitación del 35%, y
402 sobreestima en un 35% la producción de agua en la subcuenca Nahuel Huapi (N°9, Fig.1),
403 asociado con una sobrestimación de la precipitación del 20 % (Fig.5) La dispersión entre la
404 producción de agua simulada con las diferentes bases de datos de precipitación es mayor a
405 $10 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ en las dos subcuencas que mayor agua producen (Fig. 6a). Estos valores de
406 dispersión tienen el mismo orden de magnitud que los valores de producción de agua en
407 esta zona (Fig. 4), evidenciando la disparidad que hay entre bases de datos de precipitación
408 en la cabecera de esta cuenca (Fig.4, primera columna). Esto es similar a lo que ocurre en
409 otra regiones de Patagonia como la Cuenca del Río Chubut (Pessacg y otros 2015).

Artículo en edición

410 Por otro lado, los cambios en el parámetro ecohidrológico Z también conducen a cambios
411 en la magnitud de la producción de agua. Para todas las bases de datos de precipitación la
412 sensibilidad es mayor para los valores de Z chicos (de 1 a 10) que para Z mayores. Sin
413 embargo, el orden de las subcuencas más productoras es invariante a los cambios de Z (Fig.
414 4). La sensibilidad al Z es mayor en las dos subcuencas más productoras, Aluminé y
415 Nahuel Huapi, alcanzando valores de dispersión de $50 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Fig. 6b), lo que
416 demuestra la relevancia de calibrar adecuadamente el modelo utilizando este parámetro. La
417 mayor sensibilidad a valores chicos de Z como a las subcuencas más productoras, está
418 asociada a la forma logarítmica de la curva teórica de Budyko en la que se basa este modelo
419 para relacionar la evapotranspiración con la precipitación. La sensibilidad de la relación
420 evapotranspiración/precipitación al parámetro Z es muy grande cuando los valores de Z son
421 chicos (Zhang y otros 2004).

422 En el caso de condiciones muy secas (regiones con baja producción de agua -índice de
423 aridez cercano a 0-) la evapotranspiración está limitada por el agua disponible
424 (precipitación) y no depende del parámetro Z (de las características de la cuenca). Mientras
425 que para los casos en los que el índice de aridez es cercano a 1, la disponibilidad de agua y
426 energía (precipitación y evapotranspiración potencial, respectivamente) tienen el mismo
427 control sobre la evapotranspiración y en este caso sí son sensibles al valor del parámetro Z
428 (Zhang y otros 2004). Además, en trabajo previos (Pessacg y otros 2015; Hamel y Guswa
429 2015) se ha encontrado que la producción de agua simulada con el modelo InVEST es
430 mucho más sensible a sobreestimaciones de precipitación que a subestimaciones, asociado
431 de la misma manera con la forma de la ecuación de Budyko.

432

433 3.3) Sensibilidad a la base de datos de LULC

434 Las simulaciones realizadas con las tres bases de datos de LULC muestran el mismo orden
435 de cuencas productoras de agua, pero varían en la magnitud (Fig. 7). Las simulaciones
436 realizadas con la base de LULC GLC presentan más producción de agua en la mayor parte

Artículo en edición

437 de las subcuencas. Las diferencias entre GLC y MODIS son mayores a $10 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ en la
 438 subcuenca Nahuel Huapi (N° 9, Fig.1) y en la subcuenca del río Pichileufú (N° 6, Fig.1),
 439 representando un aumento de la producción de agua del 4% y 34 % respectivamente. Esta
 440 sobrestimación de la producción de agua está vinculada con la fuerte subestimación de la
 441 evapotranspiración estimada a partir de las categorías de la base de datos GLC respecto a
 442 MODIS en las subcuencas Nahuel Huapi y Pichileufú del orden de 60 y 80 mm año^{-1} que
 443 representan un 7 y 15 % respectivamente (Fig. 7).

444 Por su parte, las simulaciones con la base de LULC SERENA presentan diferencias
 445 mayores a $8 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ con la simulación de referencia en las subcuencas 22 y 9 asociadas
 446 a diferencias en la evapotranspiración del orden de 25 mm año^{-1} (aproximadamente el 4%
 447 respecto a MODIS). La producción de agua se subestima en la subcuenca Aluminé (N°22,
 448 Fig.1) y sobrestima en la subcuenca Nahuel Huapi en menos del 5 % respecto de la base de
 449 LULC MODIS (Fig.7).

450 En Pichileufú la mayor parte de la subcuenca es arbustal abierto en MODIS mientras que
 451 en GLC más del 50% de la superficie es estepa patagónica (Tabla IV y Fig.2). La estepa
 452 patagónica tiene un valor de K_c menor que el arbustal (Tabla IV) por lo que el valor de
 453 evapotranspiración es menor (Fig.7) y consecuentemente el balance entre precipitación y
 454 evapotranspiración del que resulta la producción de agua es mayor que en las regiones con
 455 arbustal. En el caso de la subcuenca Nahuel Huapi (N° 9, Fig.1), las tres bases de datos
 456 consideran más del 43% de la superficie como bosque, pero MODIS presenta un 27% de
 457 pastizal cerrado, mientras que GLC considera un 18% de páramo y SERENA un 34% de
 458 arbustal cerrado (Tabla IV y Fig.2). Estas diferencias generan una disminución del K_c total
 459 de la subcuenca (K_c ponderado, Tabla IV) en las simulaciones realizadas con SERENA y
 460 GLC respecto de MODIS, disminuyendo a su vez la evapotranspiración y
 461 consecuentemente incrementando la producción de agua (Fig. 7).

462 Como es esperable el signo de las diferencias en la producción de agua simulada con las
 463 diferentes bases de LULC tiene una correlación indirecta con los mapas de
 464 evapotranspiración estimados para cada base de datos LULC. Sin embargo, la magnitud de

Artículo en edición

465 los cambios no se correlaciona linealmente ya que utilizar diferentes bases de LULC
466 implica no sólo cambios en la evapotranspiración sino también en la profundidad de las
467 raíces, que a su vez impacta en la capacidad del suelo de almacenar agua (Fig. 7).

468 Es importante destacar, que hay cambios importantes en el LULC que representan las
469 diferentes bases de datos en las subcuencas del norte y noreste de la CRL (N° 19-20-21,
470 Fig.1), donde SERENA categoriza amplias regiones como suelo desnudo y las otras dos
471 bases de datos consideran arbustal abierto a esta zona (Fig.2). Además, fuera de la cuenca
472 alta la base MODIS categoriza toda la región como arbustal abierto, mientras que GLC y
473 SERENA presentan una combinación de pastizal abierto y cerrado, estepa desértica y
474 arbustal cerrado (Fig.2). Estas subcuencas, si bien presentan diferencias importantes en la
475 evapotranspiración (Fig.7) no son grandes productoras de agua debido a las escasas
476 precipitaciones que se registran, por lo que el impacto en la estimación de la producción de
477 agua de estos cambios no es significativo en términos absolutos.

478

~~3.3~~ 3.4) Calibración y desempeño del modelo

480 La comparación con datos en la Estación Huechahue (cierre de las subcuencas 1 y 22)
481 (Fig.1), región donde se produce la mayor cantidad de agua, muestra que los resultados más
482 satisfactorios se obtienen utilizando la base de datos de precipitación NPCG (Fig.8). En
483 estas subcuencas la combinación de NPCG con valores de $Z \geq 15$ permite reducir el error a
484 valores inferiores al 10%. Los experimentos realizados con el resto de las bases de datos de
485 precipitación subestiman fuertemente la producción de agua en esta subcuenca, con valores
486 mayores al 50%. Para algunas bases de datos, como TRMMv7 el modelo se puede calibrar
487 en esta región utilizando un valor de $Z=1$, sin embargo para el resto de las simulaciones,
488 forzadas con otras bases de datos de precipitación como GPCC, CRU o TRMMv6, no hay
489 valor del parámetro Z que permita calibrar el modelo en las subcuencas 1 y 22 (Fig.8).

490 En la Estación Estancia Collunco (cierre de la subcuenca 16, Fig.1) se obtienen muy buenos
491 resultados con NPCG, TRMMv7 y GPCC. Con la base de datos de precipitación NPCG y
492 $Z=15$ el error es inferior al 10%.

Artículo en edición

493 En la Estación Nahuel Huapi, (cierre de la subcuenca N°9, Fig.1) los errores son inferiores
494 al 10% para las bases de datos de precipitación TRMMv7 y NPCG en combinación con
495 valores de $Z \leq 15$. Para el resto de las bases de datos de precipitación no hay valores del
496 parámetro Z que permitan calibrar el modelo con errores inferiores al 20%.

497 En los tres puntos de cierre evaluados, las simulaciones realizadas con la base de datos
498 SERENA, en combinación con $Z=15$ y la base de precipitación NPCG, son las que
499 presentan los desvíos más bajos (Fig.8), reduciendo el error en comparación con MODIS.

500 En síntesis, con la base de LULC SERENA, la base de precipitación NPCG, y el valor del
501 parámetro ecohidrológico $Z=15$, se obtienen un buen desempeño del modelo, con errores
502 inferiores al 10% en los tres puntos de cierre evaluados.

503

504 4) **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

505 Considerando la producción de agua como uno de los servicios ecosistémicos hidrológicos
506 más relevantes, se buscó en este trabajo evaluar la capacidad del modelo InVEST para
507 simular dicho servicio en la Cuenca del Río Limay. En particular, se estudió la sensibilidad
508 a los insumos del modelo que mayor incerteza introducen en la simulación de la producción
509 de agua: bases de datos de precipitación, bases de datos de uso/cobertura del suelo y;
510 parámetro ecohidrológico Z . Posteriormente se realizó un análisis de calibración con datos
511 de caudal medidos *in situ*.

512 Las simulaciones realizadas con las diferentes bases de datos de precipitación exhiben en
513 general el mismo patrón espacial de producción de agua, evidenciando que las subcuencas
514 que mayor agua producen son Aluminé y la subcuenca Nahuel Huapi. La rama norte de la
515 cuenca del Río Limay es la que aporta más del 60% de la producción de agua total de la
516 cuenca.

517 Sin embargo, la magnitud de la producción de agua simulada con InVEST tiene una
518 importante incerteza asociada a las diferencias entre las bases de datos de precipitación. Las
519 bases de datos globales o cuasi-globales de precipitación presentan baja resolución espacial
520 y muestran errores muy marcados en regiones con fuerte gradiente de precipitación y con
521 baja densidad de datos meteorológicos, como ocurre en la cabecera de cuenca del Río

Artículo en edición

522 Limay. En esta cuenca, cada una de las bases de precipitación utilizadas posiciona el
523 gradiente y el máximo de precipitación en diferentes zonas de la cabecera de cuenca, lo que
524 se traduce en errores relevantes en la producción de agua simulada. Resultados similares se
525 encontraron en la Cuenca del Río Chubut (Pessacg y otros 2015), evidenciando las fuertes
526 limitaciones asociadas al uso, sin evaluación previa, de bases de datos de precipitación
527 globales en estudios de modelado de servicios ecosistémicos hidrológicos en las cuencas
528 patagónicas.

529 Con la base de datos de precipitación NPCG, generada para la región Patagonia norte con
530 una mayor densidad de datos de precipitación, se obtuvieron resultados muy satisfactorios,
531 calibrados con datos de caudal en tres puntos de cierre dentro de la cuenca.

532 El análisis de sensibilidad al parámetro Z mostró que la producción de agua es más sensible
533 a cambios en los valores de Z pequeños que a cambios en los valores de Z mayores,
534 asociado a la forma de la ecuación de Budyko en la que se basa este modelo y que permite
535 relacionar la evapotranspiración con la precipitación (Zhang y otros 2004).

536 Las bases de datos de LULC consideradas presentan diferencias importantes entre sí en
537 algunas regiones, pero sólo las diferencias ubicadas en la cabecera de cuenca impactan en
538 la simulación de la producción de agua. En los tres puntos de cierre, la simulación realizada
539 con la base de datos SERENA reduce el desvío respecto a MODIS.

540 El valor de $Z=15$ calculado con la ecuación de Donohue, en combinación con la base de
541 datos de precipitación NPCG, y la base de LULC SERENA permite un buen desempeño
542 del modelo y calibración en los tres puntos de cierre considerados con errores en la
543 producción de agua simulada inferiores al 10%.

544 Estos resultados evidencian la importancia de contar con bases de datos regionales, en este
545 caso particular de precipitación y uso/cobertura de suelo, con mayor resolución espacial,
546 densidad de datos, y categorías más representativas de la zona a estudiar que permitan
547 simular procesos hidrológicos con mayor precisión.

548 En su conjunto, los resultados muestran que el rango de errores introducido en la
549 simulación de producción de agua en los tres puntos de cierre considerados debido a las
550 bases de precipitación está en el orden de -90% a 20% (en combinación con $Z=15$); el

Artículo en edición

551 rango de errores a las bases de LULC está en el orden de -12% a 8%, y el rango de errores
552 al parámetro Z esta en el orden de -20% a 30% (en combinación con la base de datos de
553 precipitación NPCG).

554 El impacto en la simulación de la producción de agua de las diferencias en
555 evapotranspiración (asociadas al uso de diferentes bases de LULC) es menor que el
556 impacto de las diferencias en precipitación. Sin embargo, en las cabeceras de cuenca los
557 cambios en la evapotranspiración generan impactos relevantes en la producción de agua
558 simulada. Esto es importante ya que en estas regiones, posibles escenarios de cambio en la
559 cobertura de suelo (como deforestación o reforestación) podrían modificar fuertemente la
560 producción de agua de toda la cuenca.

561 Otro aspecto a destacar es que los rangos de errores que se pueden introducir al modelar
562 SEH demuestran la necesidad de realizar análisis de sensibilidad y calibración para su
563 aplicación en cada región y previo a su utilización en la toma de decisiones.

564 Finalmente, es interesante notar que el 40% de esta cuenca está protegida por dos grandes
565 Parques Nacionales, el Parque Nacional Nahuel Huapi y el Parque Nacional Lanin. Ambos
566 parques, están situados en la cabecera de la cuenca, coincidente con las regiones donde se
567 da la mayor producción de agua. Por lo que además del rol fundamental que cumplen los
568 Parques Nacionales en conservar aéreas representativas de una región fitozogeográfica en
569 su estado natural, en esta cuenca indirectamente están protegiendo el servicio ecosistémicos
570 de producción de agua (cantidad y calidad de agua) y los bienes asociados (producción de
571 energía hidroeléctrica, turismo y pesca recreativa, etc).

572

573 **Agradecimientos:** Este trabajo fue financiado por la Red para la Conservación de los
574 Ecosistemas Fluviales de la Patagonia (CONICET y The Nature Conservancy), Resolución
575 3213/2, y por el Proyecto PICT-2014-1890

576

577 **REFERENCIAS**

Artículo en edición

- 578 **Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998:** Crop evapotranspiration.
579 Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
580 Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Available
581 at: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- 582 **Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner,**
583 **T., Hall, J., Lara, A., Lterra, P., Peña-Claros, M., Silva Matos, D.M., Vogl, A.L.,**
584 **Romero-Duque, L.P., Arreola, L.F., Caro-Borrero, Á.P., Gallego, F., Jain, M., Little,**
585 **C., de Oliveira, X. R., Paruelo, J.M., Peinado, J.E., Poorter, L., Ascarrunz, N., Correa,**
586 **F., Cunha-Santino, M.B., Hernández-Sánchez, A.P. y Vallejos, M.,2012:**
587 **Ecosystemservicesresearch in LatinAmerica: Thestate of the art. Ecosyst. Serv. 2, 56–70.**
- 588 **Bianchi, E., Villalba, R., Viale, M. Couvreur FyMarticorena R., 2016:**New
589 precipitation and temperature grids for northern Patagonia: Advances in relation to global
590 climate grids. J Meteorol Res, 30: 38. doi:10.1007/s13351-015-5058-y
- 591 **Blanco, P.D., Colditz, R.R., López, G., et al, 2013:** Remote Sensing of Environment A
592 land cover map of Latin America and the Caribbean in the framework of the SERENA
593 project. Remote Sensing of Environment 132:13-31
- 594 **Blanco, P.D., Metternicht, G.I., Del Valle, H.F., Hardtke, L.A. y Bouza, P.J., 2015:** A
595 remote sensing and fuzzy multi-objective linear programming approach to model impact of
596 land management decisions on ecosystems services of rangelands. International Geoscience
597 and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 3369-3372
- 598 **Broxton, P.D., Zeng, X., Sulla-Menashe, D. y Troch, P.A., 2014:** A Global Land Cover
599 Climatology Using MODIS Data. J. Appl. Meteor. Climatol., 53, 1593–1605. doi:
600 <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0270.1>
- 601 **Budyko, M.I., 1974:** Climate and Life. Academic, San Diego, CA, USA, pp. 321–330
602 (translated from Russian by: Miller, D. H.)

Artículo en edición

- 603 **Carreño, L., Frank, L.C. y Viglizzo, E.F., 2012:** Tradeoffs between economic and
604 ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture,*
605 *Ecosystems & Environment* 154, 68–77.
- 606 **Donohue, R.J., Roderick, M.L. yMcVicar, T.R., 2012:** Roots, storms and soil pores:
607 incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *J. Hydrol.*
608 436–437, 35–50.
- 609 **Eva, H.D, de Miranda E.E., Di Bella C.M., Gond, V., Huber, O., Sgrenzaroli, M.,**
610 **Jones, S., Coutinho, A., Dorado, A., Guimares M., Elvidge C., Achard F., Belward**
611 **A.S., Bartholom E., Baraldi A., De Grandi G., Vogt P., Fritz S. y Hartley A., 2003:** The
612 Land Cover Map for South America in the Year 2000. GLC2000 database, European
613 Commision Joint Research Centre. <http://www-gem.jrc.it/glc2000>.
- 614 **García Asorey, M., Flaherty, S., Liberoff, A., Aigo, J.; Pascual, M., 2015:** Validación
615 del Uso de la Red Social “flickr” para la caracterización del Turismo y Recreación en
616 Patagonia. IV Congreso Internacional de Servicios Ecosistémicos en los Neotrópicos: de la
617 investigación a la acción. 30 de septiembre al 3 de octubre 2015. Mar del Plata, Argentina.
- 618 **Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M., Rojas, M., 2013:** Large-scale control on the
619 Patagonian climate
- 620 **Hamel, P. y Guswa, A. J., 2015:** Uncertainty analysis of a spatially-explicit annual
621 waterbalance model: case study of the Cape Fear catchment, NC. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*
622 *Discuss.* 19, 839–853.
- 623 **Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong,**
624 **Y., Stocker, E.F. y Wolff, D.B., 2007:** The TRMM multi-satellite precipitation analysis:
625 quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. *J.*
626 *Hydrometeorol.* 8 (1), 38–55.

Artículo en edición

- 627 **Huffman, G.J., 2012:** Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 3.0 for the
628 NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for
629 GPM (I-MERG). GPM Project (Greenbelt, MD, 29 pp.) (Available at
630 http://pmmdev.pps.eosdis.nasa.gov/sites/default/files/document_files/).
- 631 **Insel, N., Poulsen, C. y Ehlers, T., 2009:** Influence of the Andes Mountains on South
632 American moisture transport, convection, and precipitation. *Clim. Dyn.* [http://dx.](http://dx.doi.org/10.1007/s00382-009-0637-1)
633 [doi.org/10.1007/s00382-009-0637-1](http://dx.doi.org/10.1007/s00382-009-0637-1).
- 634 **Junzhi, L., A-Xing, Z.yDuan, Z., 2012:** Evaluation of TRMM 3B42 Precipitation product
635 using rain gauge data in MeichuanWaterhshed, Poyang Lake Basin, China. *J. Resour. Ecol.*
636 3 (4), 359–366.
- 637 **Kaptué Tchuenté A.T., Roujean J.L., De Jong S.M., 2011:** Comparison and relative
638 quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover
639 data sets at the African continental scale, *International Journal of Applied Earth*
640 *Observation and Geoinformation*, 13(22) 207-219, [doi.org/10.1016/j.jag.2010.11.005](http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2010.11.005).
- 641 **Lascano M, 2007:** Dónde y cómo se mide la nieve en los Andes. *Contribuciones*
642 *Científicas GAEA (Sociedad Argentina de Estudios Geográficos)* 19,267-279
- 643 **Lattera, P., Jobbágy, E. y Paruelo, J., 2011:** Valoración de Servicios Ecosistémicos.
644 Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA,
645 Buenos Aires, Argentina. Lattera P, Castellarini F, Orúe ME ECOSER: Un protocolo para
646 la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su valor social.
647 *Valorac. Serv. Ecosistémicos Conceptos Herram. Apl. Para El Ordenamiento Territ.*
648 Ediciones INTA 359–390
- 649 **Martínez, S., 2002:** Cuenca del río Limay. Cuenca N° 63. Atlas digital de los recursos
650 hídricos superficiales de la República Argentina. Disponible en
651 www.hidricosargentina.gov.ar

Artículo en edición

- 652 **Mendoza, G., Ennaanay, D., Conte, M., Walter, M.T., Freyberg, D., Wolny, S.,**
 653 **Hay, L., White, S., Nelson, E. y Solorzano, L. 2011:** Water supply as an ecosystem
 654 service for hydropower and irrigation. En: Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T., Daily, G. y
 655 Polasky, S. (Eds.), 2011: Natural capital, theory and practice of mapping ecosystem
 656 services Biology. Oxford University Press. **Millennium Ecosystem Assessment, 2005:**
 657 **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.** Island Press, Washington, DC.
- 658 **Milly, P., 1994:** Climate, soil-water storage, and the average annual water-balance. Water
 659 Resour. Res. 30 (7), 2143–2156. <http://dx.doi.org/10.1029/94WR00586>.
- 660 **Mitchell, T.D. y Jones P. D., 2005:** An improved method of constructing a database of
 661 monthly climate observations and associated high-resolution grids. Int J Climatology vol.
 662 25. Royal Meteorological Society, pp. 693–712. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1181>.
- 663 **Paruelo, J.M., Golluscio, R.A., Guerschman, J.P., Cesa, A., Jouve, V.V. y Garbulsky,**
 664 **M.F., 2004:** Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: the
 665 case of the Patagonian steppes. Global Ecol. Biogeogr. 13,385-395
- 666 **Paruelo, J., Jobbáy, E.G., Laterra, P., Dieguez, H., García Collazo, A. y Panizza, A.,**
 667 **(Eds), 2015:** Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias. FAO –
 668 MINAGRI – FAUBA, <http://www.fao.org/3/a-i4195s.pdf>.
- 669 **Pessacg, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Solman, S. y Pascual, M., 2015:** Getting water
 670 right: a case study in water yield modelling based on precipitation data. Science of the Total
 671 environmental 537, 225–234
- 672 **Redhead, J.W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D., Oliver, T.H. y**
 673 **Bullock, J.M., 2016:** Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service
 674 model at a national scale. Sci Total Environ.
- 675 **Salio, P., Hobouchian, M.P., GarcíaSkabar, Y. y Vila, D., 2015:** Evaluation of high-
 676 resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain
 677 gauge network. Atmospheric Research, 163:146-161

Artículo en edición

- 678 **Sánchez Brito, I., Almendarez Hernández, M.A., Morales Zárate, M.V. y Salinas**
 679 **Zavala, C.A., 2013:** Valor de existencia del servicio ecosistémico hidrológico en la
 680 Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, Baja California Sur, México. Frontera Norte, Vol
 681 25, N° 50, 97-129
- 682 **Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B. y Ziese, M.,**
 683 **2011:**GPCC Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly LandSurface Precipitation
 684 From Rain-Gauges Built on GTS-based and Historic Data.
 685 http://dx.doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V6_050.
- 686 **Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R.,**
 687 **Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D.,**
 688 **Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf,**
 689 **E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik,**
 690 **M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M.**
 691 **Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., and Bierbower, W. 2016.** InVEST 3.2.0
 692 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota,
 693 The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- 694 **SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación – Instituto Nacional del**
 695 **Agua). 2011.** Atlas de Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República
 696 Argentina, Versión 2010. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios,
 697 Buenos Aires.
- 698 **Vich, A.I.J., Norte, F.A. y Lauro, C., 2014:** Análisis regional de frecuencias de caudales
 699 de ríos pertenecientes a cuencas con nacientes en la Cordillera de los Andes.
 700 Meteorológica, 39(1):3-26
- 701 **Vigerstol, K. y Aukema, J., 2011:** A comparison of tools for modelling freshwater
 702 ecosystem services. J Environmental Management, 92:2403-2409.

Artículo en edición

703 Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W. R., Chiew, F. H. S., Western, A. W., Briggs, P. R., 2004:
704 A rational function approach for estimating mean annual
705 evapotranspiration. Water Resources Research. Vol. 40 (2)

706

707

708

709

710

711

712

713

714

715

716

717

718

719

720

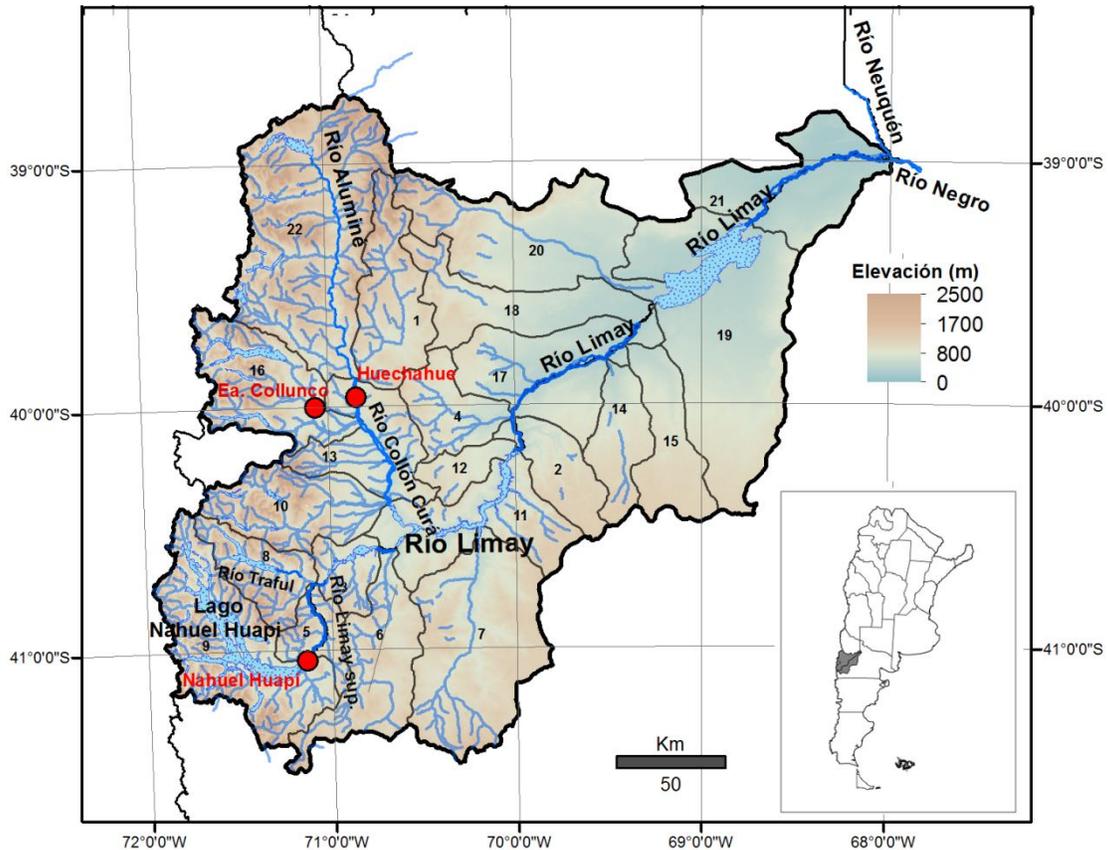
721

722

Artículo en edición

723 Figuras y Tablas

724



725

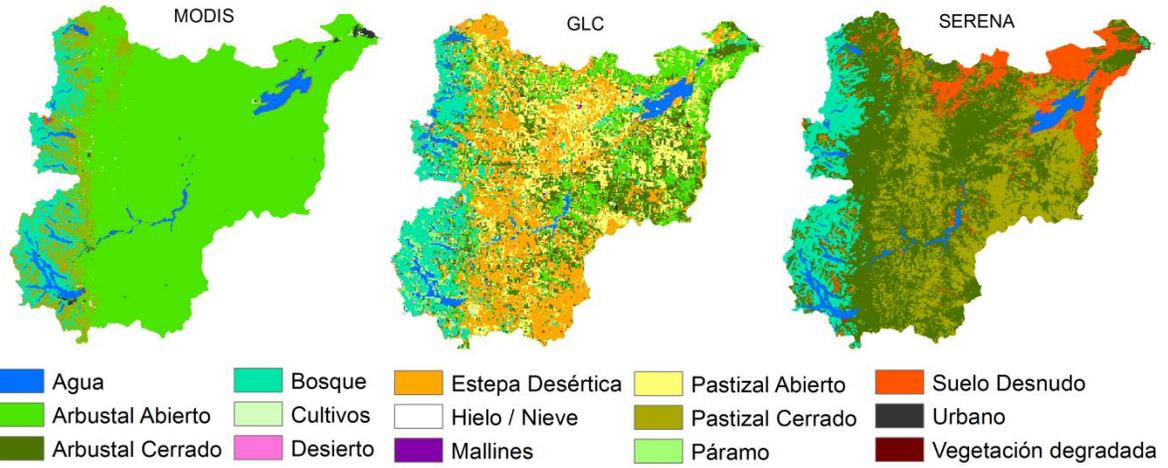
726 **Figura 1:**Ubicación y topografía (metros por encima del nivel del mar) de la cuenca del
 727 Río Limay y sus principales ríos. Los números identifican las 22 subcuencas que componen
 728 la cuenca. En rojo las estaciones hidrométricas utilizadas, Estación Huechahue (cierre de
 729 las subcuencas N° 1 y 22), Estación Estancia Collunco (cierre de subcuenca N° 16), y
 730 Estación Nahuel Huapi (cierre de subcuenca N°9).

731

732

733

Artículo en edición



734

735 **Figura 2:** Categorías de uso/cobertura del suelo (LULC) para la Cuenca del Río Limay
736 para cada una de las bases de datos consideradas: MODIS, GLC, SERENA (Tabla II).

737

738

739

740

741

742

743

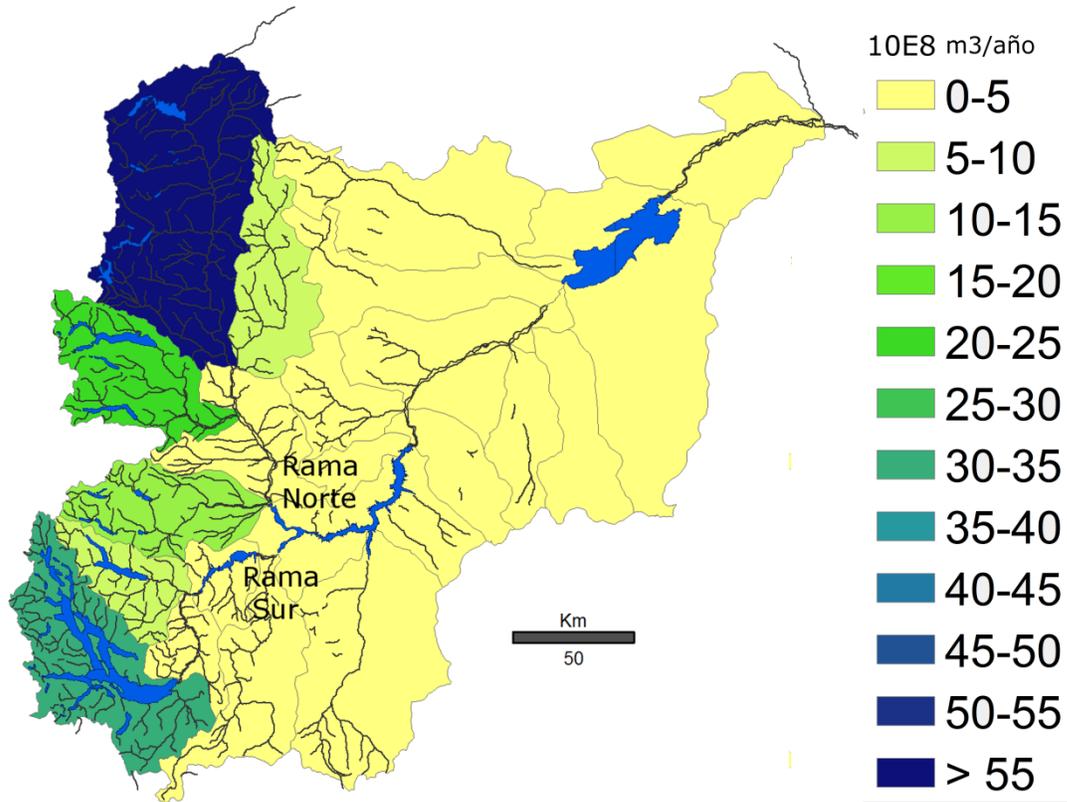
744

745

746

747

748



749

750 **Figura 3:** Producción de agua anual total por subcuenca (Unidad: $10^8 \text{m}^3 \text{año}^{-1}$) modelada
751 con InVEST para el experimento de referencia NPCG Z15 (Tabla III).

752

753

754

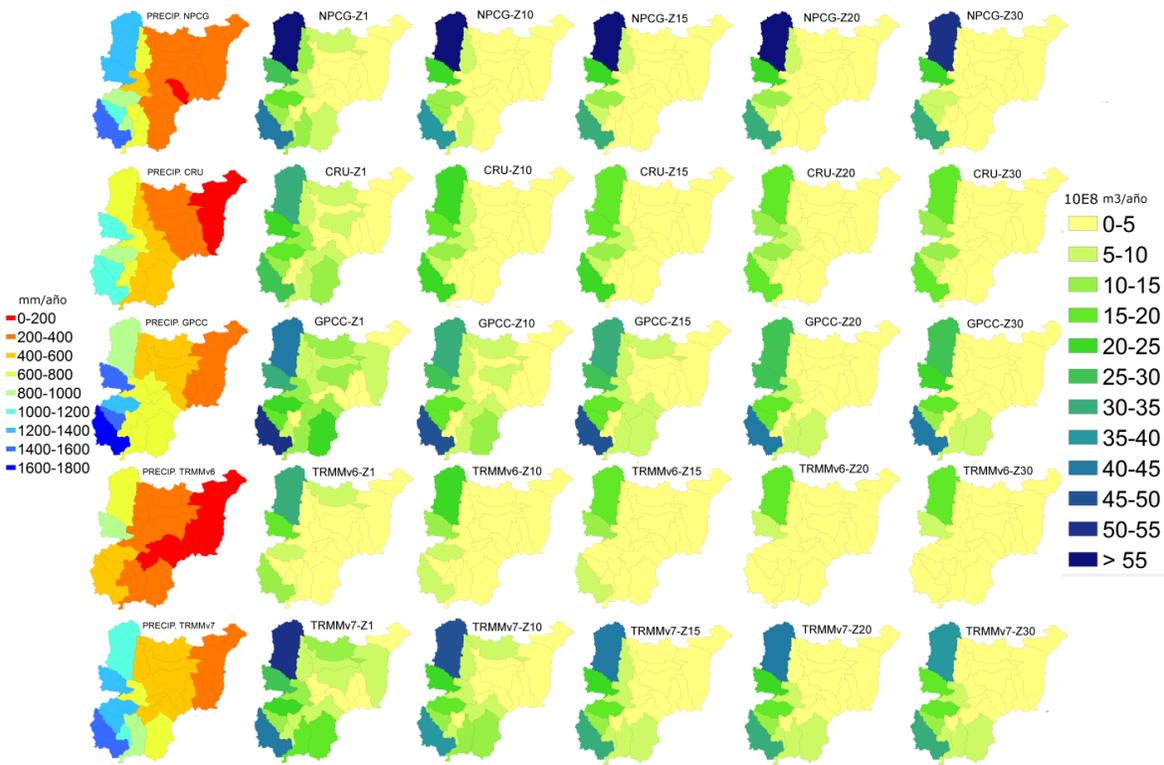
755

756

757

758

Artículo en edición



759

760 **Figura 4:** Precipitación de cada base de datos reticulada utilizada (primer columna).
 761 Producción de agua anual por subcuenca (Unidad: $10^8 \text{m}^3 \text{año}^{-1}$) modelada con InVEST para
 762 diferentes bases de datos de precipitación (filas) y con diferentes valores del parámetro
 763 ecohidrológico Z (columnas).

764

765

766

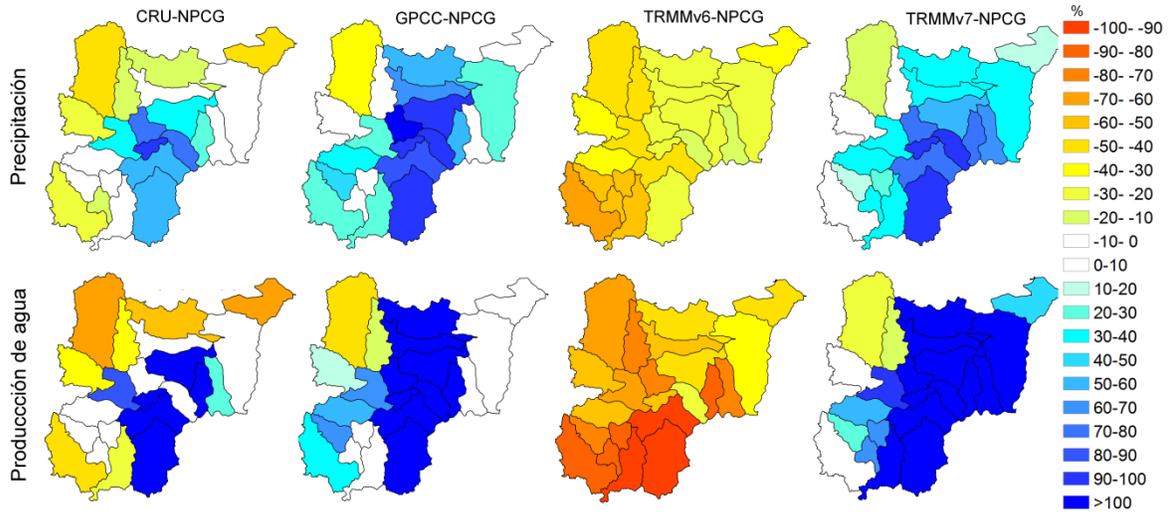
767

768

769

770

Artículo en edición



771

772 **Figura 5:** Diferencia relativa (%): entre la precipitación de cada una de las bases de datos
773 respecto a la base de datos NPCG (panel superior) y entre la producción de agua simulada
774 con la base de datos NPCG y el resto, considerando el valor de $Z=15$ (panel inferior).

775

776

777

778

779

780

781

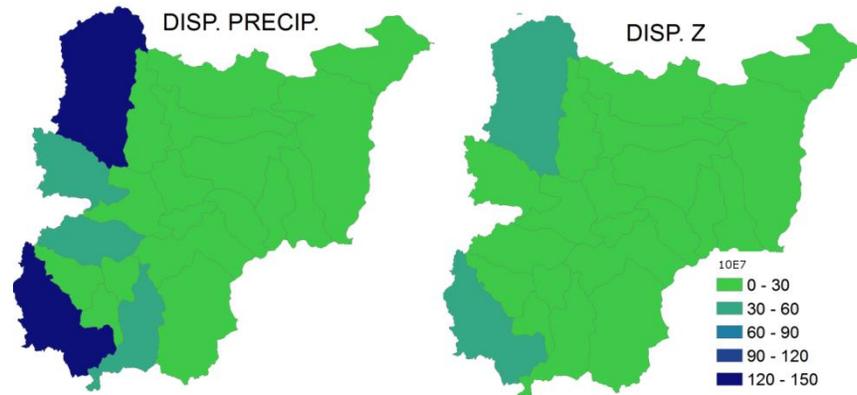
782

783

784

785

Artículo en edición



786

787 **Figura 6:** Dispersión entre la producción de agua simulada con InVEST para (a) las
788 distintas bases de datos de precipitación (considerando los experimentos con $Z=15$) y (b)
789 para los distintos valores del parámetro ecohidrológico Z (considerando los experimentos
790 realizados con la base de datos de precipitación NPCG), respecto de la media (Unidades
791 $10^7 \text{m}^3 \text{año}^{-1}$)

792

793

794

795

796

797

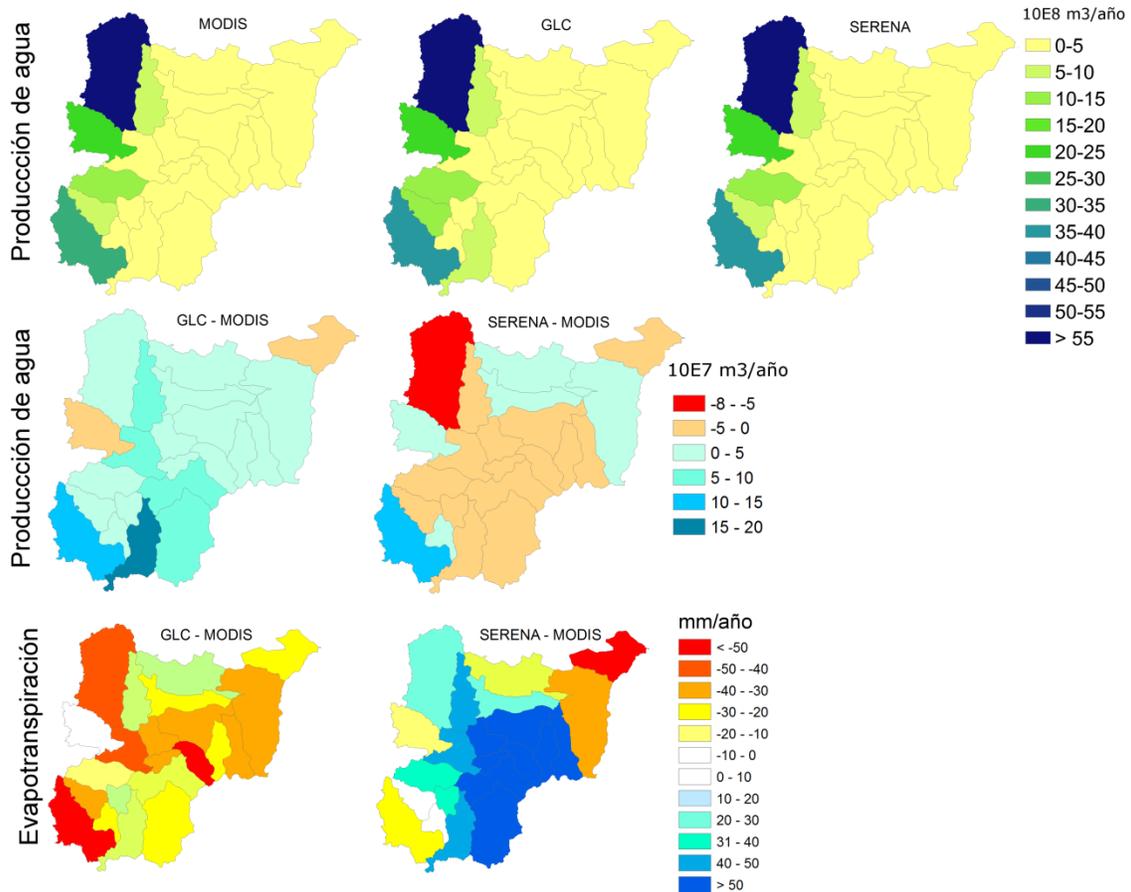
798

799

800

801

Artículo en edición



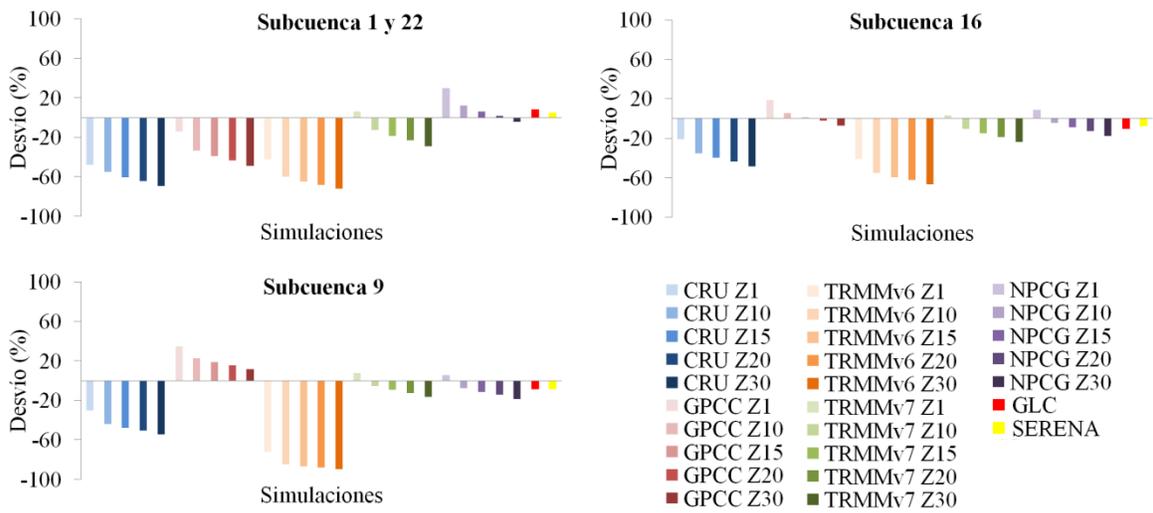
802

803 **Figura 7:** La producción de agua (Unidad: $10^8 \text{m}^3 \text{año}^{-1}$) modelada con InVEST para
 804 diferentes bases de LULC (panel superior). Sensibilidad de la producción de agua a la base
 805 de LULC utilizada expresada como diferencia en volumen por subcuenca respecto a la base
 806 de datos MODIS (panel medio) En este caso MODIS se refiere al experimento NPCG Z15
 807 de la Tabla III. El panel inferior muestra la sensibilidad de la evapotranspiración a la base
 808 de LULC expresada como la diferencia media para cada subcuenca con respecto a la base
 809 de datos MODIS (panel inferior)

810

811

Artículo en edición



812

813 **Figura 8:** Desvío (%) entre la producción de agua anual modelada y los datos de caudal en
 814 los tres puntos de cierre para los diferentes experimentos La comparación fue realizada
 815 como se explica en la metodología.

816

817

818

819

820

821

822

823

824

825

Artículo en edición

Datos de entrada	Fuente
Profundidad de suelo (donde la penetración de las raíces es inhibida)	INTA soil map http://geointa.inta.gov.ar
Fracción de agua disponible para las plantas	INTA y Ministerio de Agricultura, Alimentos y Pesca, British Columbia (Canada)
Precipitación media anual	CRU, TRMMv6, TRMMv7, GPCC, NPCG (descriptas en el texto)
Contenido de agua disponible para las plantas	INTA & Ministerio de Agricultura, Alimentos, y Pesca, British Columbia, Canadá
Evapotranspiración media anual de referencia	FAO, www.fao.org
Uso/cobertura de suelo (LULC)	SERENA, GLC, MODIS (descriptas en el texto)
Delimitación de la Cuenca y de las subcuencas	Generación propia basada en la delimitación de la Subsecretaría de Recursos Hídricos y la delimitación generada con la herramienta ArcHydro
Máxima profundidad de raíces para cada clase de LULC	Canadell et. Al (1996)
Coefficiente de evapotranspiración de las plantas para cada clase de LULC (Kc)	FAO, www.fao.org
Parámetro ecohidrológico Z	Donohue et al. (2012) o estimado por calibración. Valor entre 1 y 30.

826 Tabla I: Datos de entrada utilizados por el modelo de producción de agua InVEST (versión
827 3.2.0)

828

829

830

831

832

833

834

835

836

837

	Base de datos	Referencia	Cob. Espacial	Res. temporal	Res. espacial	Fuente
Base de datos de precipitación	CRU University of East Anglia Climate Research Unit	Mitchell and Jones, 2005	Global	1901-2009	0.5°x0.5°	Estaciones meteorológicas CRU TS3.1
	GPCC Global Precipitation Climatology Centre	Schneider et al., 2011	Global	1901-2014	0.5°x0.5°	Estaciones meteorológicas
	TRMM v6 Tropical Rainfall Measuring Mission	Huffman et al., 2007	50°N-50°S	1998-2010	0.25°x0.25°	Satélite (Algoritmo 3B42)
	TRMM v7 Tropical Rainfall Measuring Mission	Huffman et al., 2007	50°N-50°S	1998-2010	0.25°x0.25°	Satélite + estaciones meteorológicas (Algoritmo 3B43)
	NPCG Northern Patagonian Climate Grid	Bianchi et al., 2016	Patagonia norte	1997-2010	0.2°x0.2°	Estaciones meteorológicas de distintas fuentes y co-kriging con modelo de elevación digital.
Base de datos de LULC	MODIS	Broxton et al, 2014	Global	2001-2010	500 m	http://landcover.usgs.gov/global_climatology.php
	SERENA	Blanco et al, 2013	Sud América y el Caribe	2008	500 m	http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura_suelo/br/serena/index.html
	GLC	Eva et al, 2003	Sud América	2000	1000 m	http://landcover.usgs.gov/landcoverdata.php

838 Tabla II: Bases de datos de precipitación y land use/landcover (LULC) utilizadas como
839 datos de entrada en el modelo InVEST.

840

841

842

EXPERIMENTO	Base de datos de	Base de datos	Parámetro
CRU Z1	CRU	MODIS	1
CRU Z10	CRU	MODIS	10
CRU Z15	CRU	MODIS	15
CRU Z20	CRU	MODIS	20
CRU Z30	CRU	MODIS	30
GPCC Z1	GPCC	MODIS	1
GPCC Z10	GPCC	MODIS	10
GPCC Z15	GPCC	MODIS	15
GPCC Z20	GPCC	MODIS	20
GPCC Z30	GPCC	MODIS	30
TRMMv6 Z1	TRMMv6	MODIS	1
TRMMv6 Z10	TRMMv6	MODIS	10
TRMMv6 Z15	TRMMv6	MODIS	15
TRMMv6 Z20	TRMMv6	MODIS	20
TRMMv6 Z30	TRMMv6	MODIS	30
TRMMv7 Z1	TRMMv7	MODIS	1
TRMMv7 Z10	TRMMv7	MODIS	10
TRMMv7 Z15	TRMMv7	MODIS	15
TRMMv7 Z20	TRMMv7	MODIS	20
TRMMv7 Z30	TRMMv7	MODIS	30
NPCG Z1	NPCG	MODIS	1
NPCG Z10	NPCG	MODIS	10
NPCG Z15	NPCG	MODIS	15
NPCG Z20	NPCG	MODIS	20
NPCG Z30	NPCG	MODIS	30
GLC	NPCG	GLC	15
SERENA	NPCG	SERENA	15

843 Tabla III: Los 27 experimentos realizados con el modelo InVEST modificando la base de
844 datos de precipitación anual y de uso/cobertura de suelo (LULC) utilizadas y el valor del
845 parámetro ecohidrológico Z. En el recuadro se señala el experimento de referencia
846 (experimento NPCG Z15).

847

848

849

850

Artículo en edición

851

852

LULC	Kc	NAHUEL HUAPI (N° 9)			ALUMINE (N°22)		PICHILEUFÚ (N° 6)	
		MODIS	GLC	SERENA	MODIS	GLC	MODIS	GLC
Cultivos	0,65	0,5	2,0	-	0,6	2,0	0,5	0,3
Pastizal Cerrado	0,65	27,8	0,1	0,4	22,3	0,1	27,8	-
Arbustal Cerrado	0,5	0,3	5,7	34,3	0,1	5,7	0,3	13,2
Desierto	0,1	-	2,2	-	-	2,2	-	0,0
Bosque	1	43,6	43,1	45,0	22,1	43,1	43,6	7,2
Páramo	0,6	-	18,6	-	-	18,6	-	1,8
Vegetación degradada	0,35	-	-	-	-	-	-	0,1
Pastizal Abierto	0,55	-	3,1	-	-	3,1	-	15,1
Arbustal Abierto	0,4	10,1	2,5	-	51,4	2,5	10,1	2,3
Mallines	1	0,5	0,2	-	0,5	0,2	0,5	0,5
Hielo / Nieve	0,4	0,3	0,2	0,1	-	0,2	0,3	-
Estepa Desértica	0,3	-	9,4	-	-	9,4	-	57,9
Urbano	0,1	1,5	0,1	0,5	0,1	0,1	1,5	
Agua	1	14,0	12,4	16,6	1,6	12,4	14,0	0,4
Suelo Desnudo	0,2	0,3	-	2,5	0,2	-	0,3	-
Sabana	0,7	0,4	-	-	0,6	-	0,4	-
KC PONDERADO		0,82	0,77	0,8	0,65	0,62	0,51	0,43

853

Tabla IV: Porcentaje de la superficie que ocupa cada categoría de LULC de cada base

854

de datos considerada (MODIS, GLC, SERENA), en las tres subcuencas que presentan

855

mayor sensibilidad. Kc es el coeficiente de evapotranspiración de la planta relacionada

856

a cada categoría de LULC. El Kc ponderado fue calculado a partir del área que

857

considera cada base de datos de cada categoría de LULC.