



**Universidad Nacional de La Plata**  
**Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales**

**Impacto de los cambios en el uso y la cobertura de la  
tierra y de la variación del clima, sobre los principales  
componentes del balance de agua en la cuenca del río  
Colorado, Argentina**

*Tesis doctoral*

**Doctorando: Aumassanne, Carolina**

*Ing. en Recursos Naturales y Medio Ambiente*

**Director:** Dr. Di Bella, C. M.

Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar.

**Co-directora:** Dra. Gaspari, F. J.

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP.

**Consejera:** M. Sc. Beget, M. E.

Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar.

## **JURADOS**

Dr. Ernesto Viglizzo

Dra. Ilda Entraigas

Dr. Ramiro Sarandón

Esta tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado de Doctor en Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos de investigaciones llevadas a cabo en la Agencia de Extensión Rural de INTA 25 de Mayo (La Pampa) y en el Instituto de Clima y Agua de INTA Castelar; durante el período comprendido entre agosto de 2013 y diciembre de 2018 bajo la dirección del Dr. Carlos Marcelo Di Bella y la Dra. Fernanda Julia Gaspari.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi querida abuela.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a mi Director de tesis, el Dr. Carlos Di Bella, por su apoyo desde el primer día, sus consejos y por su tiempo dedicado. Gracias por las discusiones de investigación, y por todos los trabajos realizados juntos, que me han permitido aprender a su lado, formando un gran equipo de trabajo.

También quiero expresarle mi gratitud a la Dra. Fernanda Gaspari, mi codirectora, por haber aceptado formar parte de este equipo de trabajo y evaluar cada uno de los avances y acompañarme en este proceso de formación. Sus consejos, practicidad y buena onda fueron motor de empuje para llegar hasta el final. Muchas gracias por la predisposición de siempre.

A María Eugenia Beget por ser el gran sostén en esta etapa de formación, consejera y compañera en todo momento. Fue un placer compartir el trabajo con vos y gracias por todos los consejos y recomendaciones y la confianza brindada.

A Patricio Oricchio por estar siempre a disposición, sin importar días y horarios, y su constante apoyo en el procesamiento de información satelital.

A mi compañero de vida, Sebastián, quien me brindó su amor, compañía y apoyo incondicional desde el primer momento que comencé el posgrado. A mis amigos y familia por sus palabras de aliento.

Al INTA por financiar mi formación.

Agradezco a mis compañeros de trabajo de la Agencia de Extensión de INTA 25 de Mayo (La Pampa). En especial a Dardo y Paolo por todos los relevamientos a campo y campañas de muestreos que realizamos juntos.

Agradezco también al Ente Provincial del Río Colorado (Gobierno de La Pampa), al Departamento Provincial del Agua (Río Negro), CORFO, INTA Hilario Ascasubi, a COIRCO por brindarme la información climática, hidrológica y cartográfica de la zona. Además, al Establecimiento Curacó y Zille Agro por permitirme realizar el seguimiento de los cultivos, y brindarme información de manejo de los mismos.

¡Gracias a todos!

## RESUMEN

La cuenca del río Colorado, en Argentina, está inmersa en un sistema árido y vulnerable frente a la variabilidad climática y, sumando complejidad a la situación de disponibilidad y manejo del agua, su interprovincialidad. En vista de los cambios en el uso y la cobertura del suelo que han venido ocurriendo, y anticipándonos a los futuros cambios, es importante entonces conocer las consecuencias sobre las principales componentes del balance de agua en este sistema. Existen importantes vacíos de conocimiento sobre los impactos potenciales que provocaría la conversión de sistemas naturales a agricultura bajo riego sobre la hidrología regional en la cuenca y, en consecuencia, sobre la prestación de los servicios ecosistémicos. El objetivo de esta investigación es estudiar los efectos de los cambios en el uso y la cobertura de la tierra sobre los principales componentes del balance de agua, ante distintas situaciones de variación climática en la cuenca del río Colorado.

Para abordar dicho objetivo se seleccionaron componentes del balance de agua a escala de cuenca i) nieve, ii) caudal, iii) precipitación, iv) evapotranspiración; y a escala de lote i) precipitación, ii) evapotranspiración y iii) requerimiento de riego de los principales cultivos en la cuenca media del río Colorado. Se utilizó información de series históricas de estaciones meteorológicas e hidrológicas y, además la provista por sensores remotos, a partir de la cual se analizó el comportamiento anual e interanual de las variables a escala de cuenca y lote desde 2000 a 2015. Se evaluó la relación entre la cobertura de nieve y el caudal del río, y de este último con la conductividad eléctrica. También se caracterizó la morfometría, correspondiente a las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, y se asociaron parámetros de relieve (elevación, pendiente y orientación) con la cobertura de nieve estimada. Sobre la cuenca media, se evaluaron los cambios en el uso y la cobertura del suelo desde 2000 a 2015, y sobre el sector donde se desarrolla la agricultura bajo riego se determinaron la evapotranspiración y los requerimientos de riego y la huella hídrica de los cultivos de alfalfa y maíz. Por último, se plantearon y analizaron escenarios de expansión agrícola en la cuenca media, bajo escenarios de variabilidad climática.

Los resultados mostraron que la cobertura de nieve ha disminuido hacia el final del período estudiado, y que además tiene menor permanencia en los meses de otoño-invierno-primavera. Como resultado el derrame del río Colorado ha disminuido y su conductividad eléctrica ha aumentado en los últimos años. Los balances de agua para los cultivos de alfalfa y maíz, a escala de lote, mostraron una alta demanda de agua por parte de los cultivos, asociada a la alta demanda atmosférica y a la baja retención del suelo. A partir del planteo y evaluación de escenarios de expansión de la agricultura bajo riego y escenarios climáticos, se encontró que el agua será limitante en la cuenca media del río Colorado, en la provincia de La Pampa. De esta manera, se podría pensar en la redistribución de caudales entre las provincias que integran la cuenca y también en la producción de cultivos más eficientes en el uso del agua, para aumentar la eficiencia de riego del sistema, y la diversificación de la producción, entre otros.

Para lograr un desarrollo sustentable de la cuenca, es necesario contar con conocimiento y tecnología que aseguren un manejo equitativo, eficiente y sustentable del agua. En este marco de conocimiento, y con la disponibilidad de herramientas, como modelos hidrológicos y sensores remotos, se hizo factible un abordaje a distintas escalas temporales (anual e interanual) y espaciales (lote y cuenca). Se aportaron conocimientos que permiten entender con mayor detalle la dinámica hídrica de la cuenca del río Colorado. Esta información es útil para administradores, gestores del recurso agua y técnicos, con el objetivo de minimizar

los impactos y riesgos, lo que resulta sumamente interesante en vista al ordenamiento del territorio.

## **ABSTRACT**

The Colorado river basin, in Argentina, is immersed in an arid and vulnerable system in the face of climate variability, adding complexity to the situation of availability and management of water, its interprovinciality. In view of the changes that have been occurring, and anticipating future changes, it is elementary to know the consequences on the main components of the water balance in this system. There are important gaps in knowledge about the potential impacts that the conversion of natural systems to agriculture under irrigation would have on regional hydrology in the Colorado basin (Argentina), and consequently, on the provision of ecosystem services. The objective of this work is to study the effects of changes in the use and coverage of land on the main components of the water balance, in different situations of climatic variation in the Colorado river basin.

To approach that objective, some components of the water balance at basin scale were selected i) snow ii) flow iii) precipitation iv) evapotranspiration and batch scale i) precipitation ii) evapotranspiration and iii) irrigation requirement crops in the middle basin of the Colorado river. We have used information from historical series of meteorological and hydrological stations and, in addition, the one provide by remote sensors, from which the annual and interannual behavior of the variables at basin and lot scale from 2000 to 2015 was analyzed. The relationship between the snow cover - flow rate and the flow rate - electrical conductivity were evaluated. The morphometry of the upper basin of the Colorado river, corresponding to the sub-basin of the Grande and Barrancas rivers, and relief parameters (elevation, slope and orientation) were associated with the estimated snow cover. About the middle basin, the changes in the use and land cover from 2000 to 2015 were evaluated, and on the sector where the agriculture under irrigation is developed, the evapotranspiration and the irrigation requirements and the water footprint of the crops were determined for alfalfa and corn. Finally, scenarios of agricultural expansion in the middle basin were raised and analyzed, under scenarios of climatic variability.

The results showed that the snow cover has decreased towards the end of the period studied, and that, it also has less permanence in the months of autumn-winter-spring. As a result, the Colorado river spill has decreased while its electric conductivity has increased in recent years. On a lot scale, the water balances for the alfalfa and corn crops, showed high demand by the crops, associated with high atmospheric demand and low soil retention. The evaluation of scenarios of expansion of agriculture under irrigation and climatic change, it was found that water would be limiting in the middle basin of the Colorado river, in the province of La Pampa. In this way, we could think of flows between the provinces that make up the basin, and also in the production of more efficient crops in the water use, increase irrigation efficiency in the system, production diversification and flows redistribution, among others.

To achieve a sustainable development of the basin, it is inevitable to have knowledge and technology that ensure an equitable, efficient and sustainable management of water. In this knowledge framework, and with the availability of tools, such as hydrological models and remote sensing, an approach to different time scales (annual and interannual) and spatial (lot and basin). Knowledge was provided that allow to understand in greater detail the water dynamics of the Colorado river basin. This valuable information is available to administrators,

water resource managers and technicians, with the objective of minimizing the impacts and risks, which is extremely interesting in view of land use planning.

## ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>4</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>12</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>17</b>
<b>LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS</b> .....	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>23</b>
1.1.1. Cambios en el uso y la cobertura de la tierra.....	<b>23</b>
1.1.2. Impactos en el ciclo hidrológico.....	<b>24</b>
1.1.3. Herramientas para el estudio del ciclo hidrológico .....	<b>24</b>
<b>1.2. FUNDAMENTACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL TEMA</b> .....	<b>25</b>
<b>1.3. ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>26</b>
1.3.1. Población.....	<b>27</b>
1.3.2. Autoridad de cuenca y entes reguladores del agua.....	<b>27</b>
1.3.3. Clima .....	<b>28</b>
1.3.4. Suelos.....	<b>29</b>
1.3.5. Coberturas naturales del suelo .....	<b>29</b>
1.3.6. Usos de la tierra .....	<b>30</b>
1.3.7. Usos del agua: urbano, riego, minería, industria, hidroelectricidad.....	<b>32</b>
<b>1.4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA TESIS</b> .....	<b>34</b>
1.4.1. Objetivo general .....	<b>34</b>
1.4.2. Objetivos específicos .....	<b>34</b>
1.4.3. Hipótesis más relevantes .....	<b>34</b>
<b>1.5. ORGANIZACIÓN GENERAL DE ESTA TESIS</b> .....	<b>35</b>
<b>1.6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO 2 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLORADO</b> .....	<b>41</b>
<b>2.1. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>42</b>
2.1.1. Cuenca hidrográfica .....	<b>42</b>
2.1.2. Ciclo hidrológico .....	<b>43</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>46</b>

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
2.2.1. Área de estudio .....	47
2.2.2. Metodología .....	48
2.3. RESULTADOS .....	59
2.3. A1) Caracterización morfométrica .....	59
2.3. A2) Usos y cobertura de la tierra .....	67
2.3. B1) NIEVE.....	70
B1.1) Mediciones de las estaciones nivométricas: Equivalente de agua en nieve .....	70
B1.2) Estimación de cobertura mediante información satelital .....	71
B1.3)Características morfométricas y su relación con la cobertura de nieve .....	76
2.3. B2) PRECIPITACIÓN .....	80
2.3. B3) CAUDAL.....	86
B3.1) Relación entre la cobertura de nieve estimada en la cuenca alta y el derrame.....	90
B3.2) Calidad de agua para riego: relación caudal-salinidad. ....	92
2.3. C1) EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	95
2.3. C2) EVAPORACIÓN .....	98
2.3. C3) INFILTRACIÓN .....	99
2.4. DISCUSIÓN.....	99
2.5. CONCLUSIONES.....	102
2.6. BIBLIOGRAFÍA .....	103
<b>CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA A NIVEL DE LOTE PARA LOS PRINCIPALES CULTIVOS DE LA CUENCA DEL RÍO COLORADO.....</b>	<b>111</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	112
3.1.1. Agricultura bajo riego .....	112
3.1.2. Balance de agua: evapotranspiración y requerimiento de agua de los cultivos ..	113
3.1.3. Huella hídrica de los cultivos .....	115
OBJETIVOS .....	116
Objetivo general .....	116
Objetivos específicos.....	116
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	116
3.2.1. Área de estudio.....	116
3.2.2. Metodología .....	119
3.2.2.2. Estimación de componentes del balance de agua.....	124
3.2.2.3. Modelo CROPWAT.....	125

3.2.2.4. Cálculo de huella hídrica.....	127
3.3. RESULTADOS .....	128
3.3.1. Evapotranspiración de los cultivos.....	128
3.3.2. Requerimientos de riego .....	131
3.3.3. Eficiencia de uso del agua.....	134
3.4. DISCUSIÓN.....	135
3.5. CONCLUSIONES.....	136
3.6. BIBLIOGRAFÍA .....	136
<b>CAPÍTULO 4 ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DE USOS Y COBERTURAS DE LA TIERRA: EFECTO SOBRE EL BALANCE DE AGUA .....</b>	<b>141</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	142
OBJETIVOS.....	146
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	146
4.3. RESULTADOS .....	154
4.4. DISCUSIÓN.....	158
4.5. CONCLUSIONES.....	158
4.6. BIBLIOGRAFÍA .....	159
<b>CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES FINALES y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>163</b>
5.1. DISCUSIÓN GENERAL.....	164
5.2. CONCLUSIONES FINALES, APORTES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	166
5.3. BIBLIOGRAFÍA.....	169
<b>TRABAJOS DERIVADOS DE ESTA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>172</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 1

Página Nº

Figura 1.1. Área de estudio en la cuenca del río Colorado.....	27
Figura 1.2. Distribución de las isohietas de la cuenca del río Colorado.....	28
Figura 1.3. Tipos de vegetación basados en las provincias fitogeográficas de la cuenca del río Colorado.....	30
Figura 1.4. Usos de la tierra de la cuenca del río Colorado.....	31
Figura 1.5. Diagrama del río Colorado identificado tomas de agua para uso de las zonas urbanas, riego, petrolero, y minero.....	33
Figura 1.6. Esquema simplificado de la metodología seguida.....	35

### Capítulo 2

Figura 2.1. Esquema simplificado del ciclo del agua y de las variables analizadas en este capítulo.....	44
Figura 2.2. Ubicación de las estaciones nivológicas e hidrológicas de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	51
Figura 2.3. Modelo del ciclo anual de la nieve.....	52
Figura 2.4. Diagrama de la metodología utilizada para obtener información de cobertura nival a partir del producto MOD10A2.....	53
Figura 2.5. Ubicación de las estaciones hidrológicas, meteorológicas y nivológicas de la cuenca del río Colorado.....	55
Figura 2.6. Modelo conceptual de estimación de la ETMA.....	56
Figura 2.7. Área de estudio para el cálculo de evapotranspiración media anual (ETMA) y sitios de referencia seleccionados.....	57
Figura 2.8. Relación entre el índice de vegetación mejorado (EVI) y la precipitación media anual derivada del sensor satelital TRMM.....	58
Figura 2.9. Perfiles longitudinales de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	60
Figura 2.10. Perfiles transversales de la subcuenca del río Grande y del río Barrancas.....	61
Figura 2.11. Zonificación en rangos de (A) Altura, (B) pendiente y (C) orientación de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	63
Figura 2.12. Curvas hipsométricas de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	64
Figura 2.13. Frecuencias altimétricas. Las barras indican el área entre cada intervalo de cotas en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	65

Figura 2.14. Jerarquización de la red de drenaje de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	66
Figura 2.15. Evolución anual de la superficie regada (hectáreas) mediante pivote central en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado de 25 de Mayo, La Pampa.....	68
Figura 2.16. Cambios en el uso y la cobertura del suelo en la cuenca media del río Colorado, entre Buta Ranquil (Neuquén) y Casa de Piedra (La Pampa), desde 2000 a 2015.....	69
Figura 2.17. Equivalente de agua en nieve (EAN) (mm) promedio anual de las estaciones Paso Pehuenche (Mendoza) y Valle Hermoso (Mendoza) desde 2000 a octubre de 2015.....	70
Figura 2.18. Equivalente de agua en nieve (EAN) (mm) promedio mensual de la serie 2000 a 2015 de las estaciones Paso Pehuenche (Mendoza) y Valle Hermoso (Mendoza).....	71
Figura 2.19. Distribución de la cubierta de nieve (km <sup>2</sup> ) estimada cada 8 días para los años 2000 a 2015.....	72
Figura 2.20. Cobertura de nieve máxima y mínima anual desde 2000 a 2015.....	73
Figura 2.21. Distribución mensual de la cobertura de nieve estimada mediante el producto de MODIS (MOD10A2).....	74
Figura 2.22. Cobertura de nieve en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas desde el 23 de abril de 2000 a 17 de noviembre de 2015.....	75
Figura 2.23. Cobertura de nieve promedio por clases (días de permanencia) desde 2000 a 2015 para las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	76
Figura 2.24. Mapas de frecuencia de cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado, derivados del producto MOD10A2, para los años 2003 a 2015 de abril a noviembre.....	77
Figura 2.25. Cobertura de nieve en relación a la altura (m.s.n.m.) para las distintas clases de permanencia en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	78
Figura 2.26. Cobertura de nieve en relación a la pendiente (grados) para las distintas clases de permanencia en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	79
Figura 2.27. Cobertura de nieve en relación a la orientación (grados) para las distintas clases de permanencia en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	79
Figura 2.28. Área cubierta por nieve (km <sup>2</sup> ) por año para cada una de las clases de permanencia.....	80
Figura 2.29. Precipitación total anual (mm) para el período 1987-2015 de las estaciones de la cuenca alta: Los Mayines (Mendoza), Arroyo La Vaina (Mendoza) y Bardas Blancas (Mendoza).....	81
Figura 2.30. Precipitación media mensual (mm) para el período 1987-2015 de las estaciones de	

la cuenca alta: Los Mayines (Mendoza), Arroyo La Vaina (Mendoza) y Bardas Blancas (Mendoza).....	81
Figura 2.31. Precipitación media anual (mm) para el período 1959-2015 de la estación Buta Ranquil (Neuquén).....	82
Figura 2.32. Precipitación media mensual (mm) para el período 1959-2015 de la estación Buta Ranquil (Neuquén).....	82
Figura 2.33. Precipitación media anual (mm) para el período 1963-2015 de las estaciones de la cuenca media alta: 25 de Mayo (La Pampa), Casa de Piedra (La Pampa) y Gobernador Duval (La Pampa). ....	83
Figura 2.34. Precipitación media mensual (mm) para el período 1963-2015 de las estaciones 25 de Mayo (La Pampa), Casa de Piedra (La Pampa) y Gobernador Duval (La Pampa).....	84
Figura 2.35. Precipitación total anual (mm) de las estaciones de la cuenca media baja Pichi Mahuida (La Pampa) y La Adela (La Pampa) para el período 1960-2015.....	84
Figura 2.36. Precipitación media mensual (mm) de las estaciones de la cuenca media baja Pichi Mahuida (La Pampa) y La Adela (La Pampa) para el período 1960-2015.....	85
Figura 2.37. Precipitación total anual (mm) en la estación Hilario Ascasubi (Buenos Aires) en el período 1966-2015.....	85
Figura 2.38. Precipitación media mensual (mm) para el período 1966-2015 de la estación Hilario Ascasubi (Buenos Aires).....	86
Figura 2.39. Derrame promedio anual ( $\text{hm}^3$ ) en la estación la estación Buta Ranquil (Neuquén) en el período 1940-2015.....	87
Figura 2.40. Caudal medio mensual ( $\text{m}^3.\text{seg}^{-1}$ ) en las estaciones Barrancas (Neuquén), La Gotera (Mendoza) y Buta Ranquil (Neuquén), para el período 1976-2015.....	87
Figura 2.41. Derrame promedio anual ( $\text{hm}^3$ ) en la estación la estación Pichi Mahuida (La Pampa) en el período 1919-2015.....	88
Figura 2.42. Caudal medio mensual ( $\text{m}^3.\text{seg}^{-1}$ ) en la estación Pichi Mahuida (La Pampa) para el período 1940-1989.....	89
Figura 2.43. Cobertura de nieve media mensual ( $\text{km}^2$ ) (negro) y caudal medio mensual ( $\text{m}^3.\text{seg}^{-1}$ ) (azul) en la cuenca alta del río Colorado desde 2000 a 2015.....	90
Figura 2.44. Derrame anual ( $\text{hm}^3$ ) del río Colorado en la estación Buta Ranquil en función de la cobertura de nieve ( $\text{km}^2$ ) estimada mediante MOD10A2, desde 2000 a 2015.....	91
Figura 2.45. Relación del área cubierta por nieve de 176 a 216 días y el derrame anual en el período julio de 2000 a julio de 2016. A) Subcuenca del Barrancas y derrame del río Barrancas en	

la estación Barrancas, B) Subcuenca del Grande y derrame del río Grande en la estación La Gotera.....	91
Figura 2.46. Conductividad eléctrica (dS.m <sup>-1</sup> ) y caudal medio anual (m <sup>3</sup> .seg <sup>-1</sup> ) para el período 1965-2009 en la estación Punto Unido (La Pampa).....	92
Figura 2.47. Conductividad eléctrica (dS.m <sup>-1</sup> ) y caudal medio anual (m <sup>3</sup> .seg <sup>-1</sup> ) para el período 1982-2013 de la estación Paso Alsina, con interrupción entre 2000 y 2003.....	93
Figura 2.48. Conductividad eléctrica (dS.m <sup>-1</sup> ) y caudal (m <sup>3</sup> .seg <sup>-1</sup> ), valores promedios, máximos y mínimos mensuales de la estación Punto Unido, para el período 1965-2009.....	94
Figura 2.49. Conductividad eléctrica (dS.m <sup>-1</sup> ) y caudal (m <sup>3</sup> .seg <sup>-1</sup> ), valores promedios, máximos y mínimos mensuales de la estación Paso Alsina, el período 1982-2013.....	94
Figura 2.50. Relación entre los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de la cuenca y los datos de precipitación de TRMM.....	95
Figura 2.51. Relación entre el EVI y la PMA con datos de TRMM para el área de estudio. La línea de ajuste PMA-EVI se corresponde al cuantil 75.....	96
Figura 2.52. Anomalía del EVI para el área de estudio.....	96
Figura 2.53. EVI promedio anual para la región de estudio.....	97
Figura 2.54. Evapotranspiración media anual estimada para el área de estudio.....	97
Figura 2.55. Evapotranspiración media anual estimada para el área de estudio: Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado (La Pampa).....	98
Figura 2.56. Evaporación mensual (hm <sup>3</sup> ) del Lago de Casa de Piedra (La Pampa) para tres ciclos hidrológicos distintos.....	99
Figura 2.57. Caudal medio diario (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) en la estación Buta Ranquil y la pérdida entre esta estación y Pichi Mahuida desde abril de 1940 a diciembre de 1960.....	99

### **Capítulo 3**

Figura 3.1. Superficie bajo riego por provincias.....	112
Figura 3.2. Balance de agua simplificado a escala de lote en el que se basa el modelo CROPWAT.....	114
Figura 3.3. Localización del área de estudio, secciones del Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado, ubicación de los lotes y estaciones meteorológicas.....	117
Figura 3.4. Monitoreo de los cultivos a campo. A) Lote de maíz B) Lote de alfalfa.....	120
Figura 3.5. Muestreo de suelo. A) Cilindros utilizados para la determinación de humedad gravimétrica. B) Calicata y recolección de muestras de suelo en lotes de maíz.....	121

Figura 3.6. Sistemas de riego A) Lote de cultivo de alfalfa bajo riego con pivote central B) Lotes de alfalfa con riego gravitacional.....	122
Figura 3.7. Diagrama resumido de CROPWAT 8.0.....	126
Figura 3.8. Variables de entrada al modelo CROPWAT en el módulo Clima para el período enero de 2013 a diciembre de 2015.....	129
Figura 3.9. $ET_0$ mensual promedio, mínimo y máximo históricos (1971-2009) estimada mediante $ET_0$ calculator y $ET_0$ mensual de los años 2013 a 2016 estimado con CROPWAT 8.0.....	130
Figura 3.10. Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) de alfalfa (A) y maíz (B) para corte estimado mediante $ET_0$ calculator a partir de datos de la serie histórica (1971-2009).....	131
Figura 3.11. Componentes del balance de agua en el suelo para el cultivo de alfalfa desde 2013 a 2016.....	131
Figura 3.12. Componentes del balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz desde 2013 a 2016.....	132
Figura 3.13. Huella hídrica estimada del cultivo de maíz y alfalfa para las tres campañas evaluadas.....	133

#### **Capítulo 4**

Figura 4.1. Cuenca media del río Colorado. Ubicación Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado, secciones I, II, III, IV y V.....	147
Figura 4.2. Diagrama simplificado de la metodología planteada.....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 1

Página Nº

Tabla 1.1. Aprovechamiento de áreas bajo riego en la cuenca del río Colorado.....	32
Tabla 1.2. Usos del agua en la cuenca. Distribución por provincia y tipo de uso.....	34

### Capítulo 2

Tabla 2.1. Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Colorado: nombre, ubicación y período analizado.....	54
Tabla 2.2. Estaciones hidrológicas de la cuenca del río Colorado: nombre, ubicación y período analizado.....	55
Tabla 2.3. Parámetros de forma de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	62
Tabla 2.4. Parámetros de la red de drenaje de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.....	67
Tabla 2.5. Área ocupada por las clases de usos y coberturas del suelo de la cuenca entre Buta Ranquil (Neuquén) y Casa de Piedra (La Pampa).....	67
Tabla 2.6. Valores de cobertura de nieve estimado mediante MOD10A2 y fechas de mínimos, máximos, inicio de acumulación, días con predominio de nevadas y días predominio del proceso de fusión desde 2000 a 2015.....	73

### Capítulo 3

Tabla 3.1. Cultivos y métodos de riego en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple de 25 de Mayo, actualizado en 2016.....	118
Tabla 3.2. Parámetros del cultivo de alfalfa ingresados.....	120
Tabla 3.3. Parámetros del cultivo de maíz ingresados a CROPWAT.....	120
Tabla 3.4. Parámetros de suelo determinados a partir de información relevada a campo y utilizada como ingreso en el módulo de suelo de CROPWAT.....	122
Tabla 3.5. Programación de riego para el cultivo de alfalfa bajo riego gravitacional.....	123
Tabla 3.6. Programación de riego para el cultivo de alfalfa bajo riego por pivote central.....	123
Tabla 3.7. Programación de riego para el cultivo de maíz bajo riego gravitacional.....	124
Tabla 3.8. Escenarios modelados a partir de la combinación de cultivos, sistemas de riego y suelos.....	127
Tabla 3.9. Necesidad de agua de los cultivos verde y azul para alfalfa y maíz durante las tres campañas evaluadas.....	132

Tabla 3.10. Superficie bajo riego cosechada en la provincia de La Pampa para las tres campañas evaluadas, rendimiento promedio por campaña para alfalfa y maíz y huella hídrica de alfalfa y maíz en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple de 25 de Mayo, La Pampa.....	133
Tabla 3.11. Programa de riego obtenido de CROPWAT para el cultivo de alfalfa bajo riego gravitacional.....	134
Tabla 3.12. Programa de riego obtenido de CROPWAT para el cultivo de alfalfa bajo riego por pivote central.....	134
Tabla 3.13. Programación de riego obtenida de CROPWAT para el cultivo de maíz bajo riego gravitacional.....	135

#### **Capítulo 4**

Tabla 4.1. Cupos de agua asignados, superficie proyectada para riego y usos del agua por tipo en el año 2015.....	148
Tabla 4.2. Escenarios planteados basados en la expansión agrícola bajo riego, las demandas de agua de los cultivos y la oferta de agua del río Colorado.....	149
Tabla 4.3. Variables climáticas medias mensuales del período 1971-2007 de la estación meteorológica de ubicada en sección I del SAM para el escenario 1.....	150
Tabla 4.4. Modelos climáticos globales utilizados en esta investigación, institución de origen y resolución espacial.....	151
Tabla 4.5. Temperatura máxima (°C) mensual promedio para el período 2015-2039 obtenidas con los modelos de cambio global evaluados para los escenarios 2 y 3.....	152
Tabla 4.6. Temperatura mínima (°C) mensual promedio para el período 2015-2039 obtenidas con los modelos de cambio global evaluados para los escenarios 2 y 3.....	152
Tabla 4.7. Precipitación (mm) mensual promedio para el período 2015-2039 obtenidas con los modelos de cambio global evaluados para los escenarios 2 y 3.....	152
Tabla 4.8. Ecuaciones de líneas de tendencia de cada variable para el período 2015-2039 y modelo evaluado para los escenarios 2 y 3.....	153
Tabla 4.9. Parámetros estimados de evapotranspiración del cultivo (ETc), precipitación efectiva (Pe) y requerimientos de riego (Re) por campaña para los cultivos de alfalfa y maíz.....	155
Tabla 4.10. Demanda de agua para riego por cultivos y demandas para expansión del Sistema de Aprovechamiento Múltiple (SAM) y demandas bajo expansión del Sistema de Aprovechamiento Múltiple y Planicie Curacó (SAM+PC).....	155

Tabla 4.11. Parámetros estimados a partir de CROPWAT: Evapotranspiración del cultivo de alfalfa (ETc) Precipitación efectiva (Pe), requerimiento de riego (RR) a partir de los variables simuladas por los modelos climáticos globales para el futuro cercano (2015-2039).....	156
Tabla 4.12. Parámetros estimados a partir de CROPWAT: Evapotranspiración del cultivo de maíz (ETc) Precipitación efectiva (Pe), requerimiento de riego (RR) a partir de los variables simuladas por los modelos climáticos globales para el futuro cercano (2015-2039).....	156
Tabla 4.13. Parámetros estimados de evapotranspiración del cultivo (ETc), precipitación efectiva (Pe) y requerimientos de riego (Re) por campaña para los cultivos de alfalfa y maíz.....	157
Tabla 4.14. Demanda de agua de riego por cultivos con una eficiencia del 90 % y demandas bajo expansión del Sistema de Aprovechamiento Múltiple (SAM) y demandas bajo expansión del Sistema de Aprovechamiento Múltiple y Planicie Curacó (SAM+PC).....	157

## LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

ACN= área cubierta de nieve.

CC= capacidad de campo.

CE= conductividad eléctrica.

cm= centímetro.

COIRCO= Comité Interjurisdiccional de la Cuenca del río Colorado

CORFO= Corporación de Fomento del Valle Bonaerense del Río Colorado.

CRC= cuenca del río Colorado.

CUCT= cambios en el uso y la cobertura de la tierra.

CV= coeficiente de variación.

DE= desvío estándar.

EAN= equivalente de agua en nieve.

ETc= evapotranspiración del cultivo.

ETo= evapotranspiración de referencia.

FAO= Food and Agricultural Organization of the United Nations.

GEI= gases de efecto invernadero.

ha= hectárea.

HH= huella hídrica.

hm<sup>3</sup>= hectómetros cúbicos.

IPCC= Panel Intergubernamental de cambio climático.

IV= índice de vegetación.

Kc= coeficiente del cultivo.

Km<sup>2</sup>= kilómetros cuadrados.

m= metros.

m<sup>3</sup>= metros cúbicos.

m.s.n.m.= metros sobre el nivel del mar.

MCG= Modelos de Circulación Global.

MDE= modelo digital de elevación.

μS= microSiemens.

mm= milímetros.

MODIS= Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

NASA= National Aeronautics and Space Administration.

NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada.

OT= ordenamiento territorial.

PA= Paso Alsina.

PC= Planicie Curacó.

Pe<sub>eff</sub>= precipitación efectiva.

PMP= punto de marchitez permanente.

PU= Punto Unido.

RAC= requerimientos de agua del cultivo.

RCP= trayectorias de concentración representativas.

RR= requerimientos de riego.

SAM= Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado.

SAM= Sistema de Aprovechamiento Múltiple.

SIG= Sistema de Información Geográfica.  
SRTM= Shuttle Radar Topography Mission.  
VBRC= Valle Bonaerense del río Colorado.

# **CAPÍTULO 1**

---

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1. MARCO CONCEPTUAL

### 1.1.1. Cambios en el uso y la cobertura de la tierra

Los cambios en el uso y cobertura de la tierra (CUCT) son los resultados más visibles de las modificaciones del hombre sobre los ecosistemas terrestres (Weng y Wei, 2003). El uso de la tierra describe el conjunto de actividades que la sociedad realiza en un territorio, para producir, modificar o conservar su estado (Di Gregorio y Jansen, 1998). Está caracterizado por los arreglos, actividades e insumos que el hombre emprende en un cierto tipo de cobertura de la tierra para producir, cambiarla o mantenerla, por lo que refleja el planteo productivo predominante en el sector rural (Carreño y Viglizzo, 2007). El mismo está influenciado por factores económicos, culturales, políticos, históricos y de tenencia, a múltiples escalas.

Por otra parte, la cobertura de la tierra es la cobertura biofísica que se observa sobre la superficie (Di Gregorio, 2005). Este atributo biofísico afecta el funcionamiento ecosistémico (Brown *et al.*, 2000). Es así como un determinado tipo de cubierta vegetal, puede tener diferentes usos. Los cambios históricos en la cobertura y en el uso de la tierra, en conjunto, ayudan a explicar el alcance espacial y el grado de profundidad de las alteraciones ambientales relacionadas con las actividades humanas (Zhang *et al.*, 2004; Xiao y Weng, 2007).

Los CUCT son un componente clave del cambio global (Dale *et al.*, 2000; Vitousek *et al.*, 1997; Vega *et al.*, 2009). Los CUCT pueden afectar al clima, modificando entre otros la dinámica del agua (Gordon *et al.*, 2008; Noretto *et al.*, 2005), el aumento de gases de efecto invernadero (Searchinger *et al.*, 2008) y el balance superficial de energía (Pielke y Avissar, 1990). De esta manera, el cambio de uso del suelo se ha convertido en un importante forzante del cambio climático regional y global (Houghton *et al.*, 1999; Chase *et al.*, 2000; Claussen *et al.*, 2001; DeFries *et al.*, 2002; Brovkin *et al.*, 2004). Este fenómeno es considerado como la primera causa de alteración del suelo (Matson *et al.*, 1997; Lambin *et al.*, 2001; Foley *et al.*, 2005) y afecta fuertemente la capacidad de los sistemas biológicos para soportar y satisfacer las necesidades humanas (Vitousek *et al.*, 1997, Foley *et al.*, 2005). Tales cambios incrementan, a su vez, la vulnerabilidad de ecosistemas y personas frente a desastres naturales (Lambin *et al.*, 2001).

En las regiones semiáridas y áridas, la agricultura se expande sobre nuevos territorios, incluyendo sistemas naturales o sistemas que previamente se destinaban a la ganadería (Solbrig, 1999) a través de la eliminación y/o el reemplazo de la vegetación, implicando importantes CUCT y, en consecuencia, en el funcionamiento del ecosistema. En particular, la agricultura bajo riego de los países en desarrollo se ha expandido 4 veces, pasando de 47,3 millones de hectáreas en 1900 a 276,3 millones de hectáreas en el 2000 (e.g. Scanlon *et al.*, 2007). Debido a los mayores rendimientos de la agricultura de regadío en comparación con la de secano, y a la expansión de los cultivos hacia zonas marginales, se predice que el área de regadío seguirá aumentando en el futuro (e.g. Abrahao *et al.*, 2011) a razón de un 20% hasta el 2030 (e.g. Scanlon *et al.*, 2007). Además, el riego permite estabilizar los rendimientos de los cultivos, ya sea mediante riego suplementario o integral, resultando esto sumamente importante en un contexto de variabilidad climática.

### 1.1.2. Impactos en el ciclo hidrológico

Los efectos del cambio en la cobertura vegetal en los procesos hidrológicos han sido evaluados globalmente usando diferentes herramientas y escalas. Estudiar los CUCT en ecosistemas áridos y semiáridos resulta sumamente importante debido a su vulnerabilidad en términos de balance de agua (Reynolds *et al.*, 2007). En estas regiones la mayor parte de las pérdidas del agua precipitada en superficie se debe a la evapotranspiración (ET) (e.g. Tweed *et al.*, 2011), mientras que el drenaje puede considerarse prácticamente nulo (e.g. Scanlon *et al.*, 2005). Por lo tanto, conocer la dinámica temporal de la ET permite evaluar los efectos de los cambios de uso de la tierra sobre la hidrología regional.

Existen evidencias a escala mundial de los impactos hidrológicos por conversión de estos sistemas naturales a sistemas bajo riego, como la elevación del nivel freático (Pérez *et al.*, 2011), el aumento de la ET, y la movilización y distribución de sales y nutrientes en el perfil de suelo (Scanlon *et al.*, 2007; Gabriel *et al.*, 2012). Contreras *et al.* (2011) evaluaron el balance de agua en la región del Monte Central en Argentina, concluyendo que el 62% de la ET proviene del aporte de agua de los ríos andinos. Zhang *et al.* (2012) evaluaron los efectos del cambio de la cubierta vegetal sobre la escorrentía, la ET y la humedad del suelo en una cuenca de China, y concluyeron que la ET es el componente hidrológico más sensible a dichos cambios. En la cuenca de Lerma, España, Abrahao *et al.* (2011) registraron aumentos en la ET por expansión del regadío. Por otro lado, un estudio realizado en el norte de China muestra que el exceso de riego ha llevado a elevar los niveles freáticos, provocando problemas de salinidad en la región (Xu *et al.*, 2013). Estas intervenciones humanas en los ecosistemas implican, por lo tanto, alteraciones en la prestación de sus servicios (Jobbágy *et al.*, 2008) tales como: provisión de agua para los distintos usos (e.g. consumo humano, riego, industria, esparcimiento), provisión de hábitat y regulación de crecientes, de inundaciones y de salinización (MA, 2005; Paruelo *et al.*, 2006; Viglizzo y Frank, 2006; Jobbágy, 2011).

### 1.1.3. Herramientas para el estudio del ciclo hidrológico

La teledetección, definida como la observación a distancia de los objetos, permite estudiar los usos y coberturas de la tierra, el tipo de vegetación (e.g. Noretto *et al.*, 2012), los cuerpos de agua y la cobertura de nieve (Salomonson y Appel, 2004; Cartes, 2009; Dahri *et al.*, 2011; Herms y Jorge, 2012), entre otros. El uso de diferentes herramientas y metodologías ha permitido cuantificar los componentes del balance de agua y, la productividad primaria de los ecosistemas, entre otras aplicaciones. (Allen *et al.*, 2005; Bastiaanssen *et al.*, 2005; Immerzeel *et al.*, 2008).

Existen diversos trabajos en los cuales se ha aplicado información derivada de sensores remotos, de una amplia gama de resoluciones espaciales, espectrales y temporales para la estimación de ET (Melesse *et al.*, 2007; Romaguera *et al.*, 2010). Por ejemplo, Di Bella *et al.* (2000) estimaron la ET real para la Región Pampeana, combinando información derivada del sensor satelital AVHRR-NOAA (índice de vegetación de diferencia normalizada -NDVI- y la temperatura de superficie). Noretto *et al.* (2012) estimaron la ET a partir de imágenes Landsat 7 ETM+ en diversas coberturas de suelo en el área central de Argentina. Contreras *et al.* (2011)

evaluaron un modelo basado en supuestos ecológicos, integrando información provista por sensores remotos para la estimación de la ET anual y estacional en regiones áridas y semiáridas.

También mediante información provista por diferentes sensores y plataformas es posible identificar la presencia de nieve en superficie (e.g. MODIS, Landsat TM, NOAA). Varios autores han utilizado los productos del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para el seguimiento espacial y temporal de la cubierta de nieve en diferentes áreas de estudio (Ault *et al.*, 2006; Cea *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008; Cartes, 2009; Dahri *et al.*, 2011; Herms y Jorge, 2012). Cea *et al.* (2007) determinaron la cobertura nival mediante el uso del producto diario de nieve MOD10A e imágenes de Landsat. Wang *et al.* (2008) en el norte de China evaluaron la variabilidad temporal del área cubierta por nieve y la precisión del producto MOD10A2; y en cuencas de los Andes de Chile, Cartes (2009) estudió la distribución espacial de la cobertura de nieve para estimar la escorrentía por deshielo. Asimismo, Dahri *et al.* (2011) estimaron la distribución espacial y temporal de la cubierta de nieve para predecir la escorrentía.

Otras herramientas muy utilizadas a escala de lote son los modelos de crecimiento de cultivo. A partir de la integración de información referente al clima, el suelo, los cultivos y el manejo es posible estimar el rendimiento y el consumo de agua, lo cual permite evaluar los efectos de los CUCT sobre el balance de agua en los ecosistemas. La información derivada de sensores remotos, satelitales o de terreno, complementa a los modelos de crecimiento en la medida que permite su calibración, o la actualización de las variables del cultivo calculadas por el modelo (e.g. Dorigo *et al.*, 2007). A su vez, existen modelos específicos para el estudio del uso del agua. Entre ellos, los desarrollados por FAO (*Food and Agriculture Organization*) que estiman necesidades de agua y requerimientos de riego de los cultivos a partir de información del clima y del cultivo como CROPWAT (Smith, 1992) y AQUACROP (Steduto *et al.*, 2009). Stancalie *et al.* (2010) compararon la ET real de maíz calculada por el modelo CROPWAT con estimaciones satelitales mediante imágenes de NOAAVHRR, obteniendo errores relativos de  $\pm 10-15\%$ . La integración de datos remotos en modelos de crecimiento de cultivos ha permitido en los últimos años mejorar la precisión en las estimaciones de consumo de agua, eficiencias, y requerimientos de riego, proporcionando a su vez información espacialmente distribuida sobre zonas extensas. La integración de dichas aproximaciones a través de sistemas de información geográfica (SIG) ofrece la posibilidad de abordar la gestión del agua a distintas escalas espaciales, desde lote a cuenca (González Dugo y Mateos, 2008; Yang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012), y en sitios con diferentes situaciones de manejo (Marchesini *et al.*, 2009; Contreras *et al.*, 2011; Nosetto *et al.*, 2012). El modelo presenta un compromiso entre simplicidad y precisión que lo hace interesante para su aplicación.

## **1.2. FUNDAMENTACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL TEMA**

En los sistemas áridos y semiáridos, el reemplazo de la vegetación natural por agricultura bajo riego cobra particular importancia (Reynolds *et al.*, 2007), donde la ET constituye uno de los principales componentes del balance de agua. Las cuencas hidrográficas han sido reconocidas internacionalmente como las unidades territoriales de estudio y planificación más adecuadas para la gestión integrada de los recursos hídricos. La cuenca del río Colorado dispone de tierra y agua para la expansión de la agricultura bajo riego, resultando en una oportunidad

única en el país, con gran potencial para el desarrollo y expansión de esta actividad. Por esta razón, los cambios en el uso y la cobertura de la tierra son previsibles.

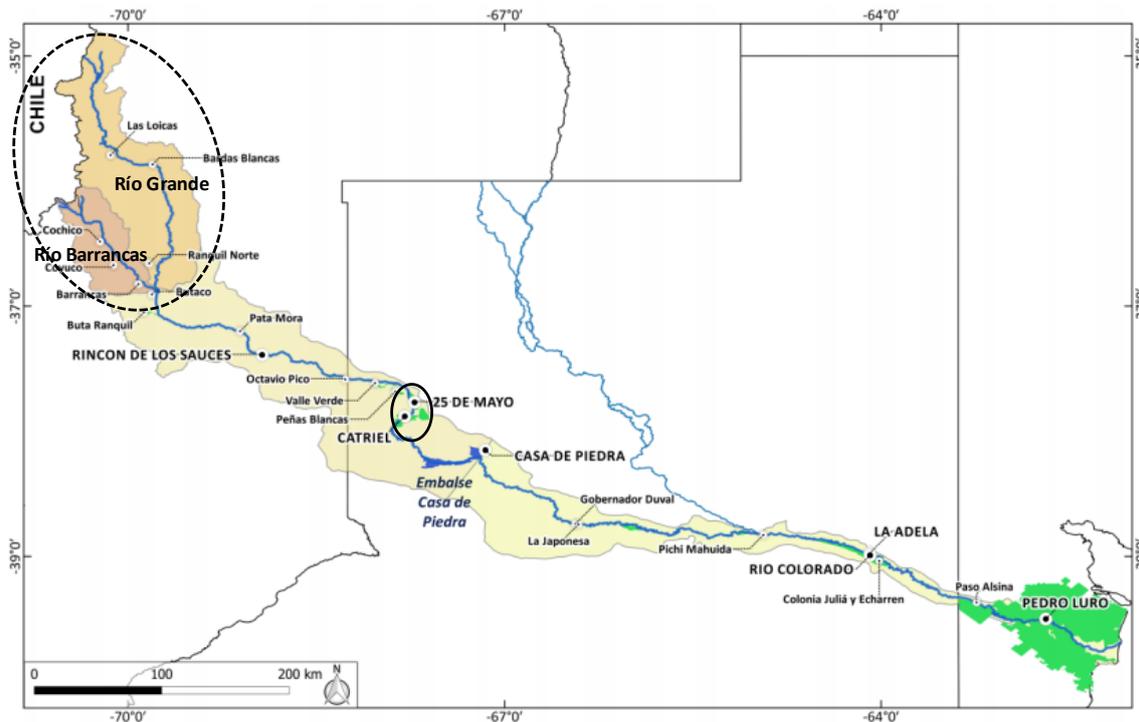
En las cuencas de los Andes Centrales de Argentina existen evidencias y previsiones que las precipitaciones níveas podrían disminuir por el aumento de la temperatura (mayor relación lluvia / nieve), y de esta manera disminuiría el caudal de los ríos (e.g. Boninsegna y Villalba, 2006). Este impacto suma complejidad a la vulnerabilidad del sistema bajo estudio, afectando la disponibilidad de agua para riego, especialmente en momentos críticos como la primavera y el verano cuando la demanda de agua del cultivo excede la precipitación. Por lo tanto, si los caudales se reducen y el uso del agua se intensifica, es altamente probable que surjan conflictos entre provincias o regiones. Los actores de la cuenca alta, querrían utilizar la mayor cantidad de agua posible, en desmedro de quienes deben utilizarla en las cuencas media y baja. Teniendo en cuenta el incremento de la demanda de agua dulce y la competencia para los distintos usos, la planificación y gestión integral del recurso hídrico resulta esencial para su manejo (Boninsegna, 2014).

La cuenca del Colorado está inmersa en un sistema árido y vulnerable frente a la variabilidad climática, sumando complejidad a la situación, su condición geográfica y política que le confiere su interjurisdiccionalidad. En vista de los cambios que han venido ocurriendo, y anticipándonos a los futuros CUCS, es elemental entonces conocer las consecuencias sobre las principales componentes del balance de agua de ecosistemas áridos y semiáridos. Existen importantes vacíos de conocimiento sobre los impactos potenciales que provocaría la conversión de sistemas naturales a agricultura bajo riego sobre la hidrología regional en la cuenca del río Colorado, y, en consecuencia, sobre la prestación de los servicios ecosistémicos. Resulta sumamente interesante generar pautas para un ordenamiento del territorio en este contexto, para ello se requiere conocer y entender la dinámica de estos sistemas.

Para lograr un desarrollo sustentable de esta región, es necesaria la comprensión de los procesos ecosistémicos y es imprescindible contar con conocimiento y tecnología que aseguren un manejo equitativo, eficiente y sustentable del recurso. En este marco de conciencia y con la disponibilidad de herramientas como modelos de cultivos e hidrológicos y sensores remotos, resulta factible un abordaje a distintas escalas temporales (anual e interanual) y espaciales (lote y cuenca). Dicha información es demandada por administradores, gestores del recurso agua y técnicos, para minimizar los impactos y riesgos.

### **1.3. ÁREA DE ESTUDIO**

El desarrollo de esta Tesis se centró en dos escalas de trabajo: 1) a escala de cuenca, en la cuenca alta (subcuencas de los ríos Barrancas y Grande), que corresponden a la cuenca activa y en la cuenca media y baja río Colorado, Argentina. 2) A escala de lote, en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado en 25 de Mayo, La Pampa (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Área de estudio en la cuenca del río Colorado: 1) En línea punteada área de estudio abordada a escala de cuenca sobre la cuenca alta y la línea continua escala de lote. Fuente: COIRCO, 2014.

### 1.3.1. Población

La cuenca del río Colorado presenta dos grandes áreas de población. En la cuenca media, las localidades de 25 de Mayo (La Pampa) y Catriel (Río Negro), constituyen los centros de actividad regional más importantes. En el valle inferior, la actividad económica se concentra en torno a los municipios de Río Colorado (Río Negro) y Pedro Luro, Hilario Ascasubi y Mayor Buratovich en la provincia de Buenos Aires. Abarca los departamentos de Malargüe en la provincia de Mendoza, Caleu Caleu, Curacó, Lihuel Calel y Puelén en la provincia de La Pampa, Chos Malal y Pehuenches en la provincia de Neuquén, Avellaneda, General Roca y Pichi Mahuida en la provincia de Río Negro y Patagones y Villarino en la provincia de Buenos Aires (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública, 2013; Sili y Espasa, 2015).

### 1.3.2. Autoridad de cuenca y entes reguladores del agua

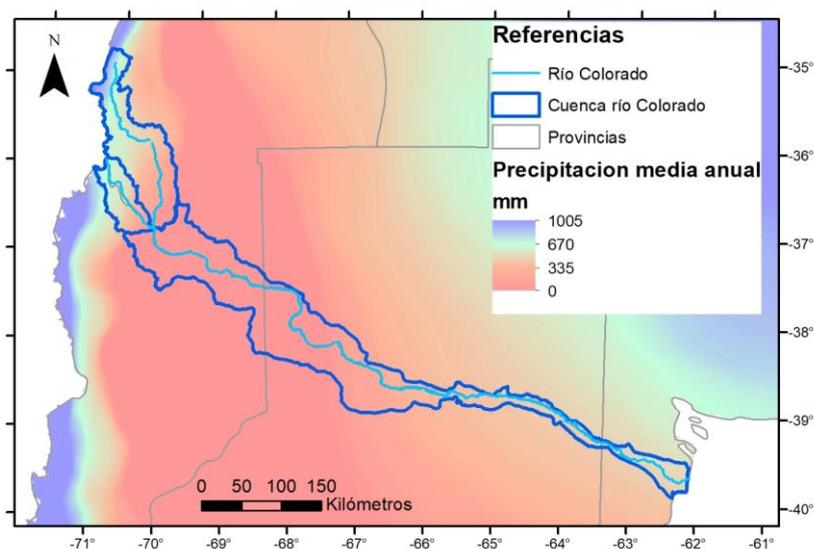
En 1956 en Santa Rosa (provincia de La Pampa) se celebró la Conferencia de Gobernadores de la Cuenca del Colorado, donde convinieron la puesta en marcha de la “Comisión Técnica Interprovincial Permanente” (Co.T.I.R.C), encargada de estudiar la cuenca y diseñar un programa de distribución equitativa de su agua entre las cinco provincias. Luego de más de 10 años de negociaciones, en la cuarta Conferencia de Gobernadores de la Cuenca del Colorado del 4 de diciembre de 1969, se sentaron las bases del “Acuerdo para la Distribución de Aguas en el Río Colorado”. Luego, el 26 de octubre de 1976 los representantes acordaron el

“Programa Único de Habilitación de Áreas de Riego y Distribución de Caudales del río Colorado” (Cirone, 2014). En líneas generales, este instrumento define los usos permitidos del agua de la cuenca, y asigna el volumen de dicho consumo permitido para cada parte (cupos), juntamente con un programa de construcción de obras por etapas. A su vez, en esa misma Sexta Conferencia de Gobernadores del Río Colorado, las cinco provincias ribereñas y el Ministro del Interior de la Nación firmaron el Tratado de la Cuenca del Colorado propiamente dicho, luego convalidado por la Ley Nacional 21.611 (B.O. 01/08/77) y las respectivas leyes provinciales para cada jurisdicción. Finalmente, en febrero de 1977 se acordó la creación y el estatuto del Comité Interjurisdiccional del Río Colorado (COIRCO), como entidad encargada de velar por el cumplimiento del Tratado.

De esta manera desde el punto de vista institucional, la cuenca tiene desde entonces al COIRCO como autoridad de cuenca. El COIRCO es una Entidad Interjurisdiccional integrada por la Nación y las provincias representantes de Buenos Aires, La Pampa, Mendoza, Neuquén y Río Negro. Las atribuciones conferidas sólo se refieren al ejercicio del poder de policía en relación con el buen uso del recurso. Además, cada provincia cuenta con entes reguladores del agua, en Mendoza el Departamento General de Irrigación, en La Pampa el Ente Provincial del río Colorado, en Río Negro el Departamento Provincial del Agua, en Neuquén el Ente Provincial de Aguas y Saneamiento y en la provincia de Buenos Aires la Corporación de Fomento del Valle Bonaerense del Río Colorado (CORFO Río Colorado).

### 1.3.3. Clima

En esta región existe una amplia diversidad de climas. A lo largo de la cuenca del río Colorado el clima varía de árido a ústico. En su tramo medio la precipitación media anual alcanza los 200 mm, con una temperatura media para el mes de enero de 23, 2 °C y en julio de 6, 7 °C. En su tramo bajo las precipitaciones rondan los 500 mm, con temperaturas de 22,3 y 7,6 °C para los meses de enero y julio, respectivamente (Halcrow, 2013). Por lo tanto, el régimen de lluvias disminuye de este a oeste, con excepción de las zonas montañosas (Figura 1.2).



**Figura 1.2.** Precipitación media anual en la cuenca del río Colorado. Fuente: adaptado de Atlas climático digital de la República Argentina.

### 1.3.4. Suelos

Los suelos presentan poco desarrollo debido a las particulares condiciones climáticas de la zona: aridez, vientos fuertes, y balance hídrico deficitario. Dichas condiciones y, consecuentemente, la cantidad y calidad de la cobertura vegetal han sido insuficientes para modificar sus propiedades originales (Interconsul *et al.*, 1982). Por otro lado, su origen aluvional ha dado lugar a una importante heterogeneidad espacial a los suelos de la región. El material originario a partir del cual han evolucionado los suelos del área de estudio corresponde a arenas, limos y arcillas de origen fluvio-glacial con remoción eólica. En la cuenca predominan los suelos que pertenecen a los órdenes aridisoles y entisoles (casi el 70 % de la superficie).

Los aridisoles representan casi un tercio de los suelos presentes en la cuenca. Se encuentran dos Subórdenes: los Argides y los Ortides. En general son suelos de colores claros por los bajos o nulos contenidos de materia orgánica. La ausencia de lavado en el perfil es la característica más importante de estos suelos. Esta condición resulta de la poca agua en el perfil, lo cual hace que las reacciones químicas y físicas sean poco intensas en relación a lo que sucede en las regiones húmedas. La falta de lavado ocasiona una alta saturación de bases en los suelos. Una característica que está presente en muchos perfiles de este suelo, es la formación de un “pavimento” y se debe a la contracción de la tierra fina o a un hundimiento o secado rápido.

Por su parte, los entisoles, incluyen los suelos que no evidencian o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogenéticos. La mayoría de ellos solamente tiene un horizonte superficial claro, de poco espesor y generalmente pobre en materia orgánica. Normalmente no se presentan otros horizontes diagnósticos, lo que se debe en gran parte al escaso tiempo transcurrido desde la acumulación de los materiales parentales. También pueden incluir horizontes enterrados siempre que se encuentren a más de 50 cm de profundidad. Representan un poco más de un tercio de los suelos presentes en la cuenca (35,3 %). Las limitaciones de los entisoles son el pobre desarrollo del perfil, la baja fertilidad y, a veces, el alto contenido de sales. Se distinguen cuatro Subórdenes presentes en el área de estudio: los Fluventes, los Acuentes, los Ortentes y los Psamentes.

### 1.3.5. Coberturas naturales del suelo

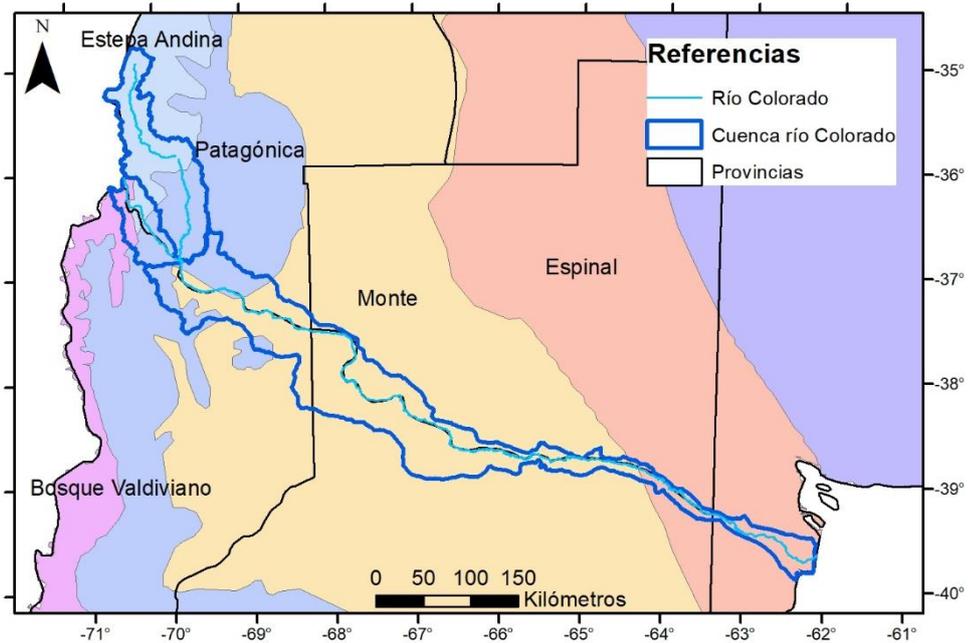
Existe un gradiente de vegetación Este-Oeste dado por los cambios ecológicos asociados a variaciones en la altitud, desde 4700 m.s.n.m. en el Oeste, al nivel del mar en el Este, y de variaciones de la precipitación. Desde el punto de vista fitogeográfico (Figura 1.3), se distinguen cuatro grandes provincias (Cabrera, 1976):

a) Provincia Estepa Andina, presenta un relieve de alta montaña, con escasa vegetación, laderas suaves y escarpadas, mesetas y detritus de falda. El suelo es suelto, rocoso, arenoso o pedregoso y muy pobre o inmaduro. Se encuentran suelos de turbera donde se acumula la humedad.

b) Provincia Patagónica, el relieve está representado por montañas poco elevadas y lomadas, mesetas, terrazas y llanuras. Los suelos son por lo general pedregosos-arenosos, muy pobres en materia orgánica y materiales finos. El clima frío y seco es el factor que determina la fisonomía de la vegetación del área. Las especies poseen adaptaciones para soportar los periodos desfavorables. Se destacan las estepas herbáceas, arbustivas y desiertos.

c) Provincia del Monte, el relieve es de llanuras y mesetas. El suelo es en general arenoso y profundo, también hay suelos zonales (halomórficos), rocosos, etc. El clima es seco y frío. Fisonómicamente la vegetación está constituida principalmente por especies arbustivas medias a altas, destacándose la presencia del género *Larrea* (Jarillas). Representa casi el 60 % de la cobertura vegetal del área de estudio.

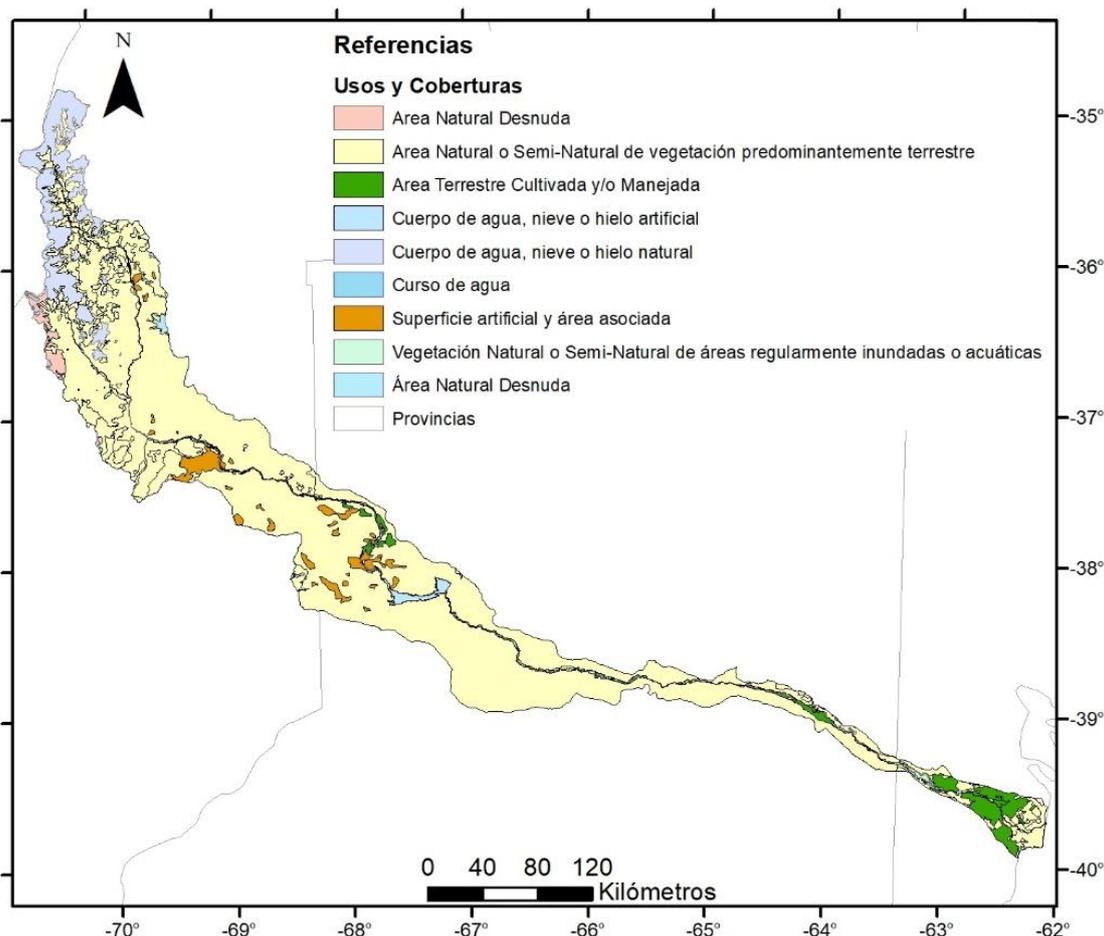
d) Provincia del Espinal, donde la formación típica es la de sabana, que si bien aún se conservan áreas con bosque, la agricultura, el pastoreo y la tala han fragmentado al ecosistema original, modificando la composición de sus pastizales naturales.



**Figura 1.3.** Tipos de vegetación basados en las provincias fitogeográficas de la cuenca del río Colorado. Fuente: Cabrera, 1976.

### 1.3.6. Usos de la tierra

Según la clasificación realizada por Halcrow (2013) en la cual describe las coberturas de la tierra en la cuenca del río Colorado (Figura 1.4), el 83 % de la cuenca es área natural o semi natural con vegetación de arbustos y herbáceas, un 3 % está representado por áreas cultivadas o manejadas (principalmente en las provincias de Buenos Aires y La Pampa), 1 % de vegetación natural regularmente inundada o acuática, y un 1 % de área desnuda (se presenta en la cuenca alta, en algunos sectores de las provincias de Mendoza y Neuquén). Además, un 8 % está ocupado por cuerpos y cursos de agua, nieve o hielo (estos últimos presentes en la cuenca alta), un 1 % de cuerpos de agua artificial (lago de Casa de Piedra) y un 3 % de superficie artificial (incluye áreas urbanas, áreas petroleras y mineras).



**Figura 1.4.** Unidades de cobertura de suelo en la cuenca del río Colorado. Fuente: Halcrow, 2013.

La dimensión productiva, y por lo tanto de usos del suelo del área de estudio, está marcada por la explotación de recursos naturales tanto renovables como no renovables.

La actividad petrolera se desarrolla en la parte oeste de la cuenca, aguas arriba del embalse de Casa de Piedra, donde se realiza la etapa de exploración y producción, cubriendo un área aproximada de 18.000 km<sup>2</sup> (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública, 2013). Por otro lado, la minería se desarrolla en la zona oeste y centro, más precisamente en el sur de la provincia de Mendoza, el norte de Neuquén y en parte de la provincia de La Pampa. Se trata de medianas y pequeñas empresas que se dedican a la extracción de sal, yeso y bentonita principalmente.

La producción ganadera es una actividad tradicional de esta región, y su desarrollo está determinado por la receptividad ganadera de los campos naturales. La actividad predominante en la región es la cría. A medida que avanzamos hacia el este de la cuenca, es posible pasar a sistemas forrajeros-ganadero que posibilitan otro tipo de actividad como la re cría o la invernada. En el este de la cuenca, Valle Bonaerense del Río Colorado (VBRC), funciona una pequeña cuenca lechera. Además, en el oeste de la cuenca se encuentran explotaciones con ganado caprino. Este sistema se caracteriza por ser netamente de cría, bajo la modalidad de pastoreo extensivo.

La agricultura que se desarrolla en la cuenca puede ser intensiva bajo riego o extensiva, en zona de secano. La agricultura de secano sólo se desarrolla en el este de la cuenca, más específicamente en el área del VBRC. Los productos son básicamente cereales y verdes de invierno. En el Programa Único de Distribución de Caudales y Habilitación de Áreas de Riego del Río Colorado (1976) se estimó a partir de la distribución de caudales entre la cuenca media e inferior y teniendo en cuenta la restricción de salinidad del agua que el área potencialmente regable alcanza las 318.100 ha. Actualmente, la agricultura bajo riego se ha desarrollado principalmente en las porciones media y baja de la cuenca ocupando la mitad del área potencialmente regable (Tabla 1.1). Según Díaz (2013) se registraron 24 áreas agrícolas bajo riego en la cuenca del río Colorado (Figura 1.5). A ello se le suman algunos sistemas en plena construcción (próximos a ser operativos) y en etapa de proyecto.

**Tabla 1.1.** Aprovechamiento de áreas bajo riego en la cuenca del río Colorado.

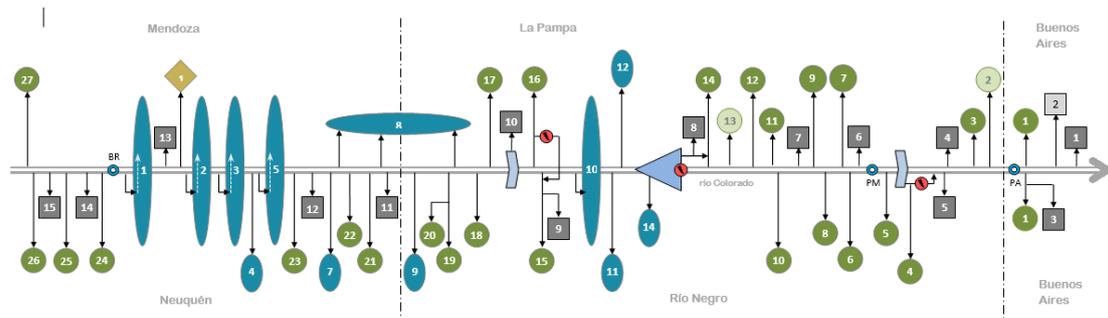
Fuente: COIRCO, 2014.

Provincia	Área potencial	Área bajo riego actual
Mendoza	1000	-
Neuquén	1000	500
La Pampa	85.100	9554
Río Negro	85.100	12.840
Buenos Aires	145.900	140.200
<b>Total</b>	<b>318.100 ha</b>	<b>163.200 ha</b>

En el sector alto-medio prevalecen las explotaciones de alfalfa, maíz y cultivos hortícolas, con riego gravitacional y riego por pivote central, con prevalencia de la producción de alfalfa cuyo destino final es la henificación (fardos, megafardos, cubos, pellets). Mientras que en el sector este de la cuenca predominan los cultivos de cebolla, alfalfa, seguidos por maíz, girasol, trigo mediante riego por gravedad. En la región bonaerense se produce más del 50 % de la cebolla que se consume en Argentina y más del 80 % de la destinada a exportación (13.500 ha en 2010/2011, y 500.000 toneladas anuales). En Río Colorado existen alrededor de 1700 hectáreas de frutales, de las cuales el 95 % se localiza en Colonia Julia y Echarren. Alrededor de 1250 hectáreas están destinadas a frutales de pepita. En la región de 25 de Mayo se encuentra el área frutícola en El Sauzal y su ampliación con una superficie total de 2900 hectáreas, de las cuales la mayoría se encuentran abandonadas o en reconversión (cambio a otras producciones tales como pasturas, aromáticas, producción hortícola, uso recreativo, residencial).

### **1.3.7. Usos del agua: urbano, riego, minería, industria, hidroelectricidad**

A partir de estudios previos (e.g. Díaz, 2013) se conoce que en la cuenca bajo estudio existen 15 sistemas de provisión de agua para ciudades y centros poblados (uno de ellos en proyecto), 27 sistemas de provisión de agua para riego (dos de ellos en proyecto), 14 sistemas de provisión de agua para explotación de hidrocarburos (dos de ellos no toman agua del río Colorado) y un emprendimiento minero. La disposición relativa de todos estos sistemas a lo largo del río Colorado se puede observar en la figura 1.5.



Agua para zonas URBANAS	
ID	Localidad Servida
SU.1	Pedro Luro, Ascasubi, Pradere
SU.2	Bahía Blanca, otras
SU.3	Villalonga, Stroeder
SU.4	La Adela
SU.5	Río Colorado
SU.6	Santa Rosa, Gral. Pico, otras
SU.7	Gobernador Duval
SU.8	Villa Turística CDP, Puelches
SU.9	Catriel
SU.10	25 de Mayo
SU.11	Octavio Pico
SU.12	Rincón de los Sauces
SU.13	Campamento PRC (Vale)
SU.14	Buta Ranquil
SU.15	Barrancas

Agua para RIEGO			
ID	Nombre del Sistema	ID	Nombre del Sistema
SR.1	CORFO Río Colorado	SR.15	Catriel
SR.2	Bajo de los Baguales	SR.16	25 de Mayo
SR.3	Valle del Prado	SR.17	El Sauzal
SR.4	Salto Andersen	SR.18	Peñas Blancas
SR.5	Iturroz	SR.19	Valle Verde
SR.6	Pichi Mahuida	SR.20	Extensión Valle Verde
SR.7	El Álamo	SR.21	Octavio Pico
SR.8	Santa Nicolasa	SR.22	Rincón Colorado
SR.9	Fincas de Duval	SR.23	Rincón de los Sauces
SR.10	Agro Bolívar	SR.24	Buta Ranquil
SR.11	Ungue	SR.25	Butaco
SR.12	El Milagro	SR.26	Barrancas
SR.13	Curacó	SR.27	El Batro
SR.14	Casa de Piedra		

Agua para uso PETROLERO		
ID	Empresa	Sitio
SP.1	YPF S.A.	Portón Norte
SP.2	YPF S.A.	Puesto Molina
SP.3	Petrobras Argentina S.A.	Puesto Hernández
SP.4	YPF S.A.	Puesto. Hernández
SP.5	YPF S.A.	Desfiladero Bayo
SP.6	Chevrón Argentina	El Trapial
SP.7	YPF S.A.	Campamento RDLs
SP.8	Pluspetrol S.A.	El Corcovo
SP.9	YPF S.A.	Activos II y III
SP.10	Petrobras Argentina S.A.	25 de Mayo
SP.11	Oldelval	Medanito
SP.12	Petroq. Comodoro Rivadavia	Medanito
SP.13	Petrolera Entre Lomas S.A.	Área Entre Lomas
SP.14	Petrolífera Petrol. Americas	Puesto Morales

Agua para uso MINERO	
ID	Explotación
SM.1	Potasio R. Colorado



**Figura 1.5.** Diagrama del río Colorado identificando tomas de agua para uso de las zonas urbanas (cuadrados grises), riego (círculos verdes), petrolero (óvalos azules), y minero (rombo marrón). Fuente: Díaz, 2013.

A las demandas de agua se agrega la localización del embalse Casa de Piedra; los diques derivadores Punto Unido y Salto Andersen; las tres centrales hidroeléctricas: Los Divisaderos, Casa de Piedra y Salto Andersen; y tres sitios de medición de caudales (Buta Ranquil, Pichi Mahuida y Paso Alsina) de los cuales el primero y último actúan también como puntos de control del Programa Único.

La demanda urbana, hidrocarburos y minería en conjunto no llegan a sumar un 1 % de la oferta hídrica. El uso agrícola como es de esperar lleva la porción más grande, el 54,4 %. Observar que se adoptó como consumo del sector agrícola 2553 hm<sup>3</sup> (Díaz, 2013). Las pérdidas por infiltración y por evaporación suman 27,4 %, un porcentaje alto pero esperable dadas las condiciones ambientales de la cuenca.

Según COIRCO (2015) el riego consume aproximadamente 1715 hm<sup>3</sup> de agua en la cuenca, que representa el 98 % del total del consumo, y el abastecimiento humano (24,4 hm<sup>3</sup>) y los usos minero y petrolero (13,2 hm<sup>3</sup>) representan el 1 % cada uno de ellos. En la actualidad existen diferencias entre el uso actual del agua y el uso del agua habilitado por el Acuerdo entre provincias de la cuenca. Así la Tabla 1.2 presenta una comparación entre los cupos asignados y el uso actual. Las diferencias más notables se presentan en las provincias de La Pampa, Mendoza y Río Negro que no utilizan toda el agua que tienen habilitada y por otro lado Neuquén y Buenos Aires que utilizan más agua de la habilitada.

**Tabla 1.2.** Usos del agua en la cuenca. Distribución por provincia y tipo de uso (derrame anual).

Fuente: COIRCO, 2014

Provincia	Riego	Poblaciones	Minero Petrolero
Buenos Aires	1080	2,5	0
La Pampa	253	12,5	1,8
Mendoza	1	1,2	5,8
Neuquén	67	3,2	4,2
Río Negro	314	4,9	1,4
Total (hm <sup>3</sup> )	1715	24,3	13,2
Total (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	54	0,8	0,4

#### 1.4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA TESIS

##### 1.4.1. Objetivo general:

Estudiar los efectos de los cambios en el uso y la cobertura de la tierra (CUCT) sobre los principales componentes del balance de agua, ante distintas situaciones de variación climática en la cuenca del río Colorado.

##### 1.4.2. Objetivos específicos:

- Describir y analizar la cuenca del río Colorado en términos hidrológicos.
- Estimar los principales componentes del balance de agua para diferentes cultivos en la cuenca del río Colorado.
- Generar y evaluar escenarios de usos y coberturas de la tierra ante variaciones climáticas.
- Analizar el impacto de dichos escenarios sobre los principales componentes del balance de agua.

##### 1.4.3. Hipótesis más relevantes:

- En las cuencas nivales, la superficie cubierta por nieve es indicador de la reserva de agua y además afecta su disponibilidad, adquiriendo esto mayor importancia en un contexto de cambio global.
- La salinidad del agua del río Colorado, asociada al caudal, constituye una limitante para el desarrollo y la expansión de la agricultura bajo riego en la cuenca.
- La expansión de la agricultura bajo riego aumenta la demanda agua y competencia de uso con otros usos y actores de la cuenca.

## 1.5. ORGANIZACIÓN GENERAL DE ESTA TESIS

La presente tesis está organizada en cinco capítulos:

- 1) Capítulo 1: En el presente capítulo, se presentó una revisión general de los antecedentes, la fundamentación del problema de estudio, el área de estudio y sus características y los objetivos e hipótesis que guiaron el desarrollo de la tesis.
- 2) Capítulo 2: Se caracteriza la cuenca en términos hidrológicos (objetivo 1).
- 3) Capítulo 3: Se detalla el balance de agua para los cultivos de alfalfa y maíz, a escala de lote (objetivo 2).
- 4) Capítulo 4: Se evalúan escenarios de usos y coberturas de la tierra ante variaciones climáticas y los impactos sobre el balance de agua (objetivo 3).
- 5) Capítulo 5: En este último capítulo se presenta una discusión general de todos los resultados, conclusiones, aportes de la tesis y futuras líneas de investigación.

Se presenta a continuación un esquema con los objetivos y principales tópicos (Figura 1.6).

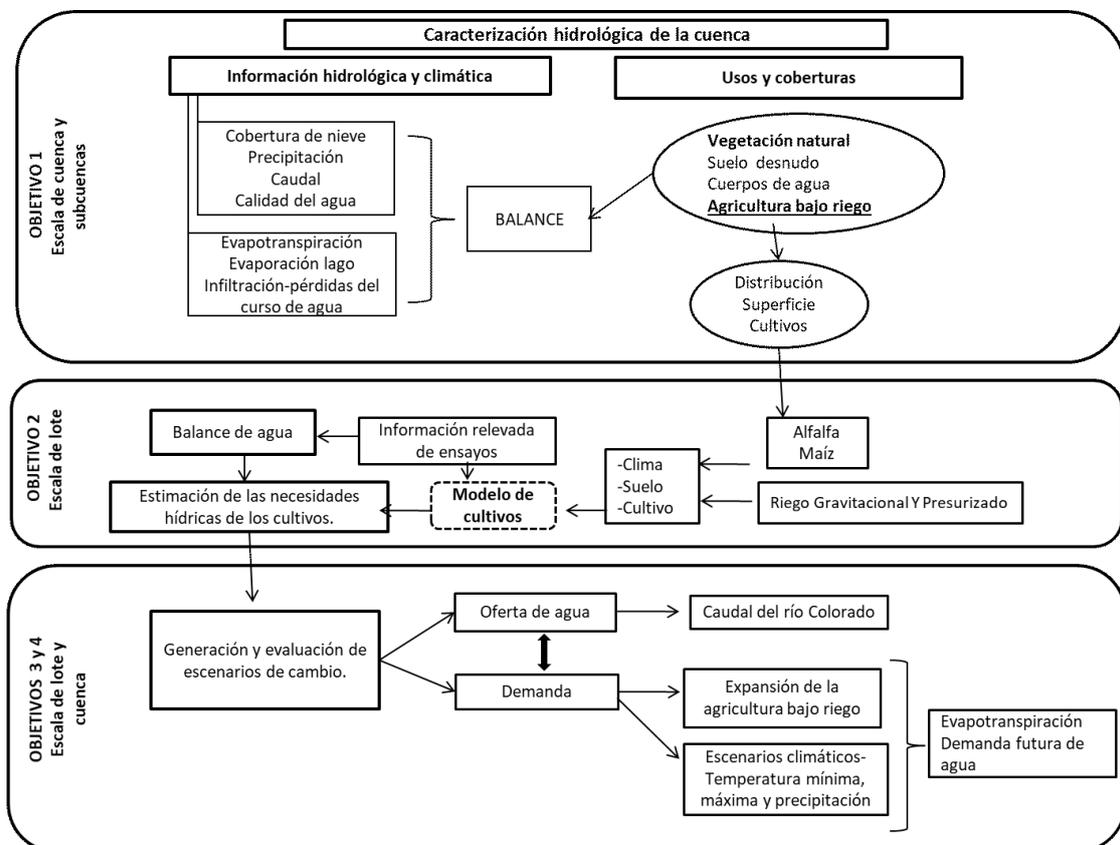


Figura 1.6. Esquema simplificado de la metodología seguida.

## 1.6. BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamo, R., Causapé, J., García-Garizábal, I., Merchán, D.** 2011. Implementing irrigation: Water balances and irrigation quality in the Lerma basin (Spain). *Agricultural Water Management* 102: 97-104.
- Allen, R. G., Tasumi M., Morse A., Trezza, R.** 2005. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 251-268.
- Ault, T. W., Czajkowski, K. P., Benko, T., Coss, J., Struble, J., Spongberg, A., Templin M., Gross C.** 2006. Validation of the MODIS Snow Product and Cloud Mask Using Student and NWS Cooperative Station Observations in the Lower Great Lakes Region, *Remote Sensing of Environment*, 105(4):341-353.
- Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., Allen, R. G.** 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 85-93.
- Boninsegna, J., Villalba, R.** 2006. Los Escenarios de Cambio Climático y el impacto en los Caudales. Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan. Segundo informe a la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 19 p.
- Boninsegna, J.** 2014. Impacto del cambio climático en los oasis del oeste argentino. Ciencia e investigación. Tomo 64 N°1. Disponible en: [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/4849/p45-58-64-1-2014-5\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/4849/p45-58-64-1-2014-5_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Brovkin, V., Sitch, S., Von Bloh, W., Claussen, M., Bauer, E., Cramer, W.** 2004. Role of land cover changes for atmospheric CO<sub>2</sub> increase and climate change during the last 150 years. *Global Change Biology* 10: 1253-1266.
- Brown, D.G., Pijanowski, B.C., Duh, D. J.** 2000. Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. *Journal of Environmental Management* 59: 247-263.
- Cabrera, A. L.** 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Acme, Buenos Aires. 85 pp. En: Kugler WF (Ed) Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería. Tomo 2. 2ª edición. Acme. Buenos Aires, Argentina. Fascículo 1: 1-85.
- Cartes, M. A.** 2009. Pronóstico de volúmenes de deshielos mediante redes neuronales recurrentes e imágenes satelitales MODIS. Tesis Ms. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Carreño, L. V., Viglizzo, E. F.** 2007. Provisión de Servicios Ecológicos y Gestión de los Ambientes Rurales en Argentina. Área Estratégica de Gestión Ambiental. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 68 p.
- Cea, C., Cristóbal, J., Pons, X.** 2007. Determinación de la superficie nival del Pirineo Catalán mediante imágenes Landsat y MODIS. En 7ª Semana de Geomática. Barcelona.
- Chase, T. N., Pielke, R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R., Running, S. W.** 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics*, 16, 93–105.

- Cirone, M.** 2014. La Gestión de la cuenca del río Colorado: Análisis de los aspectos más destacables del COIRCO. Congreso Internacional de Códigos y Desafíos para enfrenar la crisis del agua. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. 169-178 p. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/43500>
- Claussen, M., Brovkin, V., Ganopolski, A.** 2001. Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change. *Geophysical Research Letters* 28: 1011-1014.
- COIRCO** (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). 2014. Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. Disponible en: [www.coirco.com.ar](http://www.coirco.com.ar)
- COIRCO** (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). 2015. Perl, J. E., Andrés, F. O. Presentación: Manejo Integral de la cuenca del río Colorado. Oferta y demanda hídrica en períodos de sequía. En: Jornada de Actualización "Cuenca del río Colorado: Situación Actual, Proyectos en Ejecución, Planificación". Villa Casa de Piedra, La Pampa. Disponible en: [www.coirco.com.ar](http://www.coirco.com.ar)
- Contreras, S., Jobbágy, E. G., Villagra, P. E., Noretto M. D., Puigdefábregas, J.** 2011. Remote sensing estimates of supplementary water consumption by arid ecosystems of central Argentina. *Journal of Hydrology* 397: 10-22.
- Dahri, Z. H., Ahmad, B., Leach, J. H., Ahmad, S.** 2011. Satellite-based snow cover distribution and associated snowmelt runoff modeling in SWAT river basin of Pakistan. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences* 48 (1): 19-32.
- Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P.** 2000. The interplay between climate change, forests, and disturbances. *Science of the Total Environment* 262: 201–204.
- DeFries, R. S., Houghton, R. A., Hansen, M. C., Field, C. B., Skole, D., Townshend, J.** 2002, Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980's and 1990's. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99: 14256-14261.
- Díaz, G. E.** 2013. Informe técnico: Cuenca del río Colorado. Uso de las Aguas el río Colorado. 83 p.
- Di Bella, C. M., Rebella, C. M., Paruelo, J. M.** 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 21: 791-797.
- Di Gregorio, A., Jansen, L.** 1998. Land Cover Clasification System. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998. ISBN: 92-5-10421.
- Di Gregorio, A.** 2005. Sistemas de Clasificación de la cobertura de la tierra. Conceptos de clasificación y manual para el usuario. FAO, Roma. 226 p.
- Dorigo, W. A., Zurita-Milla, R., de Wit, A. J. W., Brazile, J., Singh, R., Schaepman, M. E.** 2007. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9: 165–193.
- Foley J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T. Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Jonathan, C. M.** 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.

- Gabriel, J. L., Almendros, P., Hontoria, C., Quemada, M.** 2012. The role of cover crops in irrigated systems: Soil salinity and salt leaching. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 158: 200-207.
- González-Dugo, M. P., Mateos, L.** 2008. Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugar beet crops. *Agricultural Water Management* 95: 48-58.
- Gordon L. J., Garry D. P., Bennett, E. M.** 2008. Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises. *Ecology and Evolution* 23 (4). 211-219 .
- Halcrow.** 2013. Cuenca del río Colorado determinación de áreas de riesgo hídrico. Programa Multisectorial de preinversión III. Préstamo BID 1896/OC-AR. Comité Interjurisdiccional del río Colorado. Hidroestructuras S.A.
- Herms, I., Jorge, J.** 2012. Variación anual e interanual del manto nivoso en el Port del Comptè-Serra del Cadí a partir de imágenes MODIS. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid.
- Houghton, R. A., Hackler, J. L., and Lawrence, K. T.:** 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 285, 574–578.
- Immerzeel, W. W., Gaur, A., Zwart, S. J.** 2008. Integrating remote sensing and a process based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agricultural Water Management* 95: 11-24.
- Interconsul S. A., Ade S. A., Franklin Consultora S. A.** 1982. Estudio de revisión y actualización del sistema de aprovechamiento múltiple del Río Colorado en Colonia 25 de Mayo - La Pampa. Informe Final. Sumario Plan de Desarrollo. Consejo Federal de Inversiones.
- Jobbágy, E. G.** 2011. Servicios hídricos de los ecosistemas y su relación con el uso de la tierra en la llanura Chaco- Pampeana. En: Valoración de los servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Editores: Laterra Pedro, Jobbágy Esteban, Paruelo, José. Buenos Aires-INTA. 740 p.
- Jobbágy, E. G., Noretto, M. D., Santoni, C., Baldi, G.** 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco- Pampeana. *Ecología Austral* 18: 305-322.
- Lambin, E.F., Turner II, B.L., Geist, H., Agbola, S., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., Skånes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Veldkamp, T., Vogel, C., Xu, J.,** 2001. Our emerging understanding of the causes of land-use and -cover change. *Global Environ.*
- MA (Millennium Ecosystem Assessment).** 2005. Ecosystems and Human Well-Being. Our Human Planet. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington 109 p.
- Marchesini, V. A., Sobrino, J. A., Hidalgo, M. V., Di Bella, C. M.** 2009. La eliminación selectiva de vegetación arbustiva en un bosque seco de Argentina y su efecto sobre la dinámica de agua. *Revista de Teledetección* 31: 93-102.
- Matson, P.A., Parton, W. J., Power, A. G., Swift, M. J.** 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277: 504–509.
- Melesse, A. M., Weng, Q., Thenkabail, P. S., Senay G. B.** 2007. Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modelling. *Sensors* 7: 3209-3241.

- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Paruelo J. M.** 2005. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, 11: 1101–1117.
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B., Jackson, R. B.** 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154: 2-11.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbágy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G., Baeza, S.** 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* 2: 47-61.
- Pérez, A. J., Abrahao, R., Causape, J., Cirpka, O. A., Burger, C.M.** 2011. Simulating the transition of a semi-arid rainfed catchment towards irrigation agriculture. *Journal of Hydrology* 409: 663-681.
- Pielke, R.A., Avissar, R.,** 1990. Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology* 4: 133–155.
- Programa Único de Distribución de Caudales y Habilitación de Áreas de Riego del Río Colorado.** 1976. Disponible en: [http://www.mininterior.gov.ar/provincias/archivos\\_cuencas/convenios/Rio%20Colorado/reglamento%20y%20estatuto%20Coirco.pdf](http://www.mininterior.gov.ar/provincias/archivos_cuencas/convenios/Rio%20Colorado/reglamento%20y%20estatuto%20Coirco.pdf)
- Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner II, B. L., Mortimore, M., Butterbury, S. P. J., Dowlatabadi, H., Fernández, R. J.** 2007. Global Desertification: Building a science for dryland development *Science* 316: 847-851.
- Romaguera, M., Hoekstra, A. Y., Su, Z., Krol, M. S., Salama, M. S.** 2010. Potential of using remote sensing techniques for global assessment of water footprint of crops. *Remote sensing* 2: 1177-1196.
- Salomonson, V. V., Appel, I.** 2004. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment* 89: 351-360.
- Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L.** 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water resources research* 43: 1-18.
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Stonestrom, D. A., Prudic, D. E., Dennehy, K. F.** 2005. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology* 11: 1577-1593.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, T.H.** 2008. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science* 29: 1238-1240.
- Sili, M., Espasa, L.** 2015. Habitar la región del río Colorado. Situación actual y desafío futuro. En Sili, M., Kozel, A., Bustos Cara, R. *La región del Colorado: historia, cultura y paisaje en la frontera.* Fundación ArgenINTA. Buenos Aires, Argentina. 213 p.
- Smith, M.** 1992. *CropWat: a computer program for irrigation planning and management.* FAO Irrigation and Drainage Paper 46. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- Solbrig, O. T.** 1999. Observaciones sobre biodiversidad y desarrollo agrícola. En: *Biodiversidad y uso de la Tierra. Conceptos y ejemplos de Latinoamérica.* Editores: Mateucci, S. D., Solbrig, O. T., Morello, J., Halffter, G. Ed. Eudeba. Argentina.

- Stancalie, G. H., Marica, A., Toullos, L.** 2010. Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration. *Physics and Chemistry of the Earth* 35: 25-30.
- Steduto, P., Rees, D., Hsio, Fereres, E., Heng, L., Izzi, G., Hoogerenen, J.** 2009. Aquacrop: A new model for crop prediction under water deficit conditions. Land and water Division, FAO UN Rome, Italy.
- Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública.** 2013. Diagnóstico Integrado y escenarios de futuro de la región y la cuenca del río Colorado. Programa de fortalecimiento institucional. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado. Disponible en: <http://consorciohidraulico.com.ar/userfiles/RC1-pla.pdf>.
- Tweed, S., Leblanc, M., Cartwright, I., Favreau, G., Leduc, C.** 2011. Arid zone groundwater recharge and salinisation processes; an example from the Lake Eyre Basin, Australia. *Journal of Hydrology* 408: 257-275.
- Vega, F. E., Infante, F., Castillo, A., Jaramillo, J.** 2009. The coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae): a short review, with recent findings and future research directions. *Terrestrial Arthropod Reviews* 2 (2):129-147.
- Viglizzo, E. F., Frank, F. C.** 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158: 122-126.
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Schlesinger, W. H., Tilmani D. G.** 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences *Ecological Applications* 7 (3): 737–750.
- Wang, X., Xie, H., Liang, T.** 2008. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its applications in northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1497-1513.
- Weng, Q., Wei, Y. D.** 2003. Land use and land cover changes in China under reform and globalization. *Asian Geographer* 22 (1): 1-3.
- Xiao, H., Weng. Q.** 2007. The impact of land use and land cover changes on land surface temperature in a karst area of China. *Journal of Environmental Management* 85:245–257
- Xu, X., Huang, G., Sun, G., Pereira, L. S., Ramos, T. B., Huang, Q., Hao, Y.** 2013. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: Searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin. *Agricultural Water Management* 125: 46-60.
- Yang, Y., Shang, S., Jiang, L.** 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology* 164: 112-122.
- Zhang, Q. J., Fu, B.J., Chen, L.D., Zhao, W.W., Yang, Q.K.J., Liu G., Gulick, B. H.** 2004. Dynamics and driving factors of agricultural landscape in the semiarid hilly area of the Loess Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103: 535–543.
- Zhang, X., Liu, Y., Fang, Y., Liu, B., Xia, D.** 2012. Modeling and assessing hydrologic processes for historical and potential land-cover change in the Duoyingping watershed, southwest China. *Physics and Chemistry of the Earth* 53-54: 19-29.

# **CAPÍTULO 2**

---

## **CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLORADO**

## 2.1. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1.1. Cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico para la planificación y gestión del desarrollo sustentable (Gaspari, 2013). Una cuenca hidrográfica se define como un espacio delimitado por un perímetro denominado línea divisoria de aguas, desde donde los caudales superficiales provenientes de los derrames meteorológicos normales que precipitan sobre aquel, escurren hacia un eferente colector (Ferrari Bono, 1997). En otras palabras, una cuenca hidrográfica es una unidad morfológica integral, que se define en un territorio donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural delimitada por la existencia de la divisoria de las aguas, las cuales fluyen hacia el mar o a través de una red de cauces principales. Desde un enfoque sistémico del concepto de cuenca hidrográfica supera la idea de reducirla a una superficie de convergencia del escurrimiento hídrico superficial ya que considera a todo el complejo biogeomórfico y humano.

En esta investigación, se adoptó el concepto de cuenca hidrográfica como criterio de delimitación del área de estudio. Por ello es necesario conocer sus límites y la definición de sus características morfológicas, hidrológicas, y ambientales/productivas de la sociedad que la integra. A partir de este concepto integrador, la cuenca hidrográfica se define como un sistema de relaciones sociales y económicas cuya base territorial y ambiental es una red de drenaje superficial que fluye a un mismo río, lago o mar con un territorio que lo comprende. Toda cuenca hidrográfica, como sistema, constituye un conjunto de componentes que están conectados e interactúan formando una unidad (Gaspari *et al.*, 2010).

Los componentes principales que determinan el funcionamiento de una cuenca son los elementos biofísicos (atmósfera, clima, suelo y subsuelo, hidrología, flora y fauna) y los antrópicos (socio-económicos-culturales como infraestructura, tecnología, niveles de calidad de vida, sistemas de producción, tenencia de tierra, entre otros), demográficos (tamaño y distribución de la población) y jurídico-institucionales. Estos conforman diversos subsistemas, el biofísico, el social, el económico y el demográfico, los cuales interactúan definiendo a la cuenca hidrográfica como un territorio que compone un sistema integral. Por lo tanto, la cuenca es un “continuo” de clima, suelos, cobertura vegetal, hábitats, red de drenaje, sistemas de producción y presencia humana a lo largo de su pendiente, que interactúa en el espacio y en el tiempo (Gaspari *et al.*, 2010).

El hombre cumple una función perturbadora en la evolución natural de la cuenca. Es decir, al intervenirla mediante la explotación de los recursos que ella posee, provoca cambios en las interrelaciones de los componentes, por lo que el sistema tiende a un equilibrio diferente. Es por ello que surge el concepto de manejo integral de cuencas hidrográficas, basado en el estudio de las interrelaciones de sus componentes.

A partir de conocer las características de una cuenca hidrográfica se pueden establecer sus funciones:

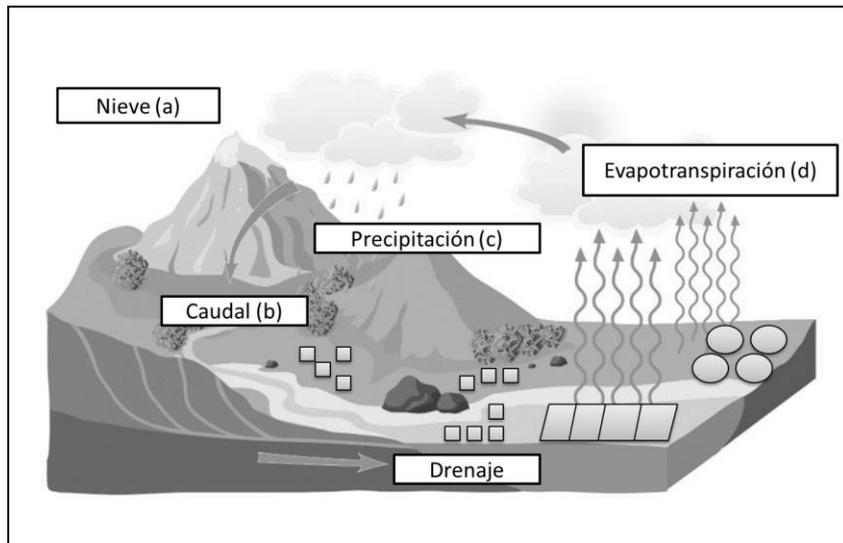
- *Hidrológica*: captar agua de las diferentes fuentes de precipitación para formar el escurrimiento de manantiales, ríos y arroyos, el almacenamiento del agua en sus diferentes formas y tiempos de duración.

- *Ecológica*: proveer de hábitat para la flora y fauna constituyendo los elementos biológicos del ecosistema y manteniendo interacciones entre las características físicas y biológicas del agua.
- *Ambiental*: regular la recarga hídrica y los ciclos biogeoquímicos del ecosistema, conservar la biodiversidad, constituir sumideros de CO<sub>2</sub>, albergar bancos de germoplasma, mantener la integridad y la diversidad de los suelos.
- *Socioeconómica*: suministrar recursos naturales para el desarrollo de las actividades productivas que dan sustento a la población y proveer de un espacio para el desarrollo social y cultural (Bernex, 2006).

### 2.1.2. Ciclo hidrológico

Las condiciones climáticas y las características físicas particulares de una cuenca, son las que determinan el funcionamiento e influyen en la descripción de la dinámica del ciclo hidrológico. Este funcionamiento se basa en los principios del ciclo del agua y sus relaciones con el suelo, la cobertura y uso de la vegetación, la topografía y el agua, en tiempo y espacio. Debido a ello, al estudiar una cuenca hidrográfica se analiza y trata de describir el comportamiento del agua superficial. El conocimiento particular del movimiento del agua en una cuenca permite organizar, ordenar y planificar la misma. Por ello la caracterización del ciclo hidrológico generará un diagnóstico básico para todo estudio en esta unidad hidrológica.

El ciclo hidrológico es un modelo conceptual que describe la presencia y el movimiento del agua en la Tierra y sobre ella (Figura 2.1). El agua de la Tierra está siempre en movimiento y constantemente cambiando de estado, desde líquido, a vapor, a sólido, y viceversa. El ciclo se basa en una entrada principal, la precipitación líquida (P) o sólida (nieve), y salidas de agua como son la evaporación del suelo y de cuerpos de aguas (si estos existieran), la evapotranspiración (ET) como agua que regresa a la atmósfera desde la cubierta vegetal, la que ingresa al suelo (infiltración y percolación) y el escurrimiento, que se encuentran en movimiento casi continuo en las capas horizontales del suelo (Gaspari et al., 2013). La energía del sol junto con factores meteorológicos de temperatura, viento, radiación solar y humedad producen escurrimiento en los cuerpos de agua y evapotranspiración en las plantas y evaporación suelo.



**Figura 2.1.** Esquema simplificado del ciclo del agua y de las variables analizadas en este capítulo: Entradas a) nieve, b) caudal, c) precipitación y salida: d) evapotranspiración. Fuente: adaptado de <https://concepto.de/ciclo-del-agua/>.

La nieve es la componente más importante del ciclo hidrológico (e.g. Haefner *et al.*, 1997), dominando la hidrología regional de gran parte del mundo. Una quinta parte de la población mundial depende de la nieve o glaciares, generándose en estas áreas una cuarta parte del producto interno mundial (e.g. Rittger *et al.*, 2013). Los cuerpos de hielo constituyen componentes cruciales del sistema hidrológico de montaña y son reconocidos como “reservas estratégicas” de agua para las zonas bajas adyacentes y gran parte de la diagonal árida de Argentina (Inventario Nacional de Glaciares, 2018). La nieve que se acumula cada invierno en la Cordillera de los Andes constituye la principal fuente de agua para los ríos argentinos. En años secos o con baja precipitación nival, los glaciares tienen una contribución muy importante al caudal de los ríos andinos, ya que aportan volúmenes significativos de agua de deshielo a la escorrentía ayudando a minimizar los impactos de las sequías en las actividades socioeconómicas de los oasis de regadío. En los oasis productivos del centro oeste de Argentina, toda la actividad agrícola, industrial, hidroeléctrica y los asentamientos humanos, dependen del agua proveniente de la fusión de la nieve y de los cuerpos de hielo que se encuentran en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes.

La formación y precipitación de nieve depende de una serie de factores que se pueden agrupar en condicionantes geográficos y climáticos (Boninsegna, 2014). Entre los primeros se encuentran la ubicación geográfica y morfología de la cuenca. La ubicación geográfica define la altura de la cuenca, que influye en mayor o menor capacidad de almacenamiento de nieve y la topografía, en especial la orientación relativa de los valles, en la mayor o menor velocidad de fusión de la nieve debida a la exposición solar, originando diferencias en los tiempos que los ríos alcanzan su máximo caudal. Dentro de los condicionantes climáticos, el más importante es la temperatura, que regula la velocidad de fusión de la nieve que luego escurre. El volumen anual de agua que escurre por el cauce de un río, denominado derrame, es el resultado del ciclo anual del clima de una cuenca.

Por lo tanto, el estudio de la cobertura nival es fundamental para la evaluación de los derrames durante los períodos de estiaje, para que la planificación y manejo del recurso hídrico

responda a las necesidades y restricciones de abastecimiento humano, riego, uso industrial, requerimientos ecológicos, entre otros. Se requiere de la base de todas las actividades relacionadas con la hidrología de la nieve un mapeo preciso, periódico y continuo del área cubierta de nieve en sus fluctuaciones estacionales.

Existen diversos instrumentos y sensores de campo para medir, por ejemplo, la profundidad de la nieve, la densidad y el equivalente de agua en nieve. A partir de esta información se puede cuantificar tanto la acumulación como la fusión de nieve. El equivalente de agua nieve (EAN) se define como la proporción de agua que se obtendría teóricamente si se fusionara un volumen de nieve, en efecto, es un parámetro altamente importante en hidrología ya que permite estimar el agua reservada en las cuencas altas de régimen nival. En todos los casos se obtiene un dato puntual en el tiempo y el espacio (Lascano y Velasco, 2007), además de ser sitios de difícil acceso, con elevados costos y tiempos de medición y mantenimiento. De esta manera, el uso de datos provistos por redes meteorológicas no es suficiente en cuencas de grandes extensiones, dado que el número de puntos de medición en el territorio es bajo. Por lo tanto, la información derivada de la teledetección se presenta aquí como una interesante fuente complementaria de información para el seguimiento y estudio de la cobertura de nieve en cuencas de grandes extensiones.

Los sensores remotos proporcionan múltiple información, en una variedad de resoluciones (espacial, temporal, espectral y radiométrica), constituyéndose así como una herramienta para el seguimiento de la cobertura de nieve en tiempo real. El monitoreo satelital de la cubierta de nieve estacional es una herramienta importante para la evaluación de las reservas de nieve en las cuencas de montaña (Ehrler *et al.*, 1997). Existen varias investigaciones en diferentes regiones del mundo en los cuales se utiliza productos de nieve de MODIS para estimar la variación espacial de nieve y para el modelado de la escorrentía del deshielo (Immerzeel *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2005; Maurer *et al.*, 2003). Tahir *et al.* (2011) y Tekeli *et al.* (2005) compararon la resolución de un producto compuesto del sensor MODIS (500 m x 500 m) con la de ASTER (30m x 30m), y afirman que MODIS estima la cubierta de nieve con 75 %, 95 % y 99 % de precisión en altitudes inferiores, medias y superiores, respectivamente, cuando se compara con ASTER. En el hemisferio norte la información se obtiene de datos de NOAA creando mapas promedios semanales y mensuales de frecuencia de nieve (Weisnet *et al.*, 1987; Matson, 1991).

La partición de los flujos de agua (entrada y salidas) en los ecosistemas está determinada por las interacciones entre la precipitación, la vegetación y el suelo (Chapin *et al.*, 2002; Knapp *et al.*, 2002; Nicholson, 2011). Cuando la vegetación es reemplazada se alteran las interacciones precipitación-vegetación-suelo y, por ende, la partición de flujos de agua del ecosistema. Esto pone de manifiesto el papel clave que cumple la vegetación al regular las salidas de vapor de agua del sistema (Magliano *et al.*, 2016). Entender las consecuencias del CUCT sobre la dinámica del agua implica entender los cambios en los flujos que determinan el balance hídrico del ecosistema. Estas intervenciones humanas en los ecosistemas implican, por lo tanto, alteraciones en la prestación de sus servicios (Jobbágy *et al.*, 2008) tales como: provisión de agua para los distintos usos (e.g. consumo humano, riego, industria, esparcimiento), provisión de hábitat y regulación de crecientes, de inundaciones y de salinización (MA, 2005; Paruelo *et al.*, 2006; Viglizzo y Frank, 2006; Jobbágy, 2011).

Estudiar los CUCT en ecosistemas áridos y semiáridos resulta sumamente importante debido a su vulnerabilidad en términos de balance de agua (Reynolds *et al.*, 2007). Las regiones

áridas y semiáridas ocupan aproximadamente el 45 % de la superficie continental del planeta (Newman *et al.*, 2006; Schimel, 2010). En el balance hídrico de la mayoría de estas regiones, el 95% de las precipitaciones vuelve a la atmósfera como evapotranspiración (e.g., Schwinning *et al.*, 2004; Tweed *et al.*, 2011; Schlesinger y Jasechko, 2014), mientras que el drenaje puede considerarse prácticamente nulo (Scanlon *et al.*, 2005). Por lo tanto, conocer la dinámica temporal de la ET permite evaluar los efectos de los CUCT sobre la hidrología regional, por ser la ET la componente más importante del balance en estas regiones.

Existen evidencias a escala mundial de los impactos hidrológicos por conversión de estos sistemas naturales a sistemas bajo riego, como el aumento de la ET, la movilización y distribución de sales y nutrientes en el perfil de suelo (Scanlon *et al.*, 2007; Gabriel *et al.*, 2012) y la elevación del nivel freático (Pérez *et al.*, 2011). Zhang *et al.* (2012) evaluaron los efectos del cambio de la cubierta vegetal sobre la escorrentía, la ET y la humedad del suelo en una cuenca de China, y concluyeron que la ET es el componente hidrológico más sensible a dichos cambios. En la cuenca de Lerma en España, Abrahao *et al.* (2011) registraron aumentos en la ET por expansión del regadío. Por otro lado, un estudio realizado en el norte de China muestra que el exceso de riego ha llevado a elevar los niveles freáticos, provocando problemas de salinidad en la región (Xu *et al.*, 2013). Contreras *et al.* (2011), evaluaron el balance de agua en la región del Monte Central en Argentina, donde concluyeron que están siendo extraídos grandes volúmenes de agua de los ríos andinos para alimentar a los sistemas bajo riego, contribuyendo con el 62 % de la ET. El enfoque utilizado en dicho trabajo asume que la evapotranspiración media anual (ETMA) en los sistemas áridos y semiáridos se puede escalar de forma lineal con la anomalía de un índice de vegetación espectral (IV). Estos autores encontraron errores de 2-15 % a escala de parcela, y 18 % a escala de cuenca, error comúnmente obtenido por otros autores para enfoques con sensores remotos (Glenn *et al.*, 2008; Kalma *et al.*, 2008).

## OBJETIVOS

El **objetivo general** del presente capítulo fue caracterizar la cuenca del río Colorado en términos hidrológicos, mediante los siguientes **objetivos específicos**:

- *A) Caracterizar ambiental y productivamente la cuenca.*
  - A1) Realizar un análisis geoespacial de las características morfométricas de la cuenca alta del río Colorado.
  - A2) Describir y cuantificar cambios en los usos y coberturas de la tierra mediante información satelital.
  
- *B) Evaluar las entradas de agua en la cuenca.*
  - B1) Estimar el área cubierta por nieve en la cuenca alta del río Colorado, mediante información satelital.
  - B2) Analizar las variaciones espaciales y temporales de la precipitación en la cuenca, a partir de información de estaciones meteorológicas.
  - B3) Analizar el caudal y la calidad del agua, a lo largo de la cuenca, a partir de información de estaciones de aforo.

- C) *Evaluar las principales salidas de agua en la cuenca.*

C1) Cuantificar el patrón espacial de la ET media anual en la cuenca media y baja del río Colorado a partir de sensores remotos.

C2) Calcular la infiltración del curso de agua y evaporación del embalse en la cuenca media.

## 2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.2.1. Área de estudio

En esta sección de la Tesis se trabajó a dos áreas de la cuenca. En primer lugar, en las subcuencas del Grande y del Barrancas, que se corresponden con la cuenca activa del río Colorado y luego, toda la cuenca del río Colorado (Figura 1.1) donde se analizaron las características hidrológicas de ésta, en las distintas estaciones de medición.

El río Colorado se origina en la confluencia de los principales afluentes, los ríos Grande y Barrancas, y recorre alrededor de 1200 km atravesando parte de las provincias de Mendoza, Neuquén, Río Negro, La Pampa y Buenos Aires. Tiene un derrame anual promedio de 4380 hm<sup>3</sup> y la superficie total de su cuenca es de 47.459 km<sup>2</sup>. Su caudal medio anual es de 138,8 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (COIRCO, 2015), presentando una marcada estacionalidad primavero-estival, atribuida a su régimen nival. El río Colorado adquiere la tonalidad que le da nombre, a partir de los sedimentos que provienen de secuencias clásticas (areniscas, pelitas y conglomerados). Estas unidades sedimentarias están intensamente afectadas por el proceso de erosión fluvial, por cursos estacionales, tributarios locales del río, al cual llegan en general mediante extensos conos aluviales. Esta condición se mantiene hasta el embalse de Casa de Piedra, donde la carga clástica transportada se deposita. El río Colorado es uno de los cauces argentinos con mayor cantidad de arrastre promedio, pues llega comúnmente hasta 2 kg.(m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>. El material transportado llega hasta 2 micrones de diámetro e incluye material coloidal, constituido principalmente por sedimentos piroclásticos del tipo lapilli y cenizas volcánicas (Luque, 1967).

La subcuenca del río Grande está situada en la provincia de Mendoza, iniciándose en el macizo central de Los Andes, en el límite con Chile, con sus principales tributarios los ríos Cobre y Tordillo. Tiene alimentación casi exclusivamente nival. Su caudal medio anual es de 111 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (COIRCO, 2013). Por su parte, el río Grande se ubica como límite interprovincial entre Mendoza y Neuquén, el cual nace en la cordillera de Los Andes a los 36°05' de latitud Sur a partir de las lagunas Negra y Fea en el límite con Chile. La alimentación del río Barrancas es de transición, entre las hoyas nivales al norte y pluvio-nivales al sur. Su caudal medio anual se calcula en 36,6 m<sup>3</sup>/s, variando entre un mínimo diario de 12 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en períodos de estiaje y llegando próximo a los 134,3 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en épocas de fuerte deshielo (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública, 2013). En estas dos subcuencas se genera la mayor proporción del recurso hídrico que en parte escurre superficialmente por el río Colorado y en parte se infiltra en las zonas de recarga alimentando el acuífero regional.

En la cuenca alta, en la zona cordillerana el clima es frío, con una temperatura media anual que no supera los 10°C y las precipitaciones fluctúan entre los 600 y 1000 mm (en promedio) concentradas en la época invernal y en forma de nieve. En esta zona dominan,

especialmente hacia el oeste, los paisajes irregulares compuestos por valles profundos, elevados cordones montañosos sobre los que se imponen volcanes y, de manera subordinada hacia el oriente, serranías más bajas en las cuales se observa un severo control estructural en el diseño de los sistemas fluviales y las formas del relieve (Halcrow, 2013).

## 2.2.2. Metodología

### A) Caracterización ambiental y productiva

#### A1) Caracterización morfométrica

El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica se realiza a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje. Estos parámetros son indicadores destinados a determinar la influencia de la forma de la cuenca en el movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari *et al.*, 2010). Las formas del terreno pueden ser descritas y cuantificadas por la parametrización del relieve a partir de un modelo digital de elevación (MDE) (Bologaro-Crevenna *et al.*, 2005), conformando este último una variable de entrada para la construcción de diversos modelos digitales de terreno (Martinez-Zavala *et al.*, 2005).

La información acerca de la elevación del terreno fue obtenida de datos digitales de altura sobre el nivel del mar registrados por el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) del año 2000 de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Las imágenes SRTM fueron obtenidas de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (<http://srtm.usgs.gov/index.php>), las cuales poseen una resolución espacial de 90 metros, radiométrica de 16 bit y en altura entre 6 y 16 metros y formato geotiff (Farr *et al.*, 2007). El SRTM permitió la construcción de un modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca alta del río Colorado. Este modelo no muestra la altura del suelo desnudo, sino más bien la altura de la superficie visible (edificios o vegetación). Entonces en esta área donde predomina la vegetación baja, la exactitud del modelo es mayor.

A partir del MDE en cada subcuenca se trazó un perfil longitudinal, siguiendo un eje desde la cabecera hasta la desembocadura de cada una de las subcuencas, y perfiles transversales representativos de los relieves, los cuales proporcionaron información para definir la dirección general del escurrimiento superficial. El planteo de un perfil permitió representar un corte topográfico, expresado por una línea de intersección del relieve con un plano vertical en una dirección determinada, cortando la superficie terrestre de manera perpendicular, indicando los ascensos y descensos del terreno a lo largo de dicha línea. Esta herramienta es uno de los recursos más utilizados como complemento del mapa topográfico, por su fácil construcción e interpretación, siendo útil por la expresión vertical con respecto a la dimensión espacio/altitud (tres dimensiones) de las irregularidades de la superficie. Para cada subcuenca se esquematizaron un perfil longitudinal y tres perfiles transversales, uno en cabecera, uno en la parte media y uno en la desembocadura.

Los parámetros morfométricos calculados para cada subcuenca fueron:

1.1 *Parámetros de forma:* se calculó el perímetro (P), expresado en km, que constituye la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, esto es por la divisoria de aguas; el área

de drenaje (A), definida como la superficie encerrada por la divisoria de aguas, en km<sup>2</sup>; el ancho promedio (Ap), determinado por la relación entre la superficie de la cuenca y su longitud axial expresado en km; la longitud axial (La), que es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca (km) (Morisawa, 1959; Henaos, 1988) y el coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc), que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente a la cuenca ( $Kc = P / 2 \sqrt{\pi A}$ ) (adimensional) (Gravelius, 1914; Campos, 1992). A partir de Ap y La se calculó el factor de forma (IF) (adimensional) que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial y manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas (Jardí, 1985; Henaos, 1988).

1.2 *Parámetros de relieve:* para cuantificar el efecto del relieve se determinó la altura media (AM), que expresa la altura definida por el volumen de la cuenca en relación a la superficie de la misma (en metros) y se calculó la pendiente media (PM) mediante la ecuación de  $PM = (H_{max} - H_{min}) / La$  siendo Hmax la altura máxima y Hmin la altura mínima para cada una de las subcuencas bajo estudio (Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998). El análisis se completó con la determinación de clases para la altura, pendiente, y orientación del terreno, generando una clasificación de cuatro clases, con intervalos iguales para cada uno de los parámetros analizados. La pendiente tiene un efecto importante en la velocidad del flujo superficial en las subcuencas bajo estudio, debido a la alta topografía y escasa vegetación. Zonas con altas pendientes hace que la velocidad de flujo sea alta, por lo tanto, se necesita menos tiempo de escurrimiento para llegar al cauce principal. Conocer y entender la orientación de las laderas es importante porque se relaciona con las horas en las que incide el sol sobre la ladera de la cuenca, con la dirección de los vientos predominantes, y con los flujos de humedad, entre otros. Las laderas de orientación norte presentan suelos con menor contenido de humedad y menor cobertura vegetal que las laderas de exposición sur.

Se obtuvieron las curvas hipsométricas (CH) para cada una de las subcuencas. Las mismas representan el área relativa en cada altura (metros sobre el nivel del mar, m.s.n.m.) de cada subcuenca (Langbein *et al.*, 1947; Gaspari *et al.*, 2009). Cada una de ellas fue realizada a través de información extraída del histograma de frecuencias de altimetría del MDE. Además, se generó un histograma de altimetría que representa el área acumulada por piso altitudinal para ambas subcuencas. Para ello se crearon 39 clases de altura, desde 800 m.s.n.m. a 4700 m.s.n.m. para la subcuenca del Barrancas y 41 clases de altura para la subcuenca del Grande desde 800 a 4900 m.s.n.m., y se calculó el área entre dichas clases.

1.3 *Parámetros de drenaje:* se determinó el número de orden de los cursos mediante el método Strahler, el cual asigna el orden 1 a un curso que carece de tributarios, uno de orden 2 es formado por la confluencia de dos cursos de orden 1 y uno de orden 3 es formado por la confluencia de dos de orden 2. El orden de una cuenca de drenaje está dado por el curso de orden mayor. El número de orden de los cursos de agua o jerarquización, está estrechamente relacionado con el número de ramificaciones de la red de drenaje (Strahler, 1964).

Para cada subcuenca se calculó la densidad de drenaje (Dd) expresada en km.km<sup>-2</sup>, definida como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca con respecto al área de la misma ( $Dd = Ln / A$ ), siendo Ln la longitud de todos los cauces expresada en km (Horton, 1932). Se calculó también, la longitud del curso principal (L) en km; desnivel de cauce (DH) expresado en metros, y la pendiente media del cauce (J), como el

cociente entre  $DH/L$ , la cual relaciona el desnivel con la longitud de su cauce principal, expresada en porcentaje (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari, 2002). Además, se estimó el tiempo de concentración ( $T_c$ ) que expresa el tiempo (horas) que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la desembocadura (Chow *et al.*, 1994; Gaspari *et al.*, 2009). En este caso, se utilizó la fórmula definida por la Dirección General de Carreteras de España para calcular el  $T_c$  de la siguiente manera:  $T_c = 0,3 (L / J^{1/4})^{0,76}$ .

Para el análisis de las características morfométricas de la cuenca alta del río Colorado, se establecieron y analizaron parámetros de forma, de relieve y los relativos a la red de drenaje, con apoyo del software Global Mapper 18©, SAGA 2.1.2 (*System for Automated Geoscientific Analyses*) y planillas de cálculo.

## **A2) Usos y coberturas del suelo**

Se utilizaron dos imágenes del Satélite Landsat (ETM+) correspondientes a la fecha 16/12/1999 y dos imágenes de Landsat 8 correspondientes al 18/12/2015. Ambas imágenes corresponden a los path y row 230 y 231/86. Para cada año, las imágenes fueron georreferenciadas y pre-procesadas (calibración, recorte) y se confeccionó un mosaico. A partir de los datos multiespectrales se generaron composiciones en pantalla de bandas espectrales RGB (*Red, Green, Blue*) adecuadas para resaltar y observar con mayor contraste los objetos de la superficie terrestre. Se realizaron clasificaciones supervisadas y no supervisadas para todo el mosaico, aunque no se llegó a obtener una correcta clasificación de toda el área ya que un tipo de formación rocosa de la cuenca alta, no se diferenciaba espectralmente del suelo desnudo (locaciones petroleras), caminos y cañadones, sobreestimando este tipo de cobertura.

Por este motivo, mediante el análisis visual de imágenes satelitales y a partir de conocimiento propio de la región y de la colaboración de técnicos de la zona, se identificaron los usos y cobertura en el área bajo estudio. De esta forma, fue necesario realizar la delimitación de polígonos de las áreas según su uso de forma manual, a partir de cinco clases: actividad petrolera (locaciones, caminos, baterías), área bajo riego, centros poblados, cuerpos de agua (lago) y vegetación natural. Se calculó la superficie de estas clases en cada una de las escenas, y las diferencias en superficie de ocupación y distribución espacial.

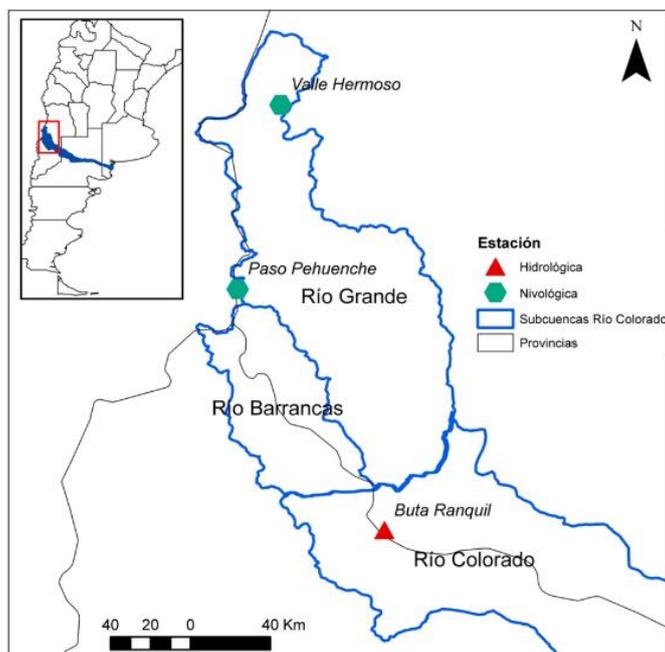
## **B) Entradas de agua**

### **B1) NIEVE**

#### **B1.1) Medición de equivalente de agua en nieve (EAN) en estaciones nivométricas**

La principal variable de interés directamente relacionada con el escurrimiento del río Colorado es la acumulación de nieve en la cuenca alta, en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, cuyo derretimiento es la principal contribución a los volúmenes anuales del río Colorado. Existen tres estaciones nivológicas (Figura 2.2): dos en Valle Hermoso, una dependiente del Departamento General de Irrigación y otra de la Subsecretaría de Recursos

Hídricos de Nación y la tercera ubicada en Paso Pehuenche. El EAN (mm) diario es la variable con mayor cantidad de registros en el tiempo en dichas estaciones. Los datos se obtuvieron desde la página de COIRCO (<http://www.coirco.gov.ar/>). Se analizaron los datos mensuales de la serie de años 2000 a 2015 de dichas estaciones, y se realizó un análisis estadístico estándar mediante el programa Infostat.



**Figura 2.2.** Ubicación de las estaciones nivológicas e hidrológicas de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.

### **B1.2) Estimación de área cubierta por nieve (ACN) mediante estimación satelital**

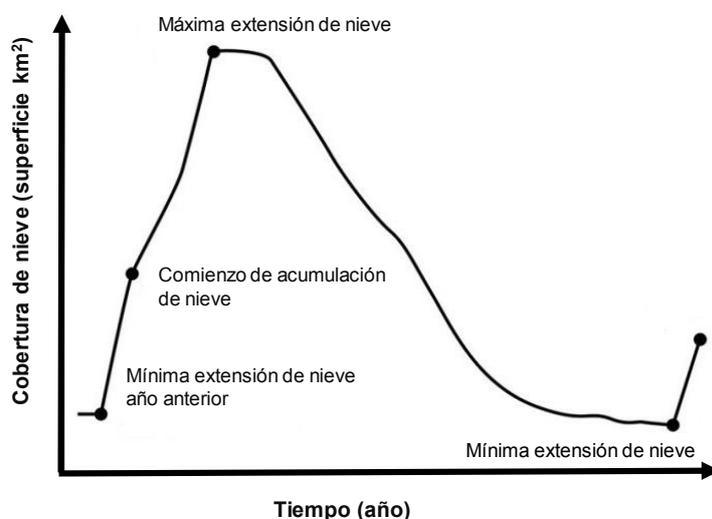
Se estimó la cobertura de nieve para las subcuencas del Grande y del Barrancas, mediante el producto MOD10A2 (Hall *et al.*, 2001) derivado de imágenes satelitales MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, <http://reverb.echo.nasa.gov>). Los sensores MODIS a bordo de los satélites Aqua y Terra son prácticamente idénticos con una alta sensibilidad radiométrica (12 bits) en 36 bandas espectrales y un rango de longitud de onda que va de los 0,4  $\mu\text{m}$  a los 14,4  $\mu\text{m}$  (Qu *et al.*, 2006). Cuentan además con una buena calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre (error cuadrático medio inferior a 50 m) (Riggs y Hall, 2011; Mas, 2011), y una resolución temporal que permite observar cualquier parte de la Tierra diariamente (Seidel y Martinec, 2004).

Se utilizó la banda 2 “Maximum\_Snow\_Extent”, la cual muestra la extensión máxima de la cubierta de nieve en un compuesto de 8 días, con una resolución espacial de 500 metros (Hall *et al.*, 2001; 2006). El valor de píxel indica de manera cualitativa la presencia o ausencia de nieve, con los posibles valores 0 nada, 25 dudoso, 50 nube y 200 nieve. La presencia de nieve en un píxel es registrada cuando se detecta en al menos uno de los 8 días. Se trata, por lo tanto, de una aproximación que maximiza la presencia de nieve. No se consideraron píxeles con valor correspondiente a nube ya que se estimó la cantidad de píxeles con nubes en cada fecha y se

obtuvo sólo en 13 fechas en toda la serie analizada, un porcentaje igual o superior al 20 % de píxeles con nube en toda la escena. Esto representa el 2,8 % de las imágenes analizadas.

Se utilizó la escena h12v12 correspondiente a la serie de años 2000 a 2015 que abarca un área de 1200 x 1200 km, con 46 imágenes por año, que totalizan 730 imágenes en toda la serie. Del total de la escena se extrajo únicamente el área perteneciente a la cuenca alta del río Colorado, obteniendo un total de 54.367 píxeles por cada escena. A partir de esta información, se realizó la estimación de la superficie cubierta por nieve para cada una de las fechas disponibles. Luego se calculó la cobertura promedio de cada mes y se analizó la dinámica temporal de cada año. Además, se calculó y analizó la superficie cubierta por nieve para cada uno de las fechas durante los 16 años de análisis, y se calculó el promedio mensual, máximos, mínimos y sus variaciones para cada año.

Por otra parte, se analizaron los patrones de dinámica de la superficie cubierta por nieve y se estudiaron los atributos de la acumulación de nieve (fechas promedio y más frecuentes de comienzo y final de las nevadas, mínimo, máximo, rango relativo, acumulado anual) y fusión (Figura 2.3).



**Figura 2.3.** Modelo del ciclo anual de la nieve.

Además, se realizó un análisis para poder conocer la permanencia de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado. Para ello, se observó el comportamiento del EAN en las tres estaciones nivológicas que se localizan en la cuenca alta (Figura 2.2), y se seleccionó el período anual de otoño-invierno-primaveral comprendido entre el 23 de abril y el 17 de noviembre de cada año desde 2003 a 2015, debido a que es el momento en el que ocurren las nevadas en la zona. A este período anual seleccionado le corresponden 27 fechas (imágenes) por año, conformado un total de 432 imágenes en la serie analizada.

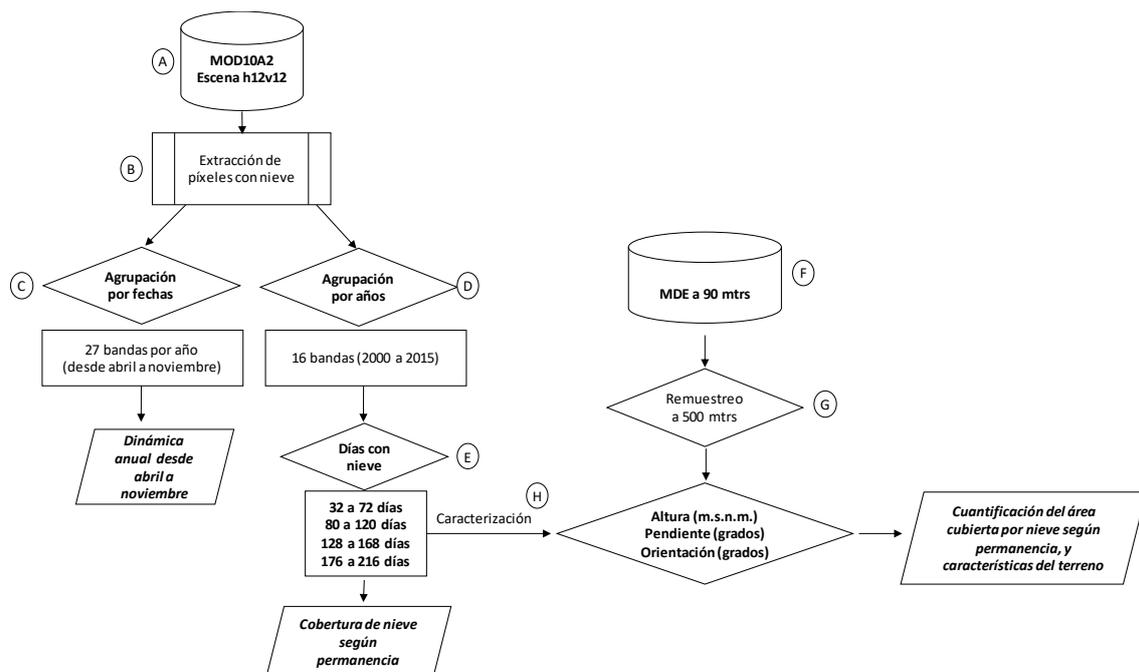
Para conocer la distribución espacial de la cobertura de nieve según rangos de altitud, pendiente y orientación se combinó el producto obtenido de cobertura de nieve y los derivados del MDE. En primer lugar, se generó una imagen anual resultante de la agrupación de las 27 imágenes de MOD10A2 de cada año. Para conocer la fecha de ocurrencia de nieve se clasificaron los píxeles con nieve según su fecha de ocurrencia. Solo se extrajeron los píxeles que registraron nieve (valor 200) (Figura 2.4 B). Para identificar la marcha anual de la cobertura de nieve se

agruparon las imágenes por años para obtener un archivo con las diferentes fechas (Figura 2.4 C), generando en total 16 archivos que representan los 16 años bajo análisis (Figura 2.4 D) y de 27 bandas cada uno según fechas julianas. Por último, para cada año se agruparon los píxeles de acuerdo con el tiempo que estaban cubiertos por nieve (días con nieve), donde cada una de las clases corresponden a: 32 a 72 días, 80 a 120 días, 128 a 168 días y 176 a 216 días (Figura 2.4 E). Posteriormente, se calculó el área de cada clase por subcuenca y por año a partir de la cantidad de píxeles.

### B1.3) Relación entre la morfometría y la cobertura de nieve estimada

A partir de la cobertura de nieve obtenida por clases para cada año y con la información derivada del MDE se determinó en cada pixel la frecuencia de ocurrencia y las características del terreno (elevación, orientación y pendiente) (Figura 2.4 H). Las diferencias de medias se comprobaron por medio de análisis de la varianza (ANOVA) para la comparación de las clases, con test de comparación de medias convencionales (Test de Fisher, Infostat®).

Debido a que las imágenes satelitales utilizadas para determinar la cobertura de nieve, tienen una resolución de 500 m y el MDE de 90 m, el MDE fue transformado utilizando el método de vecino más cercano. Luego, para simplificar el análisis, se clasificaron los resultados de cada variable derivada (altura, pendiente y orientación) en cuatro clases. Para altura (m.s.n.m.) en clases cada 500 metros (500-1500/ 1501-2500/ 2501-3500/ >3500), para pendiente (grados) cada 15° (0-15/ 16-30/ 31 -45/>45) y para orientación (grados) cada 90° (0-90 orientación NE/91-180 orientación SE/181-270 orientación SO /271-360 orientación NO).



**Figura 2.4.** Diagrama de la metodología utilizada para obtener información de cobertura nival a partir del producto MOD10A2.

*Ref: La información de entrada está representada en discos, las decisiones en rombos, los condicionantes en rectángulos y las series de datos generadas en paralelogramos. Las letras indican los pasos que se siguieron en la metodología que se describe en el texto.*

## B2) PRECIPITACIÓN

Se recopiló la serie histórica de precipitación de estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca (Tabla 2.1), a cargo de COIRCO, de Departamentos provinciales de agua (Río Negro, La Pampa, Buenos Aires) y de Estaciones Experimentales de INTA.

**Tabla 2.1.** Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Colorado: nombre, ubicación y período analizado.

Región de estudio	Nombre de la estación y provincia	Ubicación (Long/Lat)	Período
CUENCA ALTA	Los Mayines, Neuquén	-70.201111; -35.656056	1987-2015
	Arroyo La Vaina, Mendoza	-69,866667; -35,916667	1987-2015
	Bardas Blancas, Mendoza	-69,800000; -35,850000	1987-2015
	Buta Ranquil, Neuquén	-69,733333; -37,066667	1959-2015
CUENCA MEDIA ALTA	25 De Mayo, La Pampa	-68,100000; -38,433333	1982-2015
	Casa De Piedra, La Pampa	-67,216667; -38,250000	1982-2015
	Gobernador Duval, La Pampa	-66,433333; -38,733333	1982-2015
CUENCA MEDIA BAJA	La Adela, La Pampa	-64,081537; -38,977389	1960-2015
	Pichi Mahuida, La Pampa	-64,966667; -38,816667	1960-2015
CUENCA BAJA	Hilario Ascasubi, Buenos Aires	-62,627428; -39,391578	1966-2015

Se realizó análisis estadístico descriptivo (Infostat) a las precipitaciones mensuales y anuales de cada estación, obteniendo los parámetros de máximo, mínimo, y desvío estándar. Se agruparon las estaciones meteorológicas según la proximidad geográfica y ubicación de las mismas en cuenca alta, cuenca media (alta y baja) y cuenca baja, para realizar el análisis.

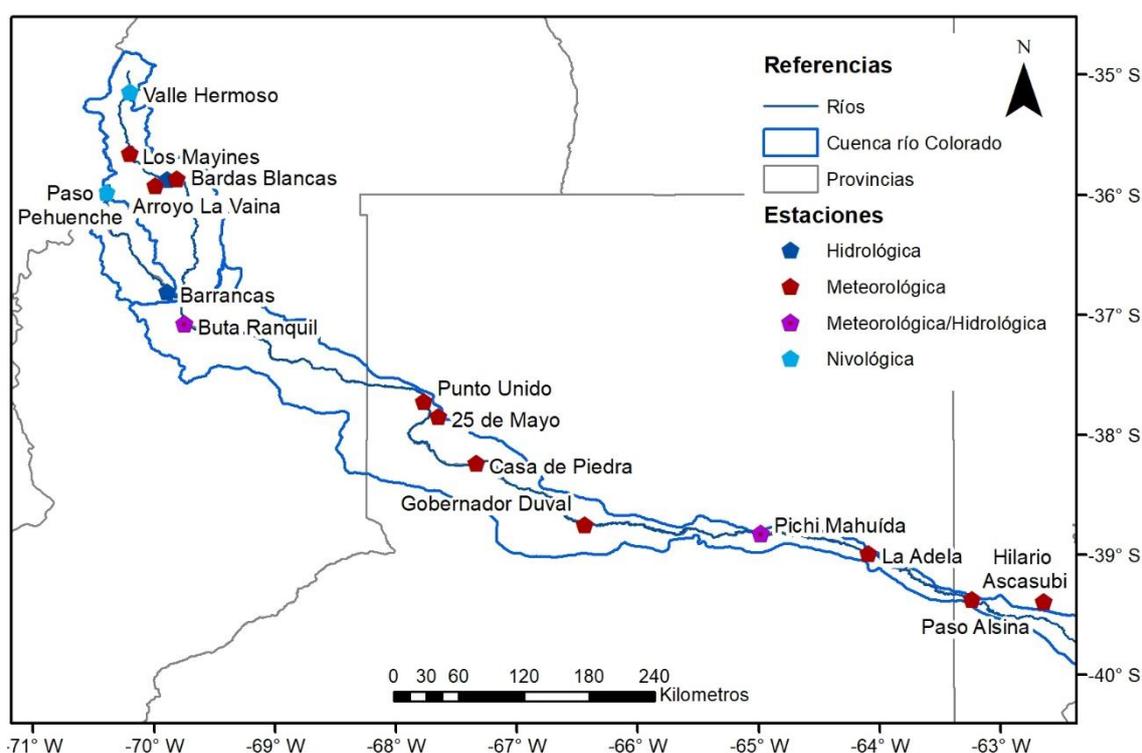
## B3) CAUDAL

Se recopilaron registros de caudal de estaciones de aforo de la cuenca (Tabla 2.2), de la Base de Datos Hidrológica Integrada (<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/>) a cargo de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación y del COIRCO (<http://www.coirco.gov.ar/>). Se realizó análisis estadístico descriptivo mediante Infostat a los caudales mensuales y anuales de cada estación, obteniendo los parámetros de máximo, mínimo, y desvío estándar.

**Tabla 2.2.** Estaciones hidrológicas de la cuenca del río Colorado: nombre, ubicación y período analizado.

Región de estudio	Nombre de la estación (río) y provincia	Ubicación (Long/Lat)	Período
CUENCA ALTA	Barrancas (Barrancas), Neuquén	-69.893159; -36,806879	1976-2015
	La Gotera (Grande), Neuquén	-69.883455; -35.870278	1976-2015
	Buta Ranquil (Colorado), Neuquén	-69,733333; -37,066667	1976-2015
CUENCA BAJA	Pichi Mahuida (Colorado), La Pampa	-64,966667; -38,816667	1940-2015

En la Figura 2.5 se detallan las estaciones meteorológicas, hidrológicas y nivológicas de la cuenca analizadas en esta investigación y que se han detallado en las Tablas 2.1 y 2.2.



**Figura 2.5.** Ubicación de las estaciones hidrológicas (azul), meteorológicas (bordo), meteorológicas e hidrológicas (azul con punto rojo) y nivológicas (celeste) de la cuenca del río Colorado.

### B3.1) Relación entre la cobertura de nieve estimada y el derrame del río Colorado

A partir de la cantidad de píxeles de cada una de las clases de permanencia de nieve, se calculó el área de dichas clases y se correlacionó con el derrame anual del río Colorado en la estación Buta Ranquil, para el período 2000-2015. Por otro lado, se calculó el área media mensual cubierta de nieve y se correlacionó con el caudal medio mensual de la estación Buta Ranquil (<http://www.coirco.gov.ar/>), desde enero de 2000 a diciembre de 2015.

Además, se correlacionó la cobertura de nieve estimada para cada subcuenca (Grande y Barrancas) con los caudales medios mensuales de los ríos Barrancas (estación Barrancas) y río Grande (La Gotera), respectivamente (Figura 2.5).

### B3.2) Calidad de agua para riego

Se analizaron los registros de la serie histórica de datos de caudal promedio mensual y conductividad eléctrica promedio mensual, de dos estaciones de aforo de la cuenca del río Colorado. Una de ellas ubicada en cuenca media, denominada Punto Unido ( $37^{\circ}43'20.64''$  S  $62^{\circ}40'59.28''$  O) en la provincia de La Pampa (Figura 2.5) y corresponde al ingreso del área bajo riego Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado en Colonia 25 de Mayo, y en la cuenca baja, Paso Alsina ( $39^{\circ}22'0.71''$  S,  $62^{\circ}40'59.28''$  O), provincia de Buenos Aires (Figura 3), en los periodos de 1965-2015 y 1982-2015 respectivamente.

Los datos de Punto Unido (PU) fueron extraídos del Estudio de Salinidad de las Aguas del río Colorado (Richter, 2010) y se completó la serie mediante registros de la AER de INTA 25 de Mayo (La Pampa). En Paso Alsina los datos fueron provistos por la Corporación de Fomento del Valle Bonaerense del río Colorado (CORFO Río Colorado).

## C) Salidas de agua

### C1) EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para cuantificar las salidas de agua de la cuenca se estimó la evapotranspiración media anual para el período 2000 a 2013. La metodología de estimación está basada en la hipótesis del equilibrio hidrológico (Specht, 1972; Eagleson, 1982; Hatton *et al.*, 1997; Rodríguez Iturbe y Porporato, 2005). La misma supone que el estado productivo de la vegetación, potencialmente cuantificado a través de un índice de vegetación espectral (IV), está en equilibrio con la precipitación local en aquellos sitios no degradados y que no reciben aportes de agua extra procedentes de la escorrentía superficial o del nivel freático. Por lo que se asume que la evapotranspiración media anual (ETMA) en los sistemas áridos y semiáridos se puede escalar de forma lineal con la anomalía del IV. La anomalía es calculada como la diferencia entre el valor observado por el satélite -IVobs- y el esperado si la precipitación local fuera la única fuente de agua para el desarrollo de la vegetación -IVpma-(Figura 2.6).

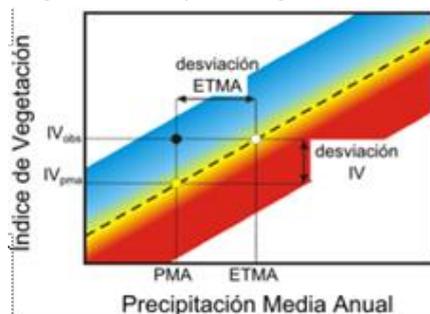
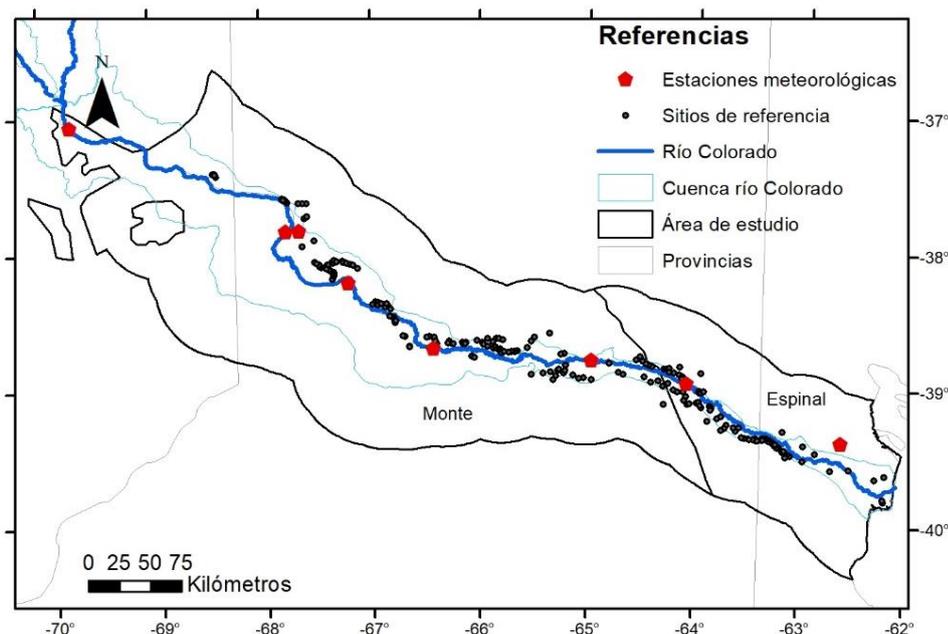


Figura 2.6. Modelo conceptual de estimación de la ETMA. Fuente: Contreras *et al.*, 2011.

El estudio se delimitó a las provincias del Monte y del Espinal de la cuenca del río Colorado (Figura 2.7), y se consideró el período de estudio de enero de 2000 a 2013.



**Figura 2.7.** Área de estudio para el cálculo de evapotranspiración media anual (ETMA) y sitios de referencia seleccionados, en las provincias del Monte y Espinal de la cuenca media y baja.

Información de base:

Se utilizó información del producto 3B43 de TRMM versión 7 del período 2000-2013 (<http://mirador.gsfc.nasa.gov>). El producto provee un valor promedio mensual de los mm precipitados por hora. El valor del píxel, se multiplicó por 24 horas/día \* 30.4 días/mes. Se calculó el promedio para cada mes, desde 2000 a 2013 y a partir de la sumatoria de los mismos se obtuvo el valor de precipitación media anual (PMA) en mm/año. Los valores calculados se compararon con los obtenidos por las estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de toda la cuenca (Figura 2.5). Se calculó la precipitación media anual a partir del promedio de la sumatoria de la precipitación media de los meses de cada año, de manera de evaluar la precisión de la estimación del radar TRMM. Se remuestreó el producto de TRMM a 250 m para poder superponerlo con el producto de MODIS.

La información referente al estado de la vegetación se cuantificó a partir del índice de vegetación mejorado EVI (*Enhanced Vegetation Index*) (Gao *et al.*, 2000; Huete *et al.*, 2002, Didan, 2015) provisto por el producto MOD13Q1, con una resolución espacial de 250 m y temporal de 16 días (Solano *et al.*, 2010) para el período octubre de 2000 a septiembre de 2012. Se consideró el píxel con valor de confiabilidad (0 ó 1), dejando fuera del análisis a aquellos de baja confiabilidad. Luego se calculó el EVI de cada año, como promedio de los 23 compuestos anuales, a partir del mismo se calculó el promedio interanual de EVI. La anomalía del EVI se calculó como la diferencia entre el valor derivado del satélite y el esperado si la precipitación local fuera la única fuente de agua para el desarrollo de la vegetación (IVpma).

Calibración del modelo:

Para la calibración del modelo se seleccionaron sitios de referencia en las provincias fitogeográficas del Monte y del Espinal, mediante Google Earth y con la colaboración de técnicos locales que brindaron el conocimiento del terreno. Estos sitios se chequearon con recorridas a campo. Los sitios de referencia se caracterizan por su bajo estado de degradación y por presentar vegetación zonal en supuesto equilibrio con la precipitación local. La selección debió excluir, en la medida de lo posible, sitios degradados o con vegetación azonal con accesibilidad a aguas subterráneas. Se extrajeron los valores de EVI anual y PMA de TRMM de los 228 sitios de referencia (Figura 2.8).

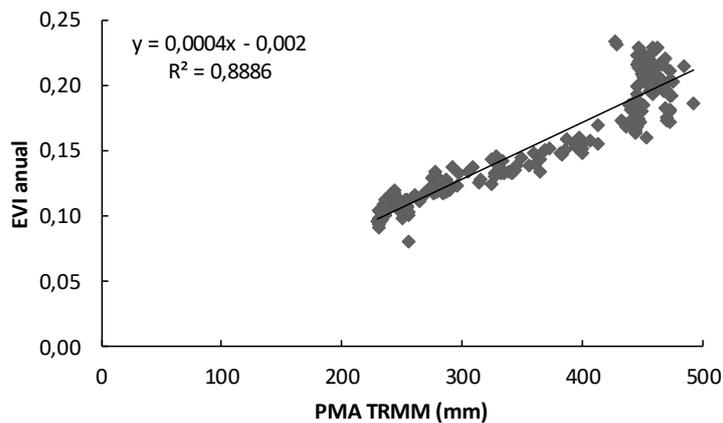
Para la estimación de  $IV_{pma}$  se calibró una relación entre la precipitación anual media (PMA) del período derivada del sensor satelital TRMM y el promedio EVI observado en los 228 sitios de referencia seleccionados (Figura 2.8).

A partir de esa relación se calculó el EVI promedio anual como (Ecuación 2.1):

$$EVI_{map} = 0,0004MAP - 0,002 \quad (2.1)$$

La anomalía del EVI es calculada considerando que  $EVI_{anom} = EVI - EVI_{map}$ , por lo que la ETMA estimada (Ecuación 2.2) sería:

$$ET = (EVI_{anom} - 0,002) / 0,0004 \quad (2.2)$$



**Figura 2.8.** Relación entre el índice de vegetación mejorado (EVI) y la precipitación media anual derivada del sensor satelital TRMM (PMA TRMM) para los 228 sitios de referencia de la cuenca del río Colorado.

## C2) EVAPORACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

Durante el verano, los cursos y cuerpos de agua de la cuenca están expuestos a una atmósfera con altas temperaturas, bajo contenido de vapor de agua, intensos vientos y altos niveles de radiación solar; factores que potencian las pérdidas de agua por evaporación. Actualmente, la cuenca tiene un solo embalse ubicado en su porción media, en Casa de Piedra, provincia de La Pampa (Figura 2.5). La presa de cierre genera un embalse de 36.000 ha a nivel

máximo normal de operación (283 m.s.n.m.), cota que permite un almacenamiento de 3.556 hm<sup>3</sup> de agua (Díaz, 2013).

A los efectos del balance hídrico es necesario conocer la cantidad de agua que anualmente se evapora del lago de Casa de Piedra. Para ello se necesita saber cómo cambia el nivel de la superficie del lago a lo largo del año, y a partir de ello calcular la superficie del lago expuesta a la evaporación. Según sean los aportes de agua del río Colorado al embalse y las demandas aguas abajo del mismo la cota del lago fluctúa entre la denominada cota máxima normal (283 m.s.n.m.) y la cota mínima normal (275 m.s.n.m.).

La evaporación del cuerpo de agua (E) queda determinada por la siguiente ecuación 2.3. (2.3)

$$E = P + I - O \pm \Delta S$$

P= precipitación.

I= caudal de entrada.

O= caudal de salida.

$\Delta S$ = variación en el almacenamiento.

Se utilizaron datos de la estación meteorológica de Casa de Piedra, desde 2000 a 2015 (Figura 2.5) y la información de caudal erogado y altura se obtuvo de la base de datos de COIRCO (<http://www.coirco.gov.ar/>).

### **C3) PÉRDIDAS DE AGUA POR INFILTRACIÓN, EVAPORACIÓN DEL CURSO DE AGUA Y/O APROVECHAMIENTOS (URBANO, RIEGO, MINERÍA, HIDROCARBUROS)**

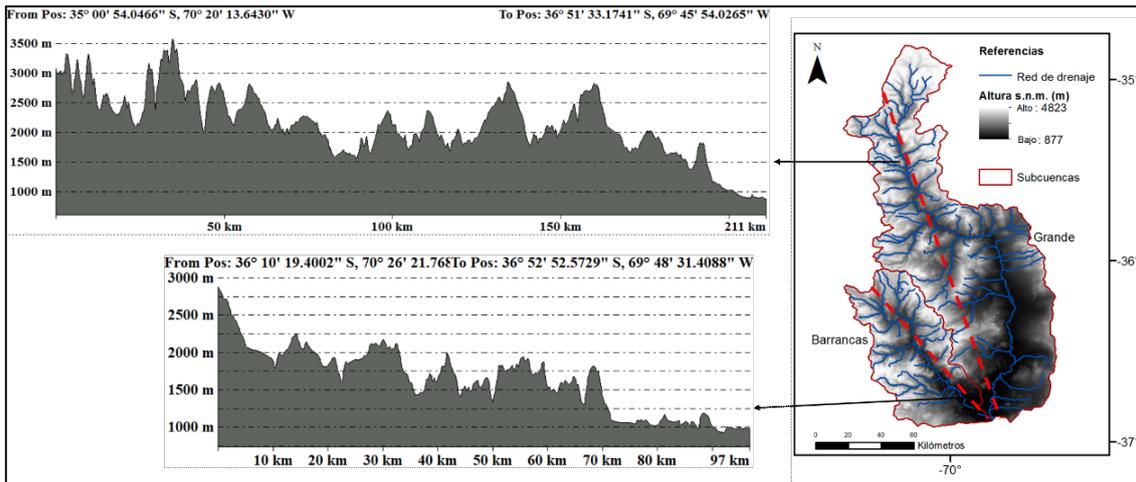
El agua que se evapora más la que se infiltra y percola profundamente en el cauce del río Colorado constituye una merma en la disponibilidad del recurso y debe ser contabilizada en la ecuación de balance del agua superficial del río. El método más sencillo para medir la tasa de pérdidas por evaporación más infiltración (combinada) entre dos estaciones de aforo es a partir de la diferencia en las mediciones de caudal. Para ello, se dispone de registros de caudal diario del río Colorado en las estaciones Buta Ranquil (Neuquén) y Pichi Mahuida (La Pampa), no afectados por regulación ni derivaciones significativas (condición casi natural).

## **2.3. RESULTADOS**

### **2.3. A1) Caracterización morfométrica**

La subcuenca del río Grande presenta una diferencia de altura de 2190 m.s.n.m. entre su nacimiento y desembocadura en una distancia de 222 km, con orientación predominante nort-sur (Figura 2.9). En la cabecera y parte media de la subcuenca, la altura está por encima de los 1500 m.s.n.m., con máximo de 2984,5 m.s.n.m., siendo una zona montañosa con fuertes pendientes. En cambio, en la porción del curso inferior, la altura disminuye por debajo de los 1000 m.s.n.m., especialmente en los últimos 15 km (Figura 2.9), llegando a un mínimo de 909,97 m.s.n.m.

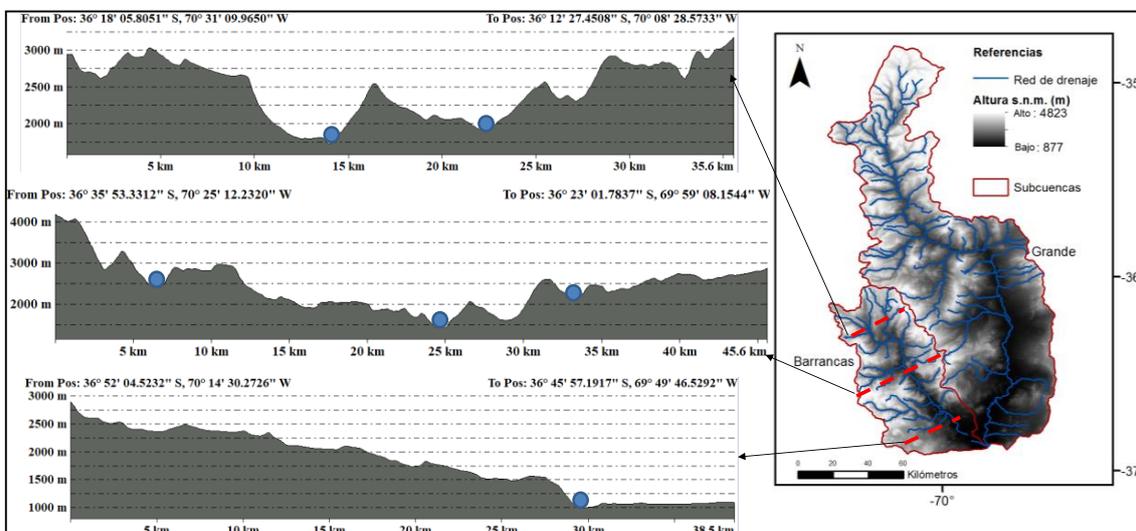
Por su parte, la subcuenca del río Barrancas presenta una diferencia de altura entre la naciente y su desembocadura de 1808 m.s.n.m. en 96 km (Figura 2.9). En el último tramo aproximadamente 25 km antes de su desembocadura, la pendiente es menor, con alturas por debajo de los 1250 m.s.n.m., con un mínimo de 924 m.s.n.m.

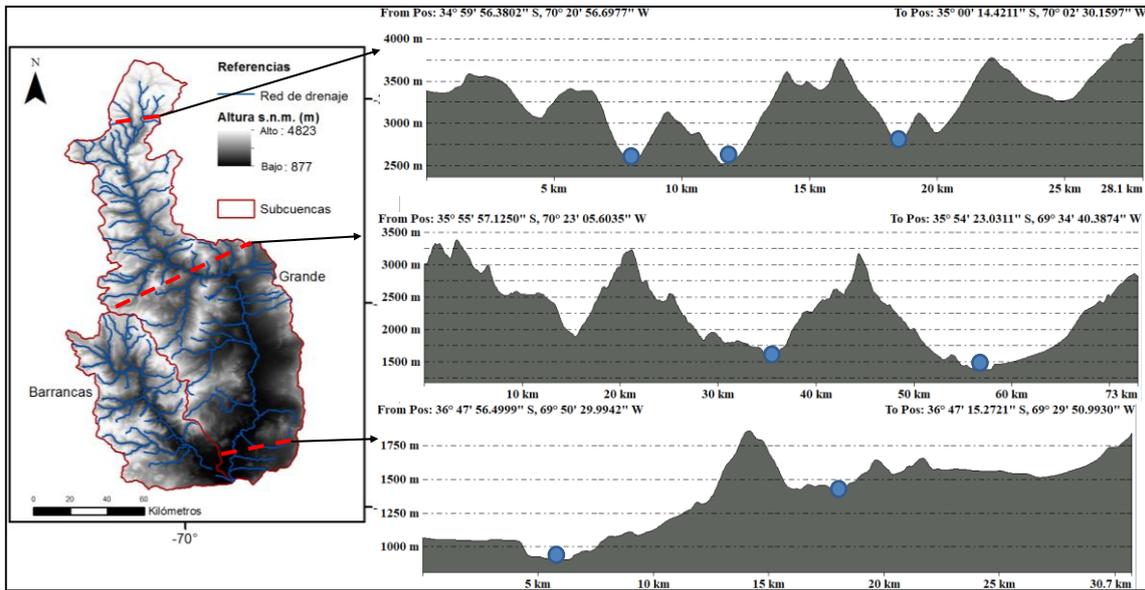


**Figura 2.9.** Perfiles longitudinales de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.

Por otra parte, los perfiles transversales de cada subcuenca permiten representar el cauce de los ríos y reconocer la planicie de inundación a cada lado de los mismos (Figura 2.10). En la cabecera y parte media superior de la subcuenca del río Grande los cursos de agua son más abundantes (Figura 2.10), ya sean cursos permanentes o temporarios. Los principales afluentes del río Grande, que nacen allí son los ríos Cobre, Santa Elena, Valenzuela, Chico, Poti Malal y Tordillo, y varios arroyos.

Los perfiles transversales de la subcuenca del río Barrancas se observan en la Figura 2.10, uno en la cabecera, uno en la parte media y uno en la desembocadura. Los principales afluentes son: arroyo Puente de Tierra, Butamallín, Domuyo, Butacó y Chadileo.





**Figura 2.10.** Perfiles transversales de la subcuenca del río Grande (superior) y del río Barrancas (inferior). Los puntos azules indican la confluencia de los principales ríos afluentes.

En ambas subcuencas se puede observar que la rugosidad del terreno disminuye a medida que se avanza hacia sus desembocaduras, ya sea de forma longitudinal como transversal. El cauce de los ríos principales en la cabecera de ambas subcuencas es encajonado, y a medida que recorre las subcuencas aguas abajo, su planicie de inundación es más ancha (Figura 2.10).

Por otro lado, se determinaron los parámetros morfométricos de forma, relieve y drenaje para las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, que se presentan a continuación.

### 2.3.1.1 Parámetros de forma

El río Grande tiene una longitud de 257 km hasta confluir con el río Barrancas, encerrando un área de drenaje de 10.405 km<sup>2</sup>, con dirección predominante hacia el sur, de forma encajonada, con un perímetro de 701,7 km. Por su parte el río Barrancas tiene una longitud de 86 km hasta confluir con el río Grande, con un área de drenaje de 3544 km<sup>2</sup> y un perímetro de 329,5 km. Su curso se orienta en dirección sur-sureste hasta la laguna Carri-Lauquen, a partir de la cual retoma su curso por un cañón angosto hasta unirse con el río Grande. A partir de los valores de Kc obtenidos (Tabla 2.3), superiores a 1,75 se interpreta a las dos subcuencas como de forma rectangular oblonga, siendo menos susceptible a las crecidas, debido al retardo en la contribución de la escorrentía hacia el cauce principal.

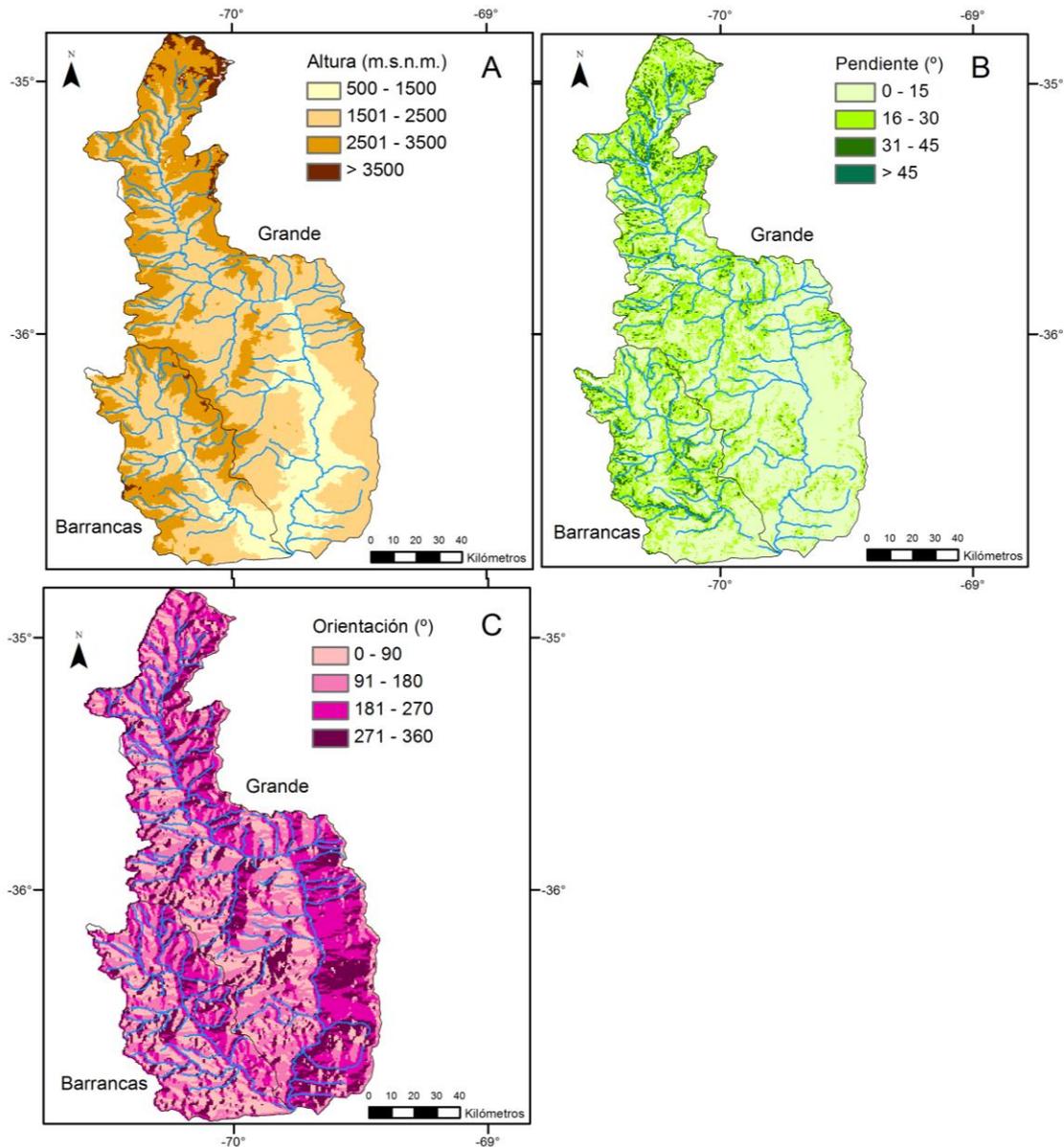
**Tabla 2.3.** Parámetros de forma de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.

Subcuenca	Ancho medio (Ap) (km)	Longitud axial (La) (km)	Coef. de compacidad de Gravelius (Kc)	Factor de forma (IF)	Razón de elongación (Re)
Grande	44,6	223	1,94	0,19	0,52
Barrancas	32,3	109,8	1,568	0,29	0,61

### 2.3.1.2 Parámetros de relieve

La cuenca del río Grande presenta una cota máxima de 4823 m.s.n.m. en la divisoria superior, y mínima de 878 m.s.n.m. en la desembocadura, con una altura media (AM) de 2850 m.s.n.m. A partir de los derivados de elevación, pendiente y orientación, se realizó una reclasificación por rangos que puede observarse en la Figura 2.10 para la subcuenca del río Grande y en la Figura 2.11 para la subcuenca del río Barrancas.

El 53,7 % de la superficie del Grande se encuentran entre las cotas de 1500 y 2500 m.s.n.m., presentando un 2 % de la superficie, cotas por encima de 3500 m.s.n.m. (Figura 2.11). Una gran parte de la subcuenca (64,6 %) presenta pendientes entre 0-15 %, que se ubican en la zona centro y este. En cambio, sobre el sector noroeste se encuentran las áreas de fuertes pendientes (30,5 % de la superficie), entre 16 y 30°, donde se presentan también las mayores elevaciones (Figura 2.11). Respecto a la orientación, el 22 % de su superficie presenta una orientación noreste y el 25 % noroeste, si se suman ambas orientaciones, alrededor del 45 % de la superficie de la subcuenca tiene orientación norte, la cual recibe mayor cantidad de horas de sol al día, mientras aquellas orientadas al sur, se encuentran a umbría (Figura 2.11).

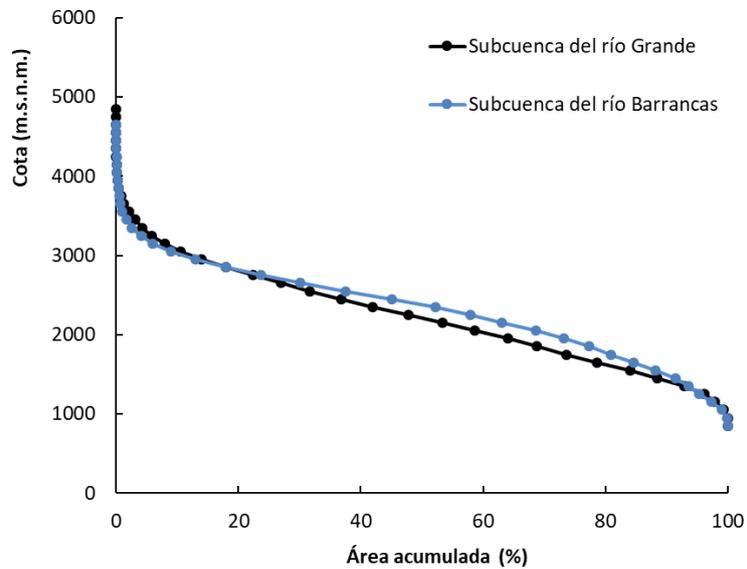


**Figura 2.11.** Zonificación en rangos de(A) Altura, (B) Pendiente y (C) Orientación de las laderas de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.

Por su parte, en la subcuenca del río Barrancas la cota máxima alcanza los 4664 m.s.n.m., y su cota mínima los 877 m.s.n.m., con una altura media (AM) de 2770 m.s.n.m. (Figura 2.11). Un 50 % de la subcuenca se encuentra entre 1500 y 2500 m.s.n.m., con menos del 1 % de superficie con cotas por encima de los 3500 m.s.n.m., que se ubican en el noreste, al límite con la subcuenca del río Grande, y al suroeste. Respecto a la pendiente cabe destacar que el 57 % de la superficie posee pendientes entre 0-15 %. Sobre el sector noroeste se encuentran las áreas de fuerte pendientes, entre 16 y 30°, donde se presentan también las mayores elevaciones. Sólo el 7 % de la superficie de esta subcuenca presenta pendientes en el rango de 31 a 45°. En relación a la orientación, el 28 % de la superficie de las laderas tiene orientación noreste y el 27 % sureste.

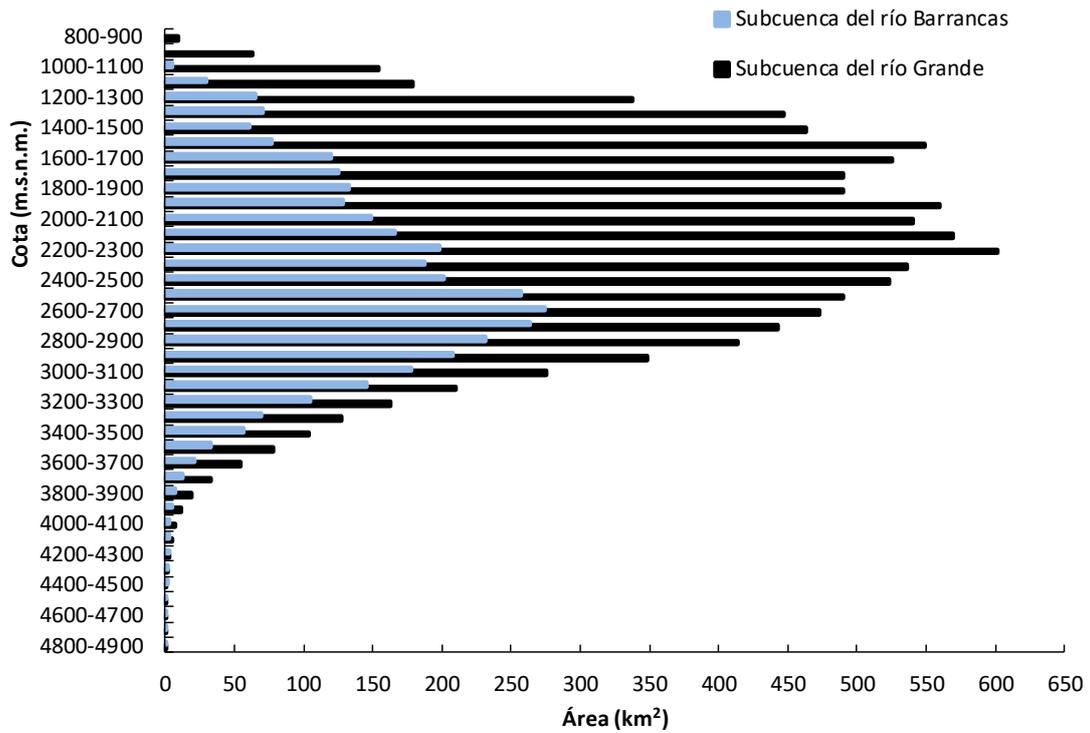
La mayor parte de los fenómenos hidrológicos se encuentran influidos por las geformas del terreno. Las curvas hipsométricas (CH) de cada subcuenca indican el porcentaje de área por

encima de cada cota, en el caso de la subcuenca del río Grande el 50 % se encuentra por encima de los 2100 m.s.n.m. (Figura 2.12), y en la subcuenca del Barrancas el 50 % está por encima de los 2350 m.s.n.m. (Figura 2.12).



**Figura 2.12.** Curvas hipsométricas de las subcuencas de los ríos Grande (negro) y Barrancas (azul).

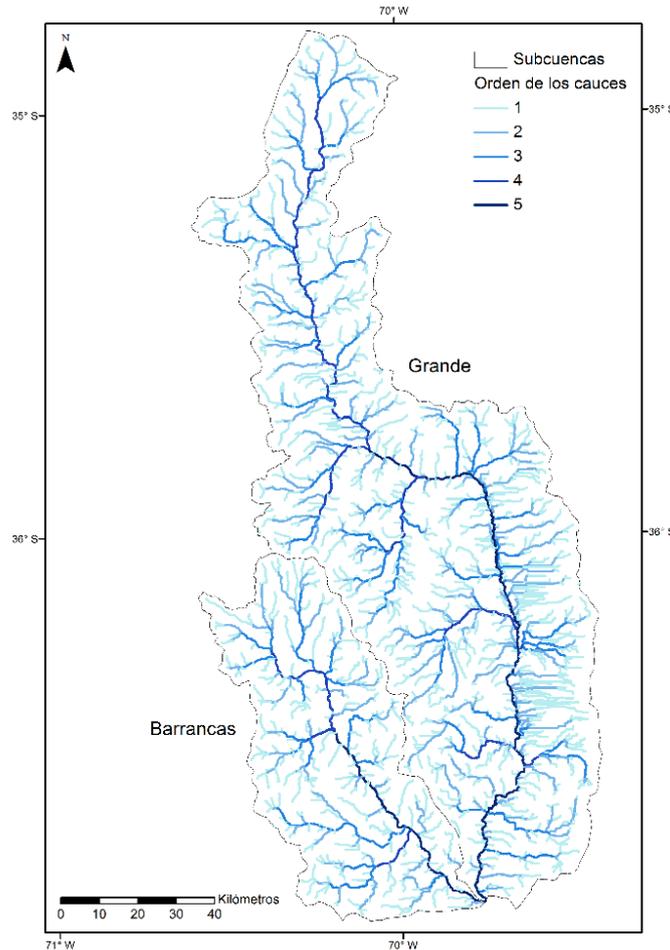
Las curvas hipsométricas permitieron conocer la distribución del área de cada subcuenca a distintos niveles topográficos, a fin de comparar características de almacenamiento y flujo entre subcuencas (Figura 2.13). El río Grande desarrolla mayor área de drenaje, desde los 800 a los 2900 m.s.n.m., con una superficie total de 9205 km<sup>2</sup> que representa el 88,5 % de la subcuenca, con máximo de superficie (535,7 km<sup>2</sup>) desde los 2300 a 2400 m.s.n.m. (Figura 2.13). En la subcuenca del río Barrancas, la mayor superficie se da entre los 2400 y 2500 m.s.n.m., con 274,1 km<sup>2</sup>. Sobre los pisos altitudinales superiores a 2900 m.s.n.m. las diferencias de superficie entre ambas subcuencas son menores que hacia las cotas más bajas.



**Figura 2.13.** Frecuencias altimétricas. Las barras indican el área entre cada intervalo de cotas en la subcuenca del río Grande (en negro) y del río Barrancas (en azul).

### 2.3.1.3 Parámetros de drenaje

La red de drenaje corresponde a un sistema dendrítico en ambas subcuencas (Figura 2.14). El número de orden máximo de los cursos de agua o jerarquización es 5 para las subcuencas en estudio.



**Figura 2.14.** Jerarquización de la red de drenaje de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.

Los resultados de los parámetros de la red de drenaje calculados se presentan en la Tabla 2.4. El valor de  $D_d$  alcanzado para la subcuenca del río Grande fue de  $0,44 \text{ (km.km}^{-2}\text{)}$  y para el Barrancas de  $0,41 \text{ (km.km}^{-2}\text{)}$ , lo cual significa que en la primera subcuenca existen cauces de mayor longitud, o mayor cantidad. La longitud del río Grande es tres veces superior a la del Barrancas, con un área de drenaje que sigue las mismas relaciones. Una diferencia a destacar entre las subcuencas se encuentra en el desnivel del cauce y la pendiente media, dado que el Barrancas posee mayor desnivel entre nacimiento y desembocadura, en un área drenada menor que el Grande. Por lo tanto, durante las tormentas de alta intensidad en la subcuenca del río Barrancas se generaría mayor actividad torrencial.

Se ha comprobado que la relación del área de la cuenca con la longitud de la misma, es proporcional, así como también el  $T_c$ . No se guarda la misma proporción entre el área de las subcuencas bajo estudio y la densidad de drenaje, debido a que la subcuenca del río Grande tiene tres veces la superficie de la del Barrancas, pero su densidad de drenaje se diferencia en la misma magnitud.

**Tabla 2.4.** Parámetros de la red de drenaje de las subcuencas del Grande y Barrancas.

Subcuenca	Longitud del curso principal (L) (km)	Desnivel del cauce (DH) (m)	Pendiente media del cauce (J) (%)	Longitud de todos los cauces (Ln) (km)	Tiempo de concentración (Tc) (horas)
<b>Grande</b>	351	1089	3,10	4629,9	19,9
<b>Barrancas</b>	109,2	1539,8	14,12	1454,7	5,8

### 2.3. A2) Usos y cobertura de la tierra

Los mayores cambios en el uso y la cobertura de la tierra se detectaron en la cuenca media del río Colorado entre los años 2000 y 2015. En esta región aumentó la superficie ocupada por la actividad petrolera (locaciones, caminos, yacimientos), la actividad agrícola bajo riego, y los centros poblacionales, principalmente Rincón de los Sauces (Neuquén), 25 de Mayo (La Pampa) y Catriel (Río Negro) (Tabla 2.5).

**Tablas 2.5.** Área ocupada por las clases de usos y coberturas del suelo en km<sup>2</sup> y % en relación a la superficie de la cuenca entre Buta Ranquil (Neuquén) y Casa de Piedra (La Pampa).

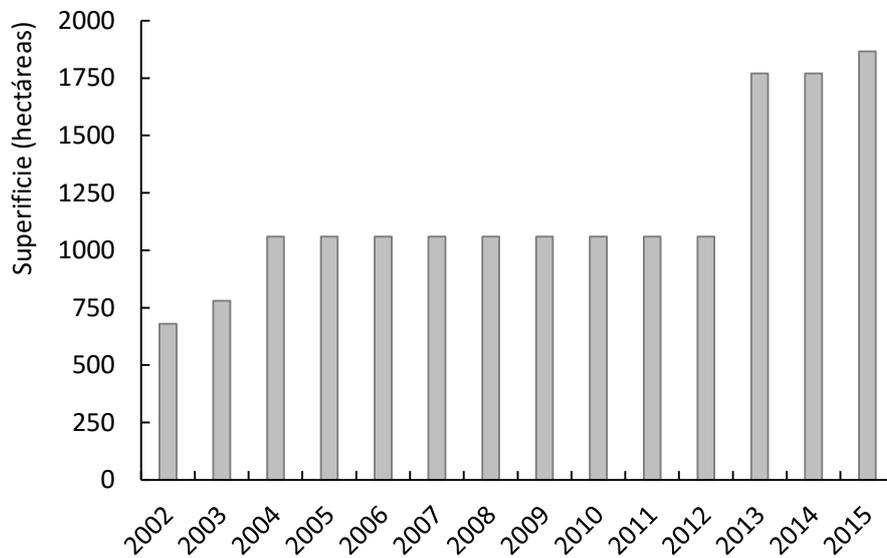
Clases	Área en Km <sup>2</sup>		Área en %	
	2000	2015	2000	2015
<b>Actividad petrolera</b>	1042,8	2308,6	5,5	12,2
<b>Agricultura bajo riego</b>	59,2	87,9	0,3	0,5
<b>Centros poblacionales</b>	15,2	19,5	0,08	0,1
<b>Vegetación natural</b>	17.644,7	16.345,1	93,3	86,4
<b>Cuerpos de agua</b>	155,1	155,8	0,8	0,8

En la cuenca media del río Colorado durante el período bajo estudio se produjeron los siguientes procesos:

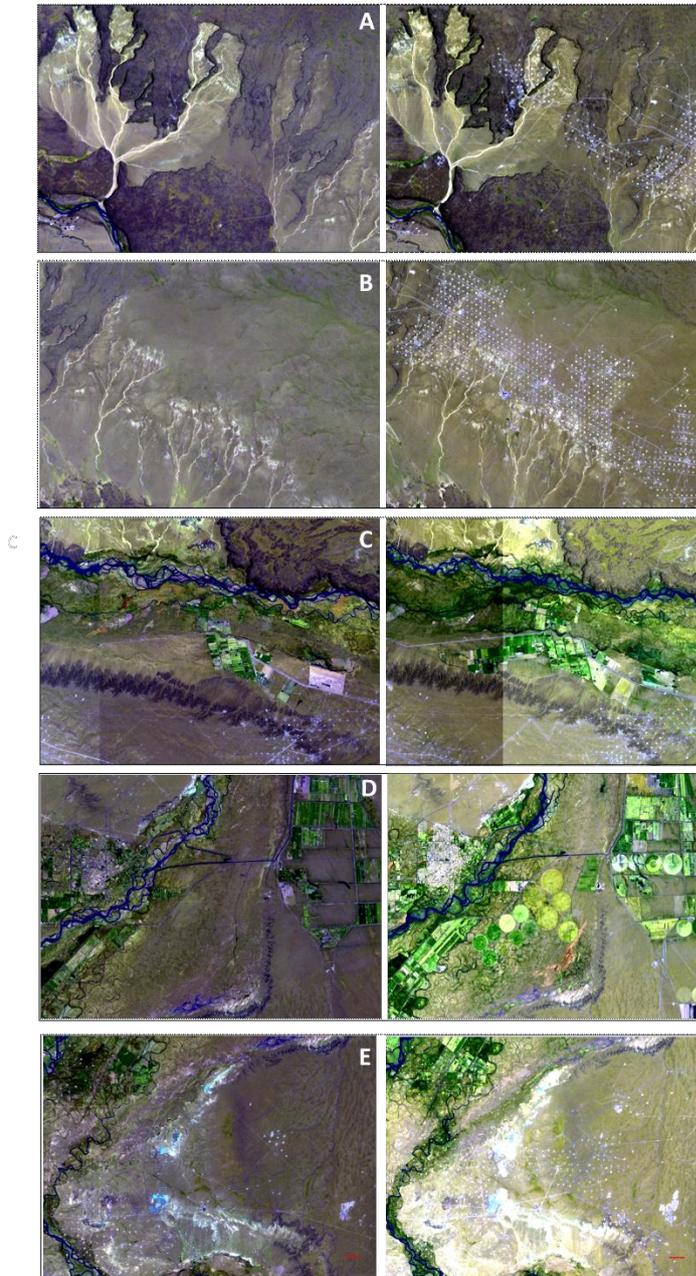
- i) Expansión de la actividad petrolera hacia nuevas áreas, principalmente al sur de la provincia de Mendoza, en el área denominada “El Corcovo” y en cercanías al embalse de Casa de Piedra (La Pampa) (Figura 2.16 A y B). Estas intervenciones humanas para el aprovechamiento productivo de los ecosistemas generan la eliminación de la vegetación natural por superficies con suelo desnudo (locaciones, caminos, yacimientos).
- ii) Intensificación del uso de la tierra por parte de la actividad petrolera, principalmente en la provincia de Neuquén, alrededor de la localidad de Rincón de los Sauces, y en la provincia de La Pampa, entre 25 de Mayo y Casa de Piedra (Figura 2.16 B y E). Las intervenciones de la actividad petrolera (caminos, locaciones, yacimientos, tendidos eléctricos) tienen alta frecuencia e la intensidad en la zona bajo estudio, lo que

implican una nueva impronta de la vegetación sobre la dinámica del agua alterando la prestación de sus servicios ecosistémicos a la sociedad.

- iii) Expansión de la actividad agrícola bajo riego, en Peñas Blancas y Valle Verde (Río Negro) e instalación de nuevos sistemas de riego en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado (La Pampa). La mayor expansión del área bajo riego se produjo en la provincia de La Pampa, donde todos los sistemas de riego que se desarrollaron fueron mediante pivote central (Figura 2.16). En esta región se desarrollaron nuevas áreas, específicamente Sección II del SAM y también se produjo el reemplazo de superficie con riego gravitacional a presurizado en Sección I del SAM. En el año 2002 se contaba con 6 equipos, con una superficie aproximada de 70 ha cada uno con un total de 680 ha. En el año 2010 el total de pivotes ascendió a 21 con un total de 1060 ha y hacia final de la serie analizada en el año 2015 se contaba con 22 equipos de riego que equivalen a 1866 ha (Figura 2.15). Mediante esta tecnología de riego se aumenta la eficiencia del uso del agua en la zona con respecto al riego gravitacional, determinando una disminución en el caudal utilizado, quedando disponible para otros usos o para el desarrollo de mayor superficie bajo riego.



**Figura 2.15.** Evolución anual de la superficie regada (hectáreas) mediante pivote central en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado en 25 de Mayo, La Pampa.



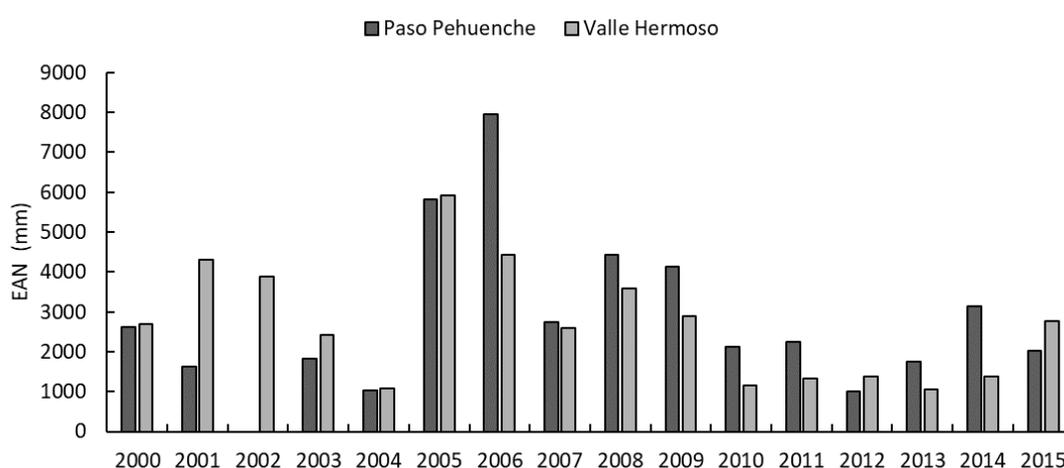
**Figura 2.16.** Cambios en el uso y la cobertura del suelo en la cuenca media del río Colorado, entre Buta Ranquil (Neuquén) y Casa de Piedra (La Pampa), desde 2000 a 2015. En cada recuadro a la izquierda la imagen correspondiente al año 2000 y a la derecha la imagen del año 2015.

## Componentes del balance de agua:

### 2.3. B 1) NIEVE

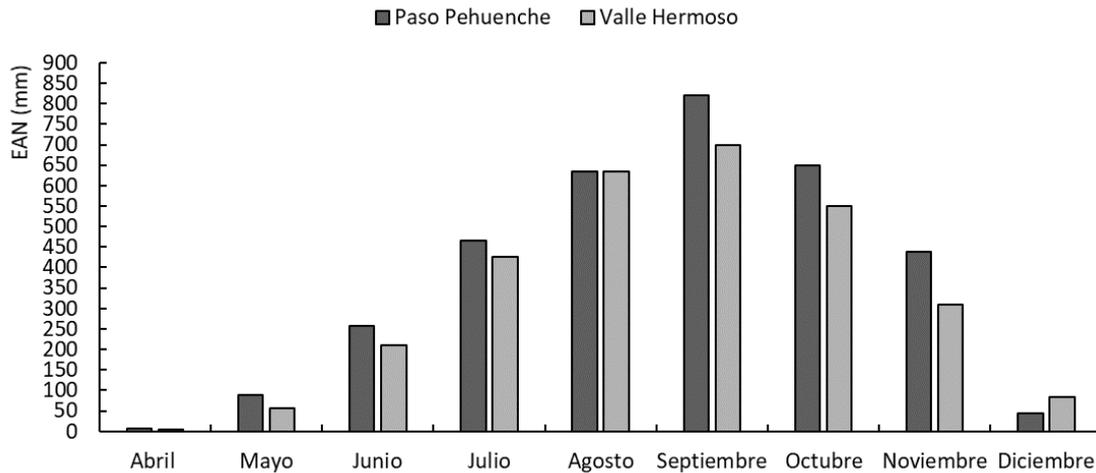
#### B1.1) Mediciones de las estaciones nivométricas: Equivalente de agua en nieve

Las nevadas que ocurren en el área presentan variaciones anuales e interanuales (Figuras 2.17 y 2.18). En la estación Paso Pehuenche se alcanzaron valores superiores a la estación Valle Hermoso en la mayoría de los años analizados, con un máximo de 7963 mm de EAN en el año 2005. Los mínimos en el EAN se registraron en el año 2004, con 1046,3 mm en la estación Paso Pehuenche y 1071,7 mm en la estación Valle Hermoso (Figura 2.17).



**Figura 2.17.** Equivalente de agua en nieve (EAN) (mm) promedio anual de las estaciones Paso Pehuenche (Mendoza) y Valle Hermoso (Mendoza) desde 2000 a octubre de 2015.

La acumulación de nieve comienza en los meses de abril-mayo y se extiende hasta mediados de septiembre, cuando el proceso de fusión comienza a prevalecer (Figura 2.18). El EAN máximo se produce en el mes de setiembre con 820 y 698 mm, en el caso de Paso Pehuenche y Valle Hermoso, respectivamente.

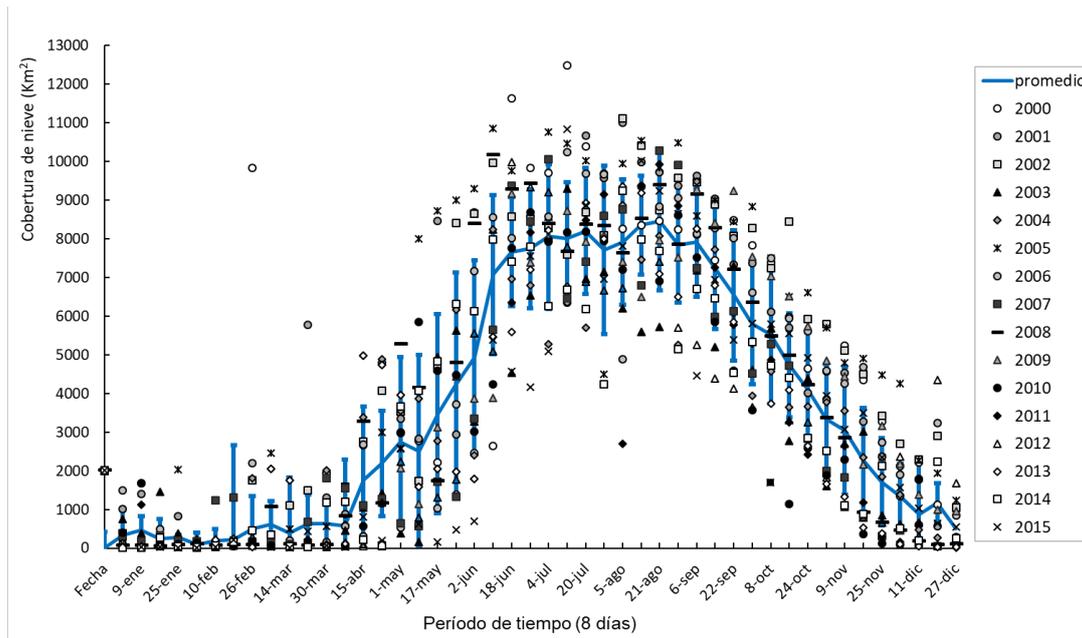


**Figura 2.18.** Equivalente de agua en nieve (EAN) (mm) promedio mensual de la serie 2000 a 2015 de las estaciones Paso Pehuenche (Mendoza) y Valle Hermoso (Mendoza).

## B1.2) Estimación de cobertura mediante información satelital

### *Dinámica anual e interanual de la cobertura de nieve*

Según las estimaciones de cobertura de nieve a partir de imágenes MODIS, el área media cubierta por nieve durante los 16 años de análisis fue de 3715 km<sup>2</sup>, lo que equivale a 27 % de la superficie de la cuenca alta del río Colorado, que corresponde precisamente a las subcuencas de los ríos Grande y del Barrancas. El porcentaje promedio de cobertura de nieve oscila entre el 30 y el 90 % en invierno y de 0,1 a 18 % de la superficie en verano. La superficie máxima cubierta por nieve fue de 10.566 km<sup>2</sup> en julio de 2000 (90 % de la superficie), seguido por agosto de 2005 (10.199 km<sup>2</sup>) y la mínima de 13 km<sup>2</sup> en enero de 2014 con una superficie de 0,1 % (Figura 2.19). El período de acumulación de nieve comienza en marzo – abril, con aumentos de la cobertura nival en otoño e invierno y reducciones de la cobertura en verano. El período de deshielo comienza a principios de septiembre y el mínimo de nieve se observa durante enero y febrero cuando la cobertura de nieve baja a un rango de 0,1-16 %. (Figura 2.19). Por lo tanto, desde septiembre a marzo predomina el proceso de fusión resultando en un aumento de la descarga del río, ya que, durante los meses de verano la precipitación en la Cordillera es sumamente escasa.



**Figura 2.19.** Distribución de la cobertura de nieve estimada ( $\text{km}^2$ ) cada 8 días para los años 2000 a 2015. El promedio se representa con la línea azul y el desvío estándar en barras.

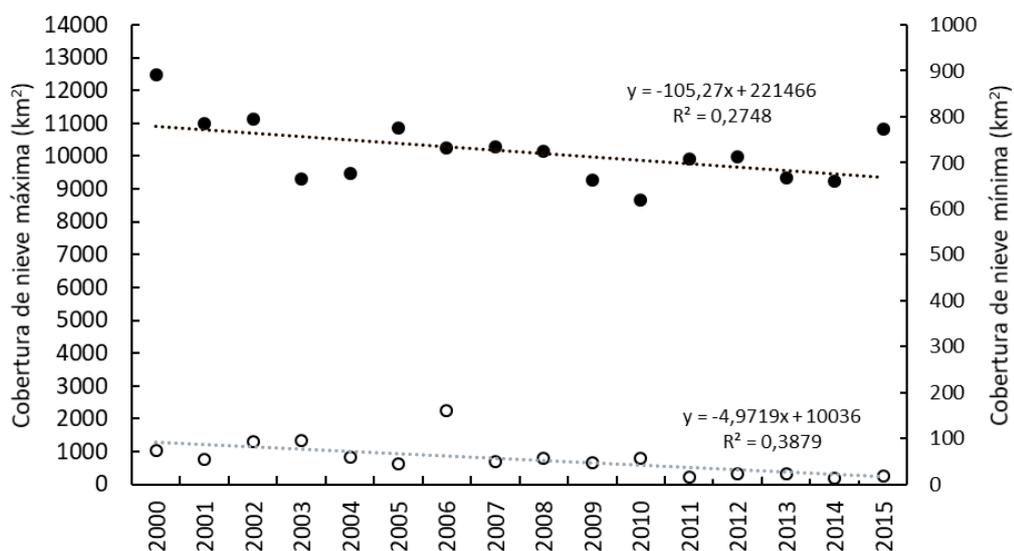
Se clasificaron las curvas de evolución anual de la superficie cubierta por nieve de todos los años bajo análisis. A partir de esto, se detectó patrones diferentes según los años donde: a) la acumulación de nieve fue proceso más lento que la fusión en los años 2001, 2004, 2007, 2010, 2011, 2013 y 2015, b) existieron doble punto de máxima acumulación (2002, 2005, 2009, 2014); los picos dobles indican un cambio abrupto en el área cubierta de nieve, que puede resultar de un evento de nevadas, donde cada evento puede modificar abruptamente la cobertura, y c) cuando el proceso de fusión de nieve es más lento que la acumulación, qué ocurrió en 2000, 2003, 2006, 2008, 2012). En todos los casos de doble punto de máxima cobertura de nieve, la segunda máxima siempre fue superior y ocurrió en agosto y septiembre en el último caso.

La cobertura de nieve presenta variaciones anuales e interanuales. Respecto al ciclo anual de la nieve (ver Figura 2.3) se observó que existen algunas nevadas tempranas con fecha 3 febrero, pero el inicio de acumulación de nieve tiene como fecha promedio el 15 de marzo, y más frecuente el 6 de marzo (Figura 2.19, Tabla 2.4). Por otra parte, la fecha más frecuente de máxima acumulación promedio es el 5 de agosto, pero en promedio la fecha es el 23 de julio. Desde 2009 a 2014, la cobertura máxima desarrollada sobre la cuenca alta del río Colorado no ha superado el promedio máximo de la serie ( $10.134 \text{ km}^2$ ). La cobertura mínima no superó el promedio de la serie ( $69,9 \text{ km}^2$ ) desde 2008 a 2015, a excepción del año 2010, esto significa que la reserva de agua en nieve ha disminuido durante los últimos años (Tabla 2.6).

**Tabla 2.6.** Valores de cobertura de nieve (km<sup>2</sup>) estimados mediante MOD10A2 y fechas de mínimos, máximos, inicio de acumulación, días con predominio de nevadas y días con predominio de fusión de 2000 a 2015.

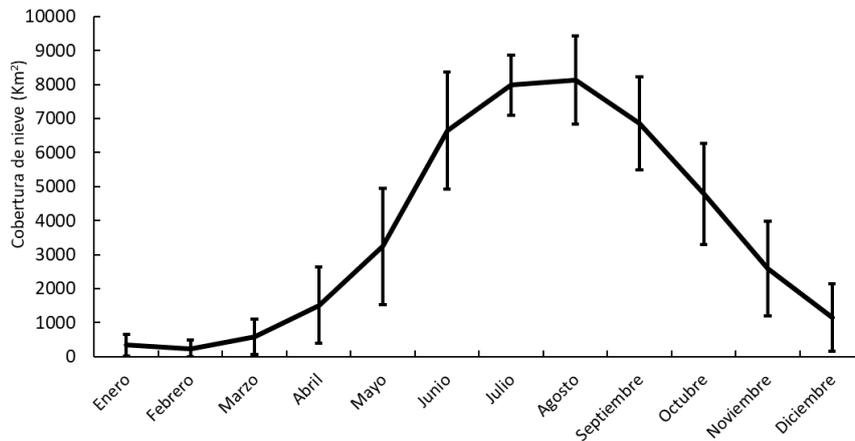
Año	Cobertura mínima (año anterior) (1)		Cobertura mínima del año (2)		Inicio de acumulación (3)	Cobertura máxima (4)		Período de predominio de nevadas (4-1)		Período de predominio de fusión (2-4)	
	Fecha	Superficie (km <sup>2</sup> )	Fecha	Superficie (km <sup>2</sup> )	Fecha	Fecha	Superficie (km <sup>2</sup> )	Días	Superficie (km <sup>2</sup> )	Días	Superficie (km <sup>2</sup> )
2000	6-mar	74	27-dic	990	23-abr	12-jul	12.478	128	12.404	168	11.488
2001	18-feb	55	27-dic	300	22-mar	5-ago	10.992	168	10.937	144	10.692
2002	10-feb	93	27-dic	1056	26-feb	5-ago	11.113	176	11.020	144	10.057
2003	2-feb	230	19-dic	95	30-mar	12-jul	9292	160	9062	160	9197
2004	25-ene	59	27-dic	184	2-feb	6-sep	9481	224	9422	112	9297
2005	26-feb	45	27-dic	1244	6-mar	10-jun	10.846	104	10.801	200	9602
2006	18-feb	164	27-dic	839	26-feb	12-jul	10.241	144	10.077	168	9402
2007	14-mar	115	19-dic	50,5	22-mar	21-ago	10.282	160	10.167	120	10.231
2008	10-feb	60	19-dic	91	18-feb	10-jun	10.155	120	10.095	192	10.064
2009	14-mar	47	27-dic	951	23-abr	6-sep	9278	176	9231	112	8327
2010	6-mar	71	19-dic	57	14-mar	26-jun	8675	112	8604	176	8618
2011	18-feb	26	27-dic	15	6-mar	21-ago	9917	184	9891	128	9902
2012	2-feb	22	11-dic	314	18-feb	18-jun	9979	136	9957	176	9665
2013	2-feb	27	19-dic	23	6-mar	5-ago	9352	184	9325	136	9329
2014	9-ene	13	11-dic	203	30-mar	5-ago	9231	208	9218	128	9028
2015	2-feb	18	27-dic	555	15-abr	12-jul	10.832	160	10.814	168	10.277

La superficie máxima cubierta por nieve fue de 10.566 km<sup>2</sup> en julio de 2000, seguido por agosto de 2005 (10.199 km<sup>2</sup>) y la mínima de 38 km<sup>2</sup> en marzo de 2012. En promedio, la acumulación de nieve comienza el 3 febrero y el máximo ocurre el 23 de julio. La fecha más frecuente de mínima acumulación es el 19 de diciembre y la de máxima el 12 de julio (Figura 2.20).



**Figura 2.20.** Cobertura de nieve máxima anual (km<sup>2</sup>) desde 2000 a 2015 en círculos llenos, con su línea de tendencia, y cobertura de nieve mínima por año desde 2000 a 2015 en círculos vacíos y su línea de tendencia.

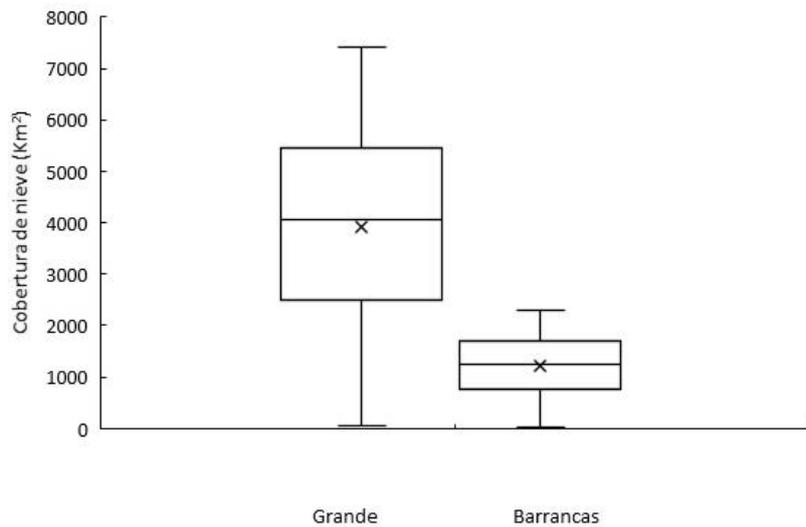
A partir de los promedios mensuales de superficie cubierta por nieve se calculó el desvío estándar mensual y se observó que la mayor variabilidad en la cobertura ocurre en los meses de mayo (DE= 1.704) y junio (DE= 1.726), estación donde ocurren las nevadas, lo cual indica que las nevadas varían anualmente, y por ello la cobertura no es estable de un año a otro (Figura 2.21). La cobertura de nieve en los meses de primavera – verano es menos variable entre años analizados. También la tendencia decreciente de cobertura desde 2000 a 2015, estaría influyendo en la variabilidad mensual, por presentar valores muy bajos respecto al medio mensual del resto de los años.



**Figura 2.21.** Distribución mensual promedio de la cobertura de nieve estimada (km<sup>2</sup>) mediante el producto de MODIS (MOD10A2). La desviación estándar en barras.

### ***Cobertura de nieve por subcuencas***

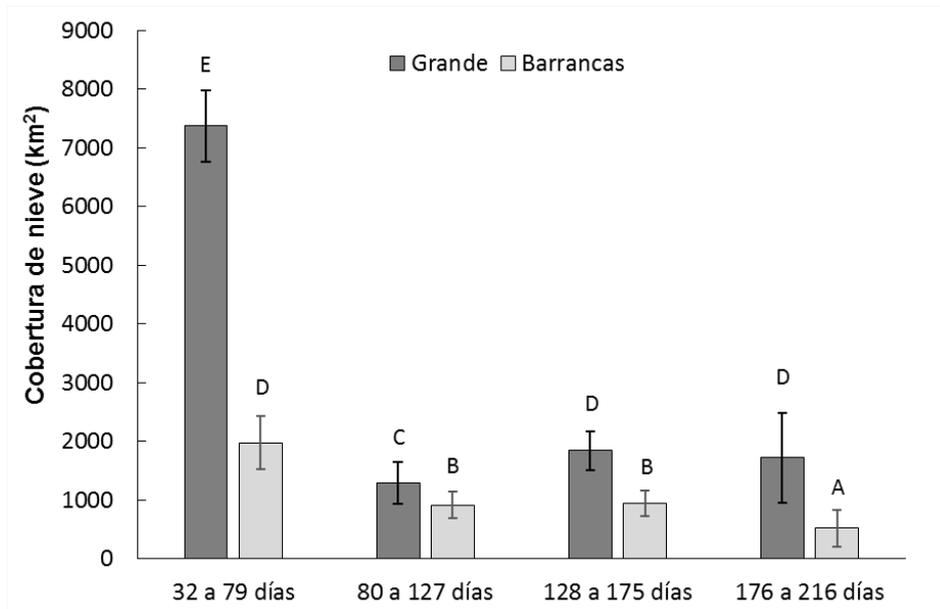
Se seleccionó el período abril-noviembre para centrar el estudio en los meses en que ocurren las nevadas. En este período la cobertura de nieve promedio entre 2000 a 2015, fue de 4063 km<sup>2</sup> en la subcuenca del río Grande con un desvío estándar de 1887 km<sup>2</sup> y 1789 km<sup>2</sup> en la subcuenca del río Barrancas, con un desvío de 999 km<sup>2</sup> (Figura 2.22). Esta superficie promedio representa el 39 y el 50 % de la superficie de respectivas cuencas. Para la subcuenca del río Grande, la fecha con máxima cobertura de nieve corresponde a 193 del año 2000 con 8698 km<sup>2</sup> y mínima el 23 de abril del año 2009 con 41 km<sup>2</sup>. En la subcuenca del río Barrancas el máximo se registró en la misma fecha, pero del año 2000 con 3810 km<sup>2</sup>, y con la cobertura mínima ocurrió lo mismo. Se registró el 23 de abril del año 2014 con 15 km<sup>2</sup>.



**Figura 2.22.** Cobertura de nieve ( $\text{km}^2$ ) en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas desde el 23 de abril de 2000 a 17 de noviembre de 2015.

***Permanencia de la cobertura de nieve***

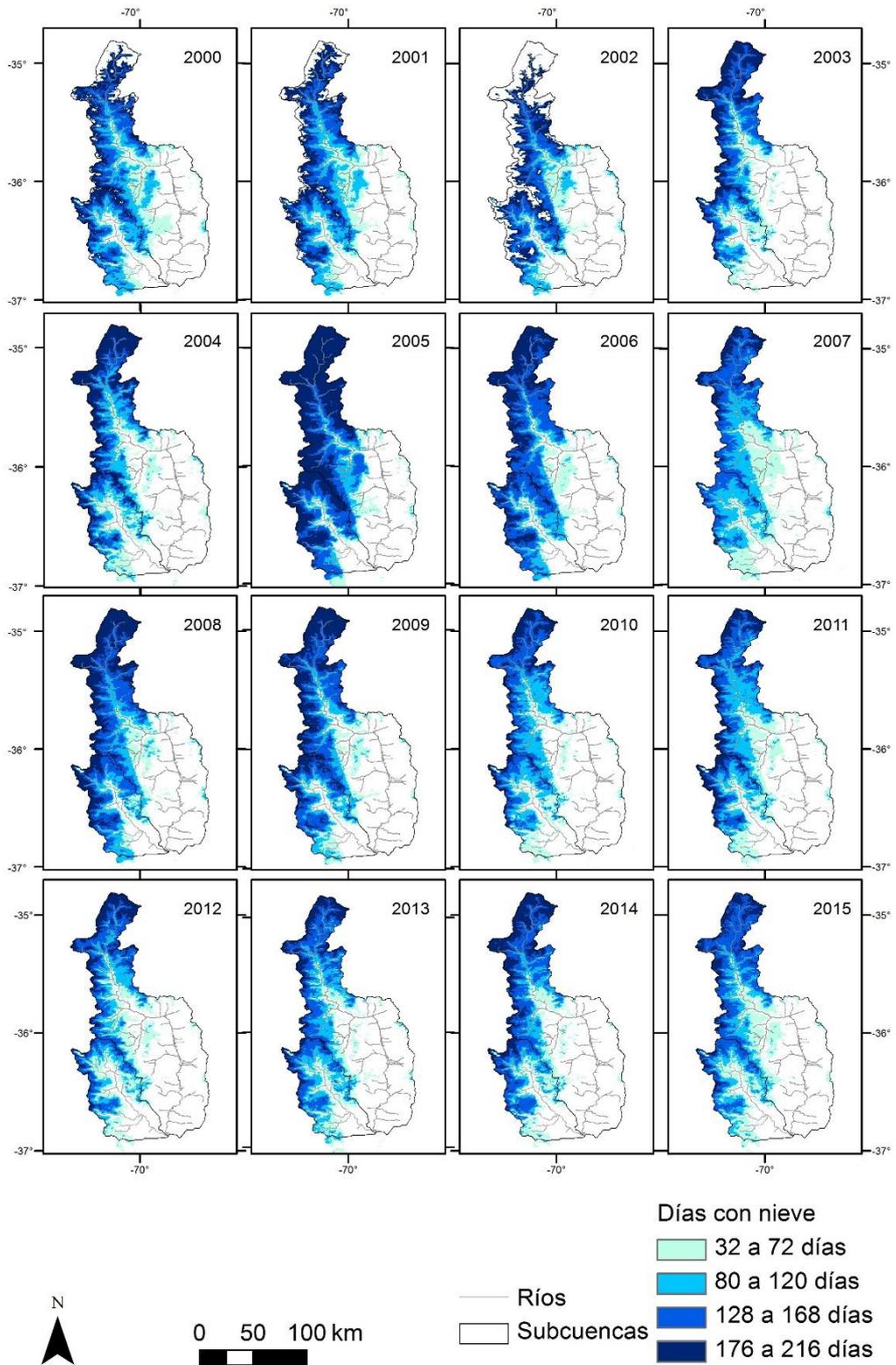
La permanencia de la cobertura de nieve se analizó considerando 4 clases de días con nieve, donde cada una de las clases corresponden a: 32 a 72 días, 80 a 120 días, 128 a 168 días y 176 a 216 días. A partir de este análisis en ambas subcuencas puede observarse que la nieve que permanece menos tiempo, entre 128 a 168 días, es la que presenta menor variación entre años, con un desvío estándar de  $333 \text{ km}^2$  para la subcuenca del río Grande y  $223 \text{ km}^2$  para la subcuenca del río Barrancas (Figura 2.23). En cambio, la mayor variación de cobertura de nieve para la subcuenca del Grande se observa en la clase de 176 a 216 días con un desvío de  $609 \text{ km}^2$  y para la subcuenca del Barrancas un desvío de  $446 \text{ km}^2$  para la nieve que permanece entre 32 a 79 días. La cobertura de nieve con mayor permanencia resulta de suma importancia porque constituye el almacenamiento de agua en períodos estivales o en años secos.



**Figura 2.23.** Cobertura de nieve promedio (km<sup>2</sup>) por clases (días de permanencia) desde 2000 a 2015 para las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, y en las barras desvío estándar. Medias con letras diferentes sobre barras indican diferencias significativas ( $p > 0,05$ ).

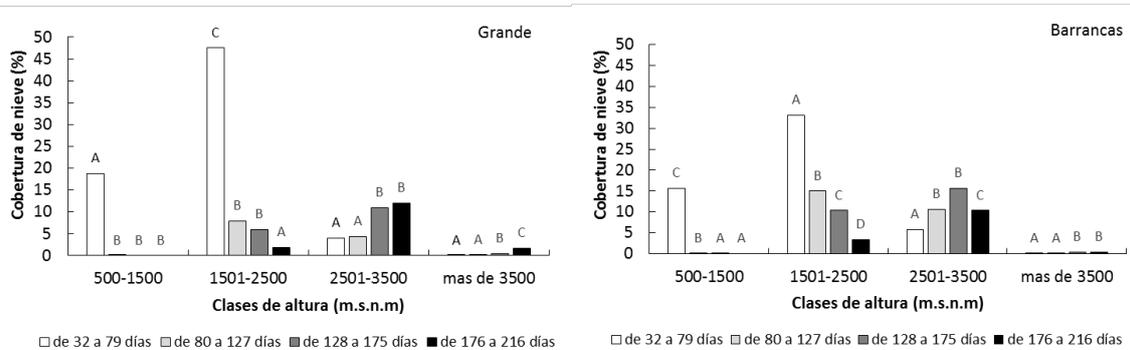
### B) 1.3. Características morfométricas y su relación con la cobertura de nieve

Mediante un sistema de información geográfica se combinaron los mapas de elevación, pendiente y orientación de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, derivados del MDE, con la cobertura de nieve, para comprender el comportamiento de la variación del área cubierta de nieve. En ambas subcuencas sobre la región oeste y norte, se ubica la cobertura de nieve permanente (176 a 216 días) donde se presentan las mayores alturas, y sobre el centro y sur de ambas cuencas la duración de la cobertura es más variable (Figura 2.24).



**Figura 2.24.** Mapas de permanencia de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado, derivados del producto MOD10A2, para los años 2000 a 2015 de abril a noviembre.

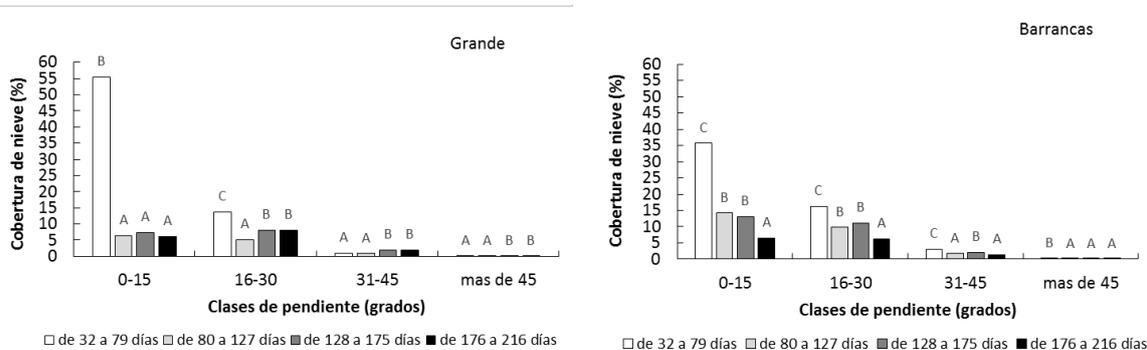
La nieve con menor permanencia se ubica principalmente entre los 1501-2500 m.s.n.m. (Figura 2.25), en cambio las zonas con mayor permanencia de cobertura de nieve corresponden a zonas de mayor altimetría por encima de los 2501 m.s.n.m. (Figura 2.25) y su mayor superficie se desarrolla en la subcuenca del río Grande. Ésta tiene una altitud media de 3945 m.s.n.m., 159 metros superior a la subcuenca del Barrancas, por lo tanto, cuanto mayor sea la altura media de una cuenca activa, la duración del almacenamiento se aproxima más al año entero, como sostienen Lascano y Villalba (2007), ya que la persistencia temporal de la nieve depende de la altitud y de la latitud. Esta es la condición para el desarrollo de las llamadas “nieves eternas” y de cuerpos de hielo (Lascano y Villalba, 2007).



**Figura 2.25.** Cobertura de nieve (%) en relación a la altura (m.s.n.m.) para las distintas clases de permanencia en las subcuencas de los ríos Grande (izquierda) y Barrancas (derecha). Letras diferentes sobre barras indican diferencias significativas dentro de cada clase ( $p > 0,05$ ).

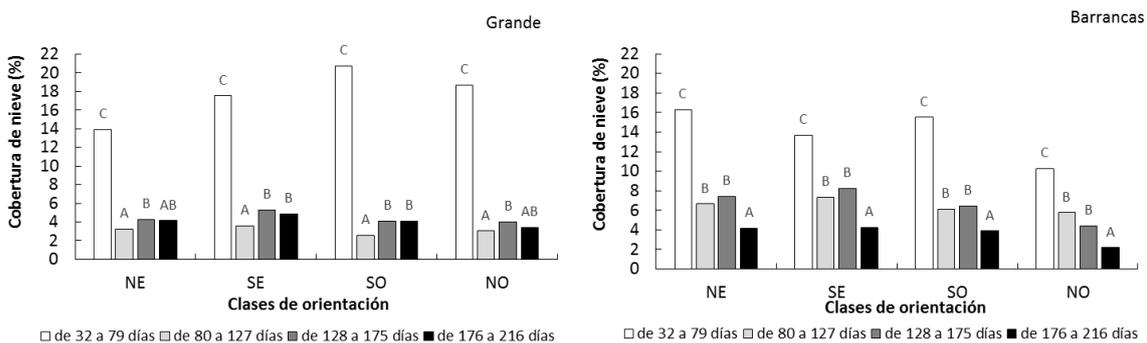
La mayor superficie de cuenca activa del río Colorado se encuentra entre los 2250 y 3000 m.s.n.m., en coincidencia con lo reportado por Lascano y Villalba (2007). Estos autores señalan que la altimetría y el escaso desarrollo de su área de aporte por sobre los 4250 m.s.n.m. (0,6 %) indican de manera concluyente la falta de relevancia de los aportes que puedan corresponder a un desfase interanual de precipitaciones. De esta manera el derrame del río Colorado es indicador de la variabilidad interanual de la precipitación en la Cordillera Central.

En ambas subcuencas, en las laderas con inclinación de 0 a 15° se ubica la mayor cobertura de nieve principalmente la de menor permanencia (Figura 2.26), y en las laderas con inclinación de 16 a 30 la cobertura de nieve sigue las mismas proporciones. Por el contrario, las laderas con inclinación superior a 30° albergan escasa cobertura de nieve (Figura 2.26), existiendo diferencias significativas entre clases de mayor y menor permanencia ( $p > 0,05$ ). En ambas subcuencas las laderas muy inclinadas (más de 45°) albergan poca cobertura de nieve, menos del 0,1 % (Figura 5B).



**Figura 2.26.** Cobertura de nieve (%) en relación a la pendiente (grados) para las distintas clases de permanencia en las subcuencas de los ríos Grande (izquierda) y Barrancas (derecha). Letras diferentes sobre barras indican diferencias significativas dentro de cada clase ( $p>0,05$ ).

La orientación de las laderas es una variable que influye directamente en conjunto con las horas de insolación a lo largo del día, con la conservación o fusión de la nieve. En las subcuencas bajo estudio, aquellas laderas orientadas al norte son las que reciben mayor cantidad de horas de sol al día, mientras aquellas orientadas al sur, se encuentran mayormente a umbría. En las clases mayores a 80 días de permanencia, la nieve se ubica generalmente en laderas con orientación sureste en ambas subcuencas (Figura 2.27), existiendo diferencias significativas con las clases de orientación suroeste y noroeste ( $p>0,05$ ). La cobertura de nieve con mayor permanencia se encuentra en sectores relacionados con la ubicación de glaciares, coincidentes con los sectores más elevados, protegidos y de menor insolación (Inventario Nacional de Glaciares, 2018).



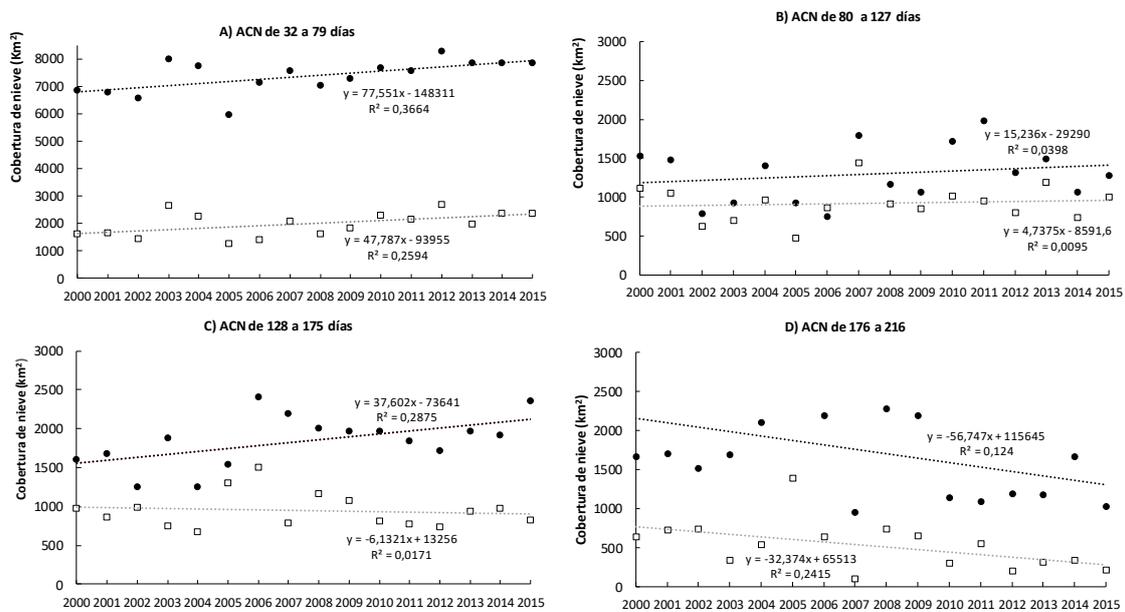
**Figura 2.27.** Cobertura de nieve (%) en relación a la orientación (grados) para las distintas clases de permanencia en las subcuencas de los ríos Grande (izquierda) y Barrancas (derecha). Letras diferentes sobre barras indican diferencias significativas dentro de cada clase ( $p>0,05$ ).

La mayor variabilidad de cobertura de nieve, y por lo tanto de menor permanencia, se presenta en zonas más bajas con pendientes entre los 0 y 15°. Al ser estas capas de menor espesor, ante aumentos de temperatura, es esperable que fluctúen más rápidamente. Según Ault *et al.* (2006) la fiabilidad del producto MOD10A2 es considerablemente más baja cuando la capa de nieve es delgada o se distribuye de forma discontinua; lo que podría estar ocurriendo

en los sitios de nieve no permanente, o, dicho en otras palabras, con mayores variaciones de cobertura, que corresponden con las zonas más bajas de las cuencas bajo estudio.

En la serie de años analizada la cobertura de nieve con menor permanencia tuvo una tendencia positiva en ambas cuencas (Figura 2.28 A). En cambio, la cobertura de nieve de mayor permanencia ha disminuido en los últimos años, con una tendencia negativa más acentuada en la subcuenca del río Grande (Figura 2.28 D). Si bien el promedio general del área cubierta por nieve se mantuvo en valores similares, la región bajo estudio experimentó una disminución en la duración de la cubierta de nieve durante la última década, con una tendencia negativa en el período 2000-2015.

En los sectores más elevados y protegidos de la radiación solar, la nieve persiste de un año para el siguiente y forma con el tiempo cuerpos de hielo. Dependiendo de las variaciones anuales de la precipitación nival y de la temperatura, los glaciares aumentan su masa con los años de nevadas invernales abundantes, mientras que sus volúmenes se reducen en los años secos.



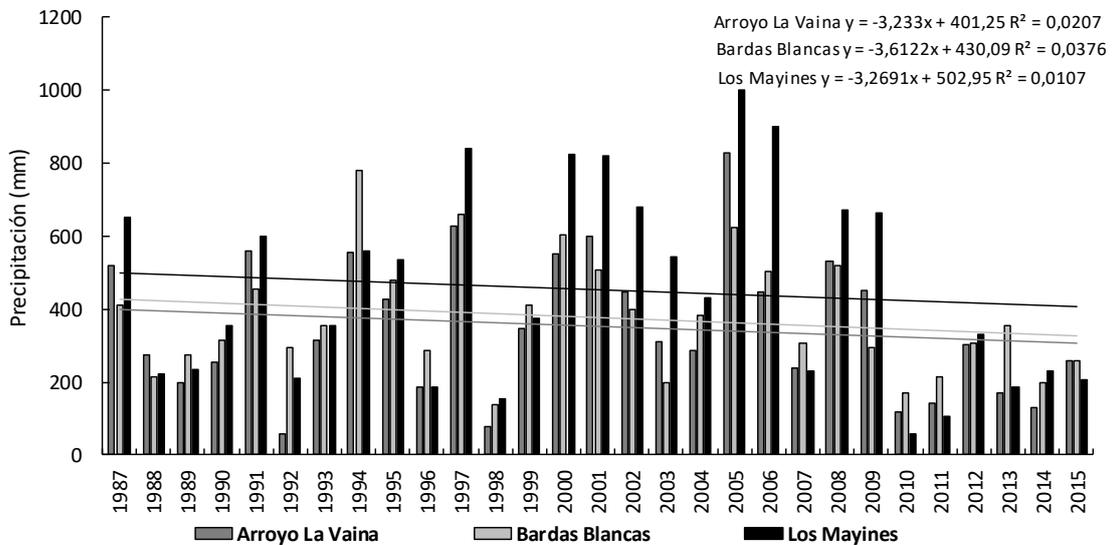
**Figura 2.28.** Área cubierta por nieve (km<sup>2</sup>) por año para cada una de las clases de permanencia: A) de 32 a 79 días, B) de 80 a 127 días, C) de 128 a 175 días y D) de 176 a 216 días. Con círculos negros llenos la subcuenca del río Grande y con cuadrados sin relleno la subcuenca del río Barrancas, y línea de tendencia en cada caso.

### 2.3. B2) PRECIPITACIÓN

#### Cuenca alta

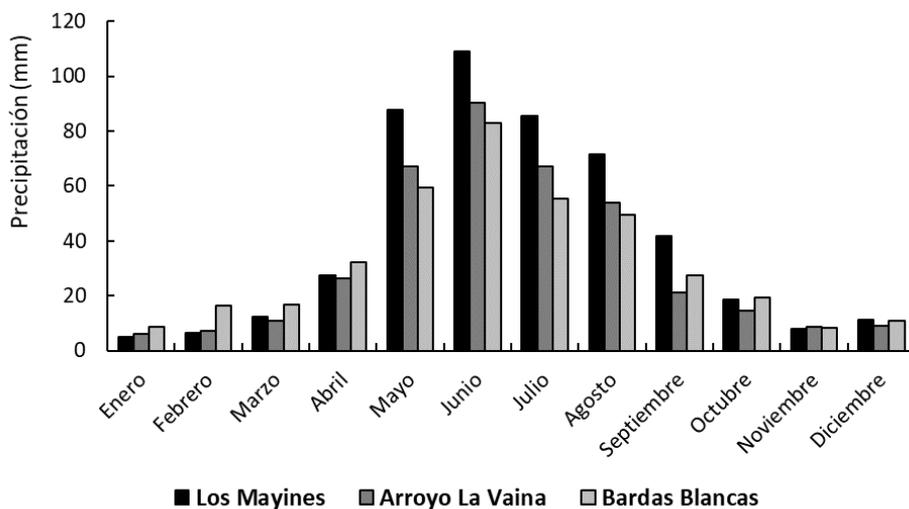
Las características del régimen de distribución de las precipitaciones en la cuenca alta pueden ser analizadas mediante los registros de las estaciones Los Mayines, Bardas Blancas y Arroyo La Vaina (Figura 2.29). Los registros indican que la precipitación anual promedio en Los Mayines es 462 mm con un desvío estándar de 269 mm, en Bardas Blancas 387 mm anuales siendo el desvío estándar de 159 mm y en la estación Arroyo La Vaina de 375 mm promedio

anuales con un desvío de 197 mm. Los valores máximos anuales registrados corresponden a 999 mm en la estación Los Mayines en 2005, 781 mm en la estación Bardas Blancas en 1994 y 828 mm en Arroyo La Vaina en el año 2005.



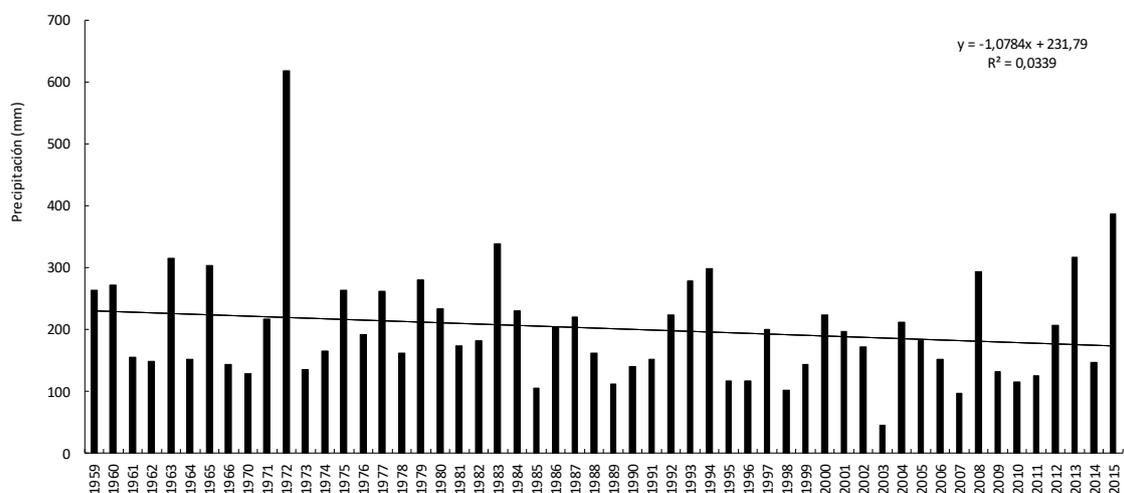
**Figura 2.29.** Precipitación total anual (mm) para el período 1987-2015 de las estaciones de la cuenca alta: Los Mayines (Mendoza), Arroyo La Vaina (Mendoza) y Bardas Blancas (Mendoza). Líneas de tendencia en líneas continuas y ecuaciones correspondientes.

En esta región, las mayores precipitaciones mensuales ocurren en el período invernal (mayo a septiembre) con picos mayores en junio, registrando este mes un promedio de 105 mm en Los Mayines, 85 mm en Arroyo La Vaina y 79 mm en Bardas Blancas, siendo a su vez el mes con mayor variación. El mes de menor precipitación es enero con promedios de 5,6 y 8 mm respectivamente (Figura 2.30).



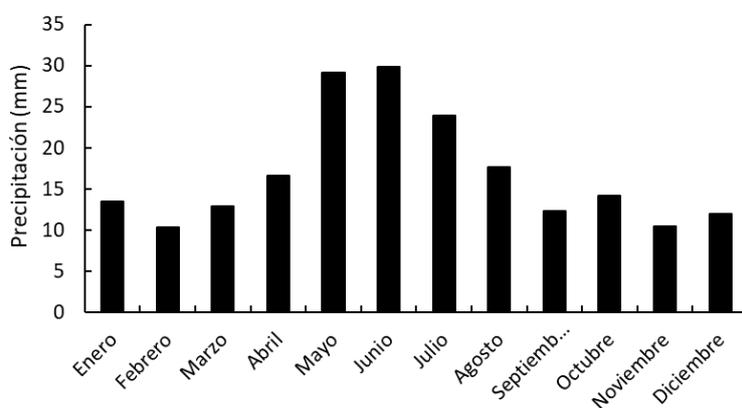
**Figura 2.30.** Precipitación media mensual (mm) para el período 1987-2015 de las estaciones Los Mayines (Mendoza), Arroyo La Vaina (Mendoza) y Bardas Blancas (Mendoza).

Siguiendo aguas abajo por la cuenca, en la estación Buta Ranquil, la precipitación total anual promedio es apenas superior a 200 mm y el desvío estándar es de 89 mm (Figura 2.31). El año de mayor precipitación fue 1972, seguido por 2015 con 91 % de precipitación por encima de la media. En los años 2003 y 1998 la precipitación fue menor, llegando apenas al 22 % y 50 % anual, respectivamente. En los últimos 15 años, apenas 6 años superaron el promedio anual de precipitaciones correspondiendo a un período más seco que al comienzo de la serie y por lo tanto se muestra una tendencia negativa de las precipitaciones (Figura 2.31).



**Figura 2.31.** Precipitación media anual (mm) para el período 1959-2015 de la estación Buta Ranquil (Neuquén) y línea de tendencia.

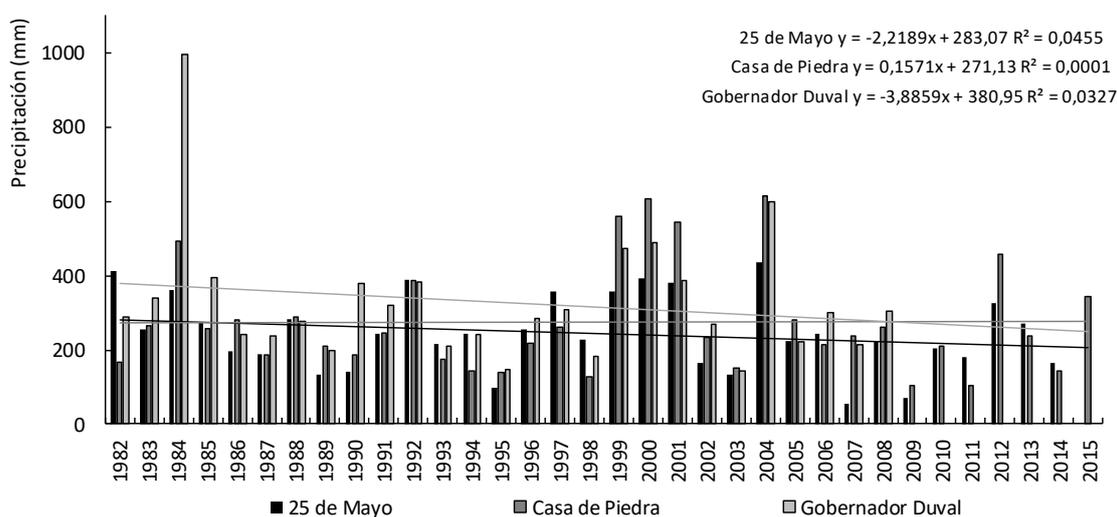
En Buta Ranquil, se evidencia el mismo patrón de distribución anual de la precipitación que en las estaciones analizadas anteriormente, donde las mayores precipitaciones ocurren en los meses de junio, mayo y julio, y mínimas en los meses de noviembre a febrero (Figura 2.32). El mes de mayo es el que presenta mayor variación, siendo el menos variable el mes de febrero.



**Figura 2.32.** Precipitación media mensual (mm) para el período 1959-2015 de la estación Buta Ranquil (Neuquén).

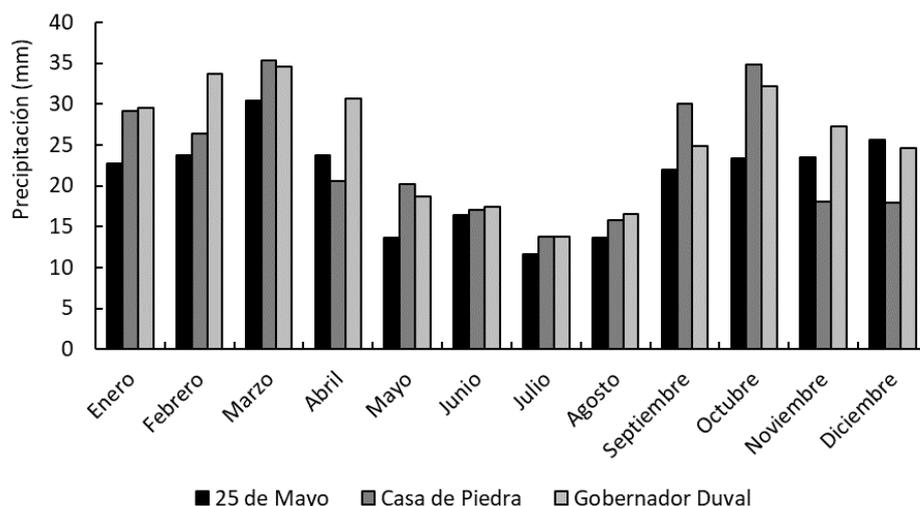
## Cuenca media alta

Las estaciones de 25 de Mayo, Casa de Piedra y Gobernador Duval en la provincia de La Pampa, se consideran representativas del comportamiento de la precipitación en la cuenca media alta del río Colorado (Figura 2.33), en la que las condiciones climáticas corresponden a un clima semiárido de meseta y de planicies. Los valores pluviométricos totales anuales en los períodos de medición son de 252 mm y 274 mm en 25 de Mayo y Casa de Piedra, respectivamente, y de 317 mm en Gobernador Duval. La variabilidad de los montos anuales es alta, con desviaciones respecto de la media de 92, 146 y 147 mm para las mismas estaciones.



**Figura 2.33.** Precipitación media anual (mm) para el período 1963-2015 de las estaciones de la cuenca media: 25 de Mayo (La Pampa), Casa de Piedra (La Pampa) y Gobernador Duval (La Pampa). Líneas de tendencia y ecuaciones correspondientes.

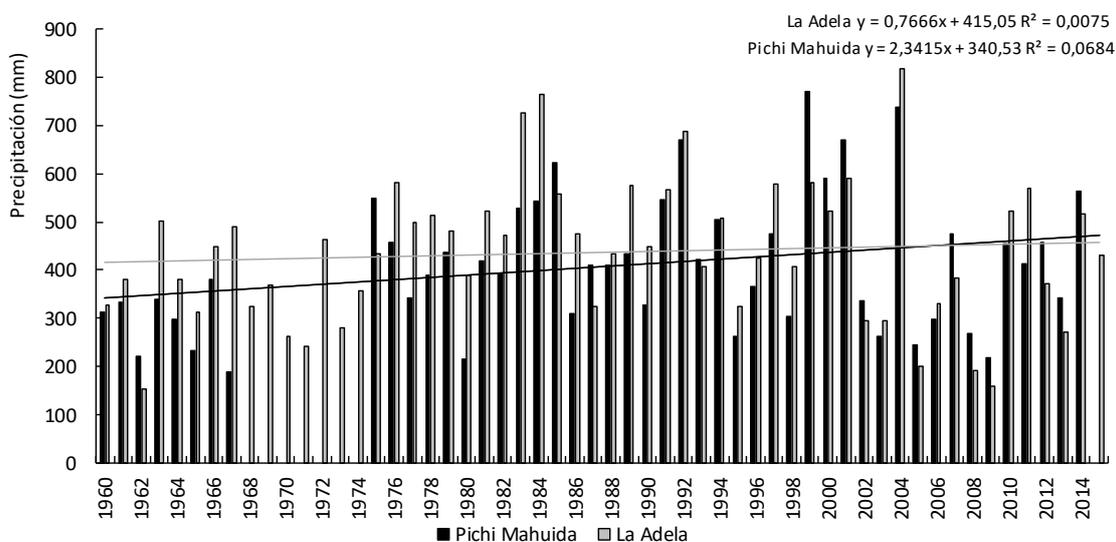
El patrón de distribución estacional de la precipitación cambia respecto al manifestado por las estaciones de la cuenca alta, ya que la evolución de la precipitación mensual media muestra los menores valores en los meses de mayo a agosto (época invernal) (Figura 2.34). Típicamente, los meses más lluviosos son los de marzo y abril. Con registro menos extenso, la estación Casa de Piedra presenta también los menores valores mensuales entre mayo y agosto.



**Figura 2.34.** Precipitación media mensual (mm) para el período 1982-2015 de las estaciones de la cuenca media alta: 25 de Mayo (La Pampa), Casa de Piedra (La Pampa) y Gobernador Duval (La Pampa).

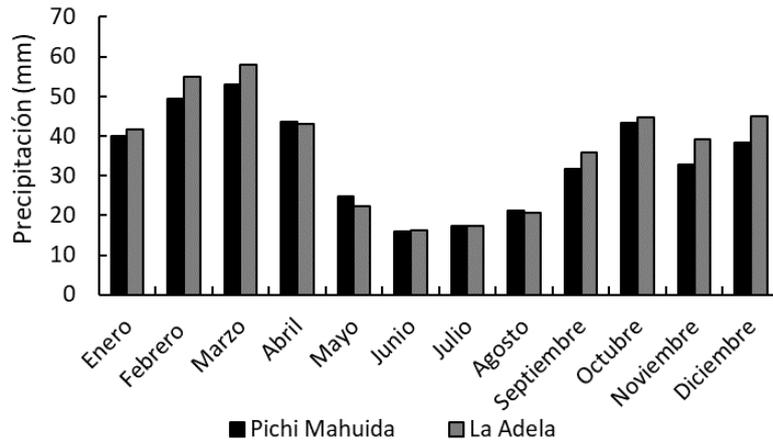
### Cuenca media baja

Las estaciones de Pichi Mahuida y La Adela en la provincia de La Pampa, corresponden a la cuenca media baja del río Colorado. En Pichi Mahuida la precipitación media anual es de 415 mm (Figura 2.35), con un desvío estándar respecto a la media de 140 mm y en La Adela, el valor total anual medio es de 436 mm y el desvío de 147 mm.



**Figura 2.35.** Precipitación total anual (mm) en las estaciones de la cuenca media baja: Pichi Mahuida (La Pampa) y La Adela (La Pampa), en el período 1960-2015. Líneas de tendencia y ecuaciones correspondientes.

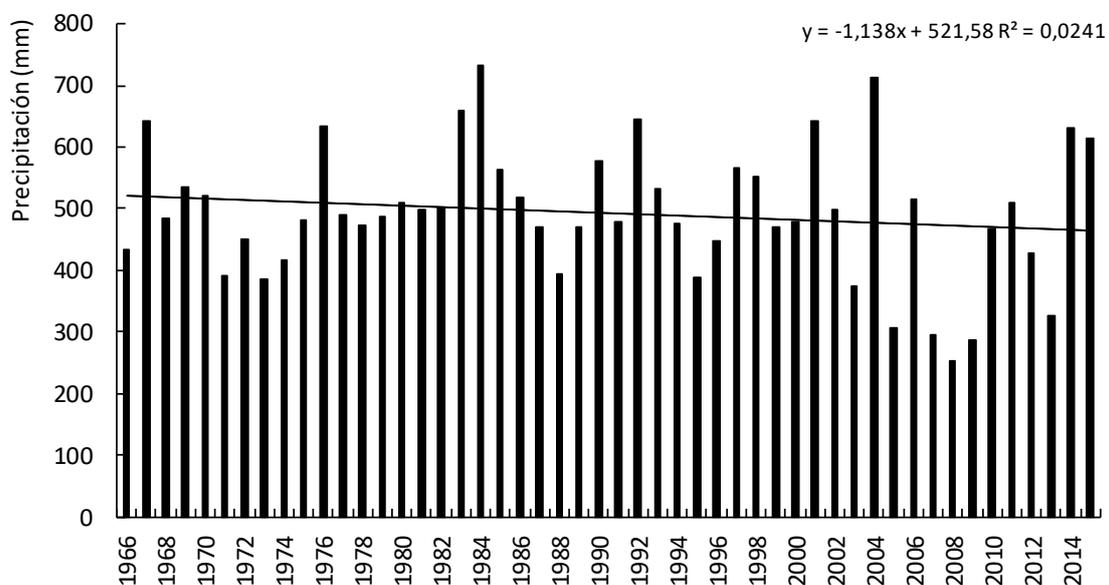
En estas estaciones, que se corresponden con la cuenca media baja del río Colorado, el período de mayor precipitación se presenta en los meses de primavera y verano (septiembre a abril) con las mayores cuantías en marzo, con 58 mm, siendo los meses de junio, julio y agosto los meses de menor precipitación, con menos de 20 mm mensuales (Figura 2.36).



**Figura 2.36.** Precipitación media mensual (mm) para el período 1960-2015 de las estaciones de la cuenca media baja Pichi Mahuida (La Pampa) y La Adela (La Pampa).

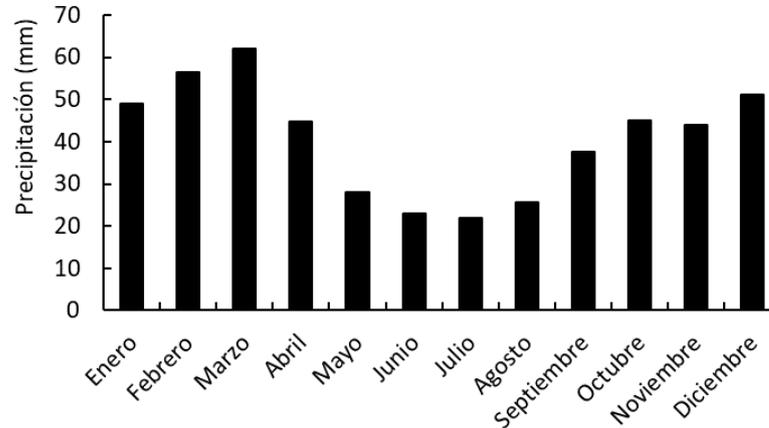
### Cuenca baja

En la cuenca baja del río Colorado, en Hilario Ascasubi, la precipitación total es mayor respecto de las estaciones antes analizadas, con un promedio total anual de 494 mm. En 1984 y 2004 la precipitación superó al promedio en 46 y 44 % respectivamente, y durante 2008 el total anual fue menor que el promedio en 51 % (Figura 2.37).



**Figura 2.37.** Precipitación total anual (mm) en la estación Hilario Ascasubi (Buenos Aires) en el período 1966-2015. Línea de tendencia y ecuación correspondiente.

Respecto a la distribución anual de las precipitaciones, Hilario Ascasubi presenta el mismo comportamiento que las estaciones presentadas anteriormente, mostrando los mayores valores los meses de primavera y verano, particularmente en marzo, con 62 mm promedio y menores en invierno, en el mes de junio con 23 mm (Figura 2.38).



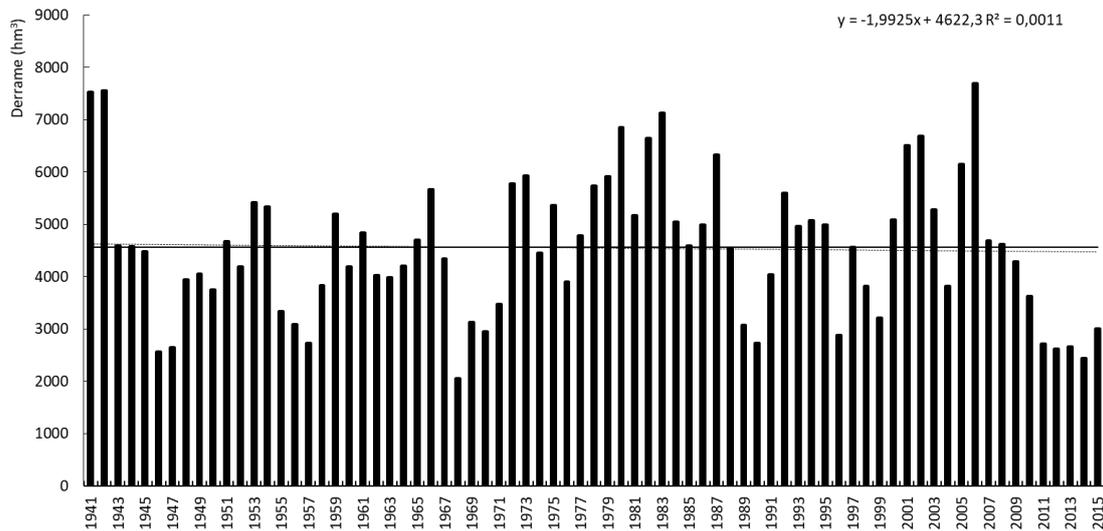
**Figura 2.38.** Precipitación media mensual (mm) para el período 1966-2015 de la estación Hilario Ascasubi (Buenos Aires).

### 2.3 B3) CAUDAL

El régimen hídrico del río Colorado se caracteriza como fuertemente estacional, producto de que la alimentación preponderante corresponde a la fusión nival originada en la cuenca activa, cuenca alta que corresponde a las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas (COIRCO, 2013).

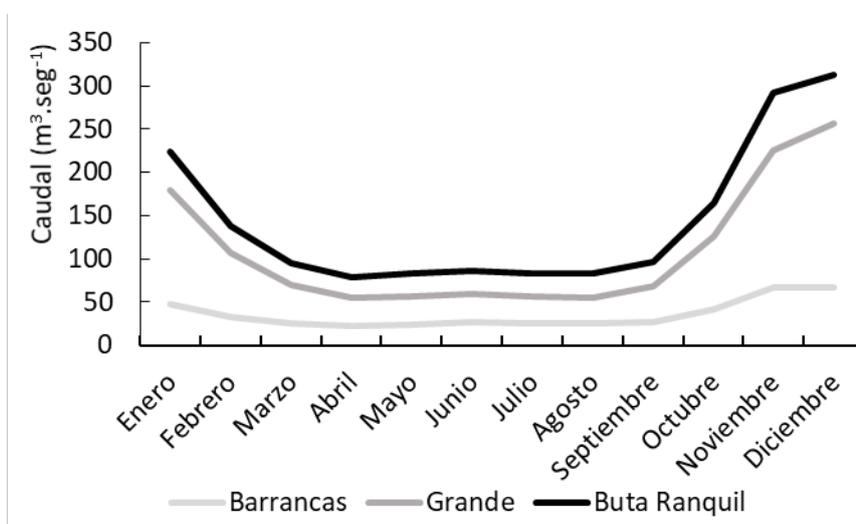
La cuenca del río Colorado presenta un derrame anual promedio de 4679 hm<sup>3</sup>, con un máximo de 7696 hm<sup>3</sup> en 2006 y un mínimo de 2058 hm<sup>3</sup> en 1968. Puede observarse una tendencia negativa en el derrame del río Colorado, habiéndose registrado en los últimos siete años de análisis, valores de derrame por debajo del promedio histórico (Figura 2.39).

Las crecidas se presentan en el período octubre/marzo y los caudales medios diarios, alcanzan valores máximos y mínimos de 1053 y 30 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, respectivamente, para la estación Buta Ranquil.



**Figura 2.39.** Derrame medio anual ( $\text{hm}^3$ ) en la estación la estación Buta Ranquil (Neuquén) en el período 1940-2015. Línea en color negro promedio y línea de tendencia punteada y ecuación correspondiente.

Los caudales promedios mensuales del río Barrancas en la estación Barrancas (Neuquén), del río Grande en La Gotera (Mendoza), del río Colorado en Buta Ranquil (Neuquén), tienen un comportamiento similar, con máximos en el período estival y mínimos en otoño – principios de invierno (Figura 2.40). No obstante, existe un ligero adelantamiento en los máximos medios mensuales en la estación Barrancas. En la estación La Gotera y en Buta Ranquil, el máximo se registra en diciembre con  $256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  y  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente, mientras que en el Barrancas en noviembre con  $67 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . El caudal mínimo en abril con  $55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en La Gotera,  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en la estación del río Barrancas, y  $78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en Buta Ranquil. Los caudales anuales del río Barrancas aportaron un 25 % de los caudales observados en Buta Ranquil, mientras que los caudales del río Grande en La Gotera significaron un 71 % de los caudales anuales en la estación.

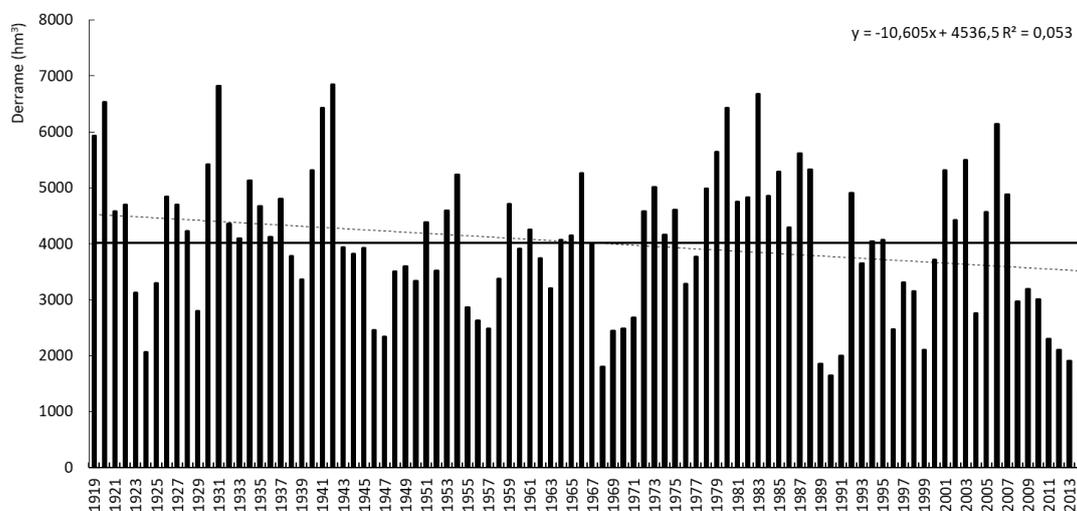


**Figura 2.40.** Caudal medio mensual ( $\text{m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ ) del río Barrancas en la estación Barrancas (Neuquén), del río Grande en la estación La Gotera (Mendoza), y del río Colorado Buta Ranquil (Neuquén), para el período 1976-2015.

A nivel de caudales mensuales, estas diferencias (entre las sumas de caudales en Barrancas y La Gotera respecto a Buta Ranquil), tienen valores mínimos en los meses de diciembre y enero con 2 %, y máximas en mayo y julio con el 10 %. Precisamente las diferencias máximas se producen en el periodo donde se tienen las mayores precipitaciones en la región. Se observaron importantes crecidas puntuales fuera del período octubre-febrero, motivadas por precipitaciones en la cuenca alta, como la ocurrida en el mes de mayo de 2008 (102,7 mm en Buta Ranquil, 139 mm en La Gotera y 296 mm en Los Mayines), y otra también con importantes valores puntuales a principios de mayo de 1993.

Se considera que el río Grande tiene alimentación nival prácticamente exclusiva, mientras que el río Barrancas es alimentado por una cuenca de transición entre las nivales puras, ubicadas más al Norte, y las pluvionivales del sur (COIRCO, 2013). Las crecidas observadas con origen pluvial (mayo de 1993 y 2008) han evidenciado la importancia de las lluvias en ambas subcuencas respecto a la generación de crecidas. La incidencia porcentual de las lluvias en el derrame anual, tanto del río Barrancas como del Grande, es muy inferior al aporte por fusión de nieve (Halcrow, 2013). Así el régimen hídrico del derrame del río Colorado puede ser caracterizado como fuertemente estacional, producto de la alimentación preponderante correspondiente a la fusión nival originada en la cuenca alta, combinado con precipitaciones intensas que pueden provocar crecidas de importantes caudales máximos, pero de corta duración relativa.

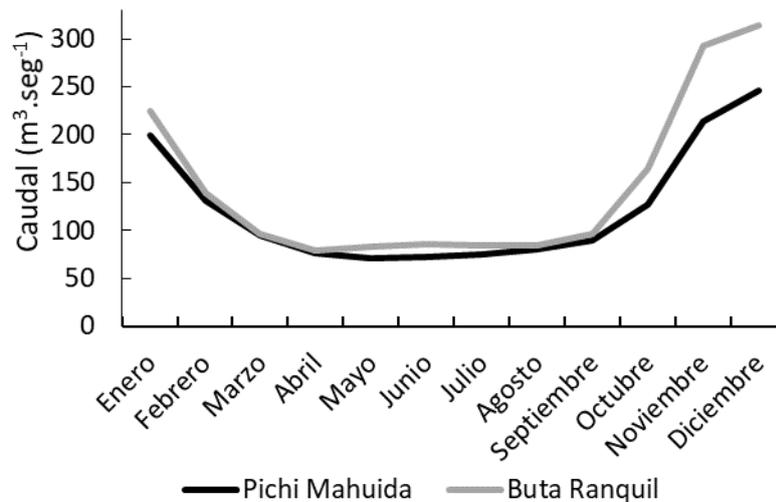
Aguas abajo de Buta Ranquil, el río Colorado sólo recibe cursos intermitentes como el río Curacó y algunos cañadones como el Desfiladero Bayo, poco relevantes regionalmente, aunque puntualmente puedan llegar a tener crecidas con picos relevantes pero muy poca duración. En la cuenca media baja, la estación Pichi Mahuida (La Pampa) cuenta con una amplia serie de registro de caudal (Figura 2.41). El derrame medio anual es de 4022 hm<sup>3</sup> con máximo de 6852 hm<sup>3</sup> en el año 1942 y mínimo de 1440 hm<sup>3</sup> en el 2014. Puede notarse una tendencia negativa en el derrame, con los últimos siete años analizados por debajo de la media histórica.



**Figura 2.41.** Derrame promedio anual (hm<sup>3</sup>) en la estación la estación Pichi Mahuida (La Pampa) en el período 1919-2015. Línea en color negro promedio y línea de tendencia punteada y ecuación correspondiente.

Los caudales que escurren por la estación Pichi Mahuida se encuentran regulados a partir de julio de 1989, por la construcción de la presa-embalse de Casa de Piedra (La Pampa). Si bien se reduce la amplitud entre máximos y mínimos mensuales, la estacionalidad de los caudales se mantiene en gran medida. Para analizar el comportamiento hidrológico del río en esta sección, se utiliza el período de mediciones previo a dicha fecha, ya que entre las estaciones de Buta Ranquil y Pichi Mahuida se encuentra emplazada dicha obra. La presencia de este embalse, y su política de operación hacen que los eventos de crecidas sean amortiguados en su caudal máximo hacia aguas abajo, y en caso de períodos secos, se regula el caudal erogado aguas abajo para poder suministrar agua para riego la cuenca baja.

El caudal medio mensual en Buta Ranquil es siempre mayor respecto a Pichi Mahuida, con las mayores diferencias en los meses de octubre, noviembre y diciembre (Figura 2.42). El caudal medio anual en este período fue un 11 % menor en Pichi Mahuida ( $132 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) respecto a Buta Ranquil ( $149 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). En diciembre se registra el valor promedio mensual más alto, con  $258 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , y el más bajo en mayo con  $73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

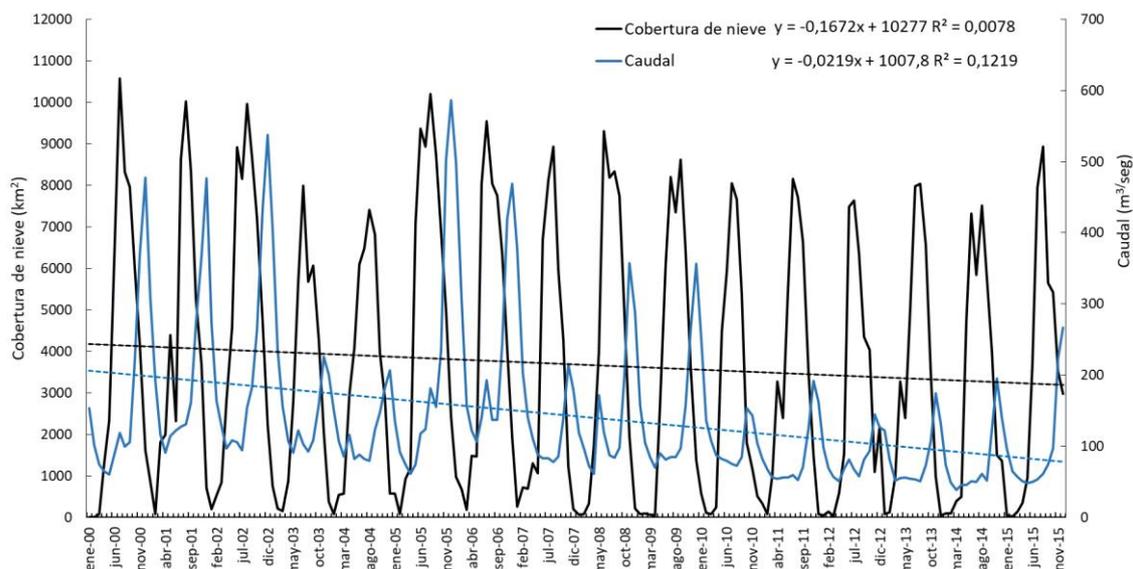


**Figura 2.42.** Caudal medio mensual ( $\text{m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ ) en las estaciones Buta Ranquil (Neuquén) y Pichi Mahuida (La Pampa) para el período 1940-1989.

Las diferencias enunciadas se justifican en las características de los suelos (en general arenosos a franco – arenosos), las características climáticas áridas y semiáridas de la región intermedia, y la distancia de 560 km entre las estaciones dentro de la zona hidrológica menos activa de la cuenca (Halcrow, 2013). Por ende, es posible señalar que la contribución del sector de la cuenca comprendido entre Buta Ranquil y la desembocadura en el océano es muy poco significativa. El análisis realizado confirma que los caudales medios que escurren por el río Colorado evidencian un marcado período de mayor caudal entre los meses de octubre y febrero, principalmente en diciembre, estando fuertemente caracterizado su régimen por los aportes provenientes del derretimiento de nieve en su cuenca alta.

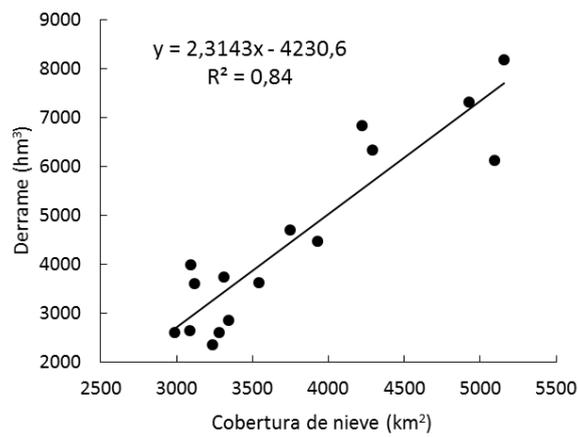
### B 3.1) Relación entre la cobertura de nieve estimada en la cuenca alta y el derrame

Los resultados de la cobertura media mensual estimada mediante el producto de MODIS muestran una tendencia de disminución en la extensión de la cubierta de nieve en la serie de años analizada, 2000-2015 (Figura 2.43). El mismo comportamiento lo presenta el caudal medio mensual registrado en la estación Buta Ranquil, primera estación de aforo del río Colorado, en la cual fluyen los ríos Grande y el Barrancas, especialmente durante los últimos 5 años.



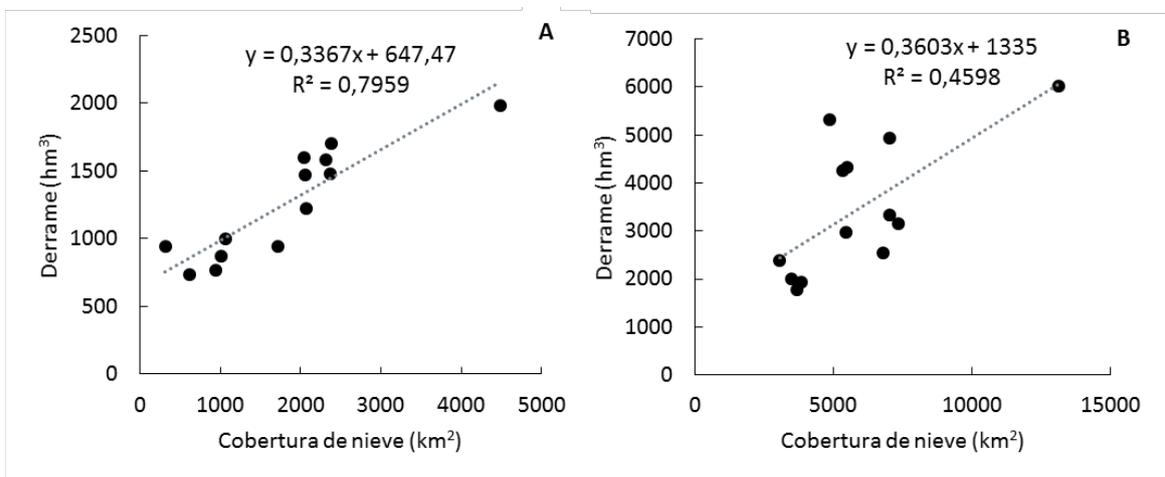
**Figura 2.43.** Cobertura de nieve media mensual ( $\text{km}^2$ ) (negro) y caudal medio mensual ( $\text{m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ ) (azul) en la cuenca alta del río Colorado desde 2000 a 2015. Líneas de tendencia con líneas punteadas y ecuaciones correspondientes.

Existe una relación directa entre el derrame anual de la estación Buta Ranquil y el área cubierta por nieve promedio por año para toda la cuenca alta del río Colorado (Figura 2.44). En el caso de los años secos, la cobertura de nieve registró valores entre  $2900$  y  $3500 \text{ km}^2$  con derrames por debajo del promedio ( $4600 \text{ hm}^3$ ). Cabe resaltar que los 2003 y 2010 obtuvieron similar cobertura de nieve, pero el derrame registrado tuvo diferencias de  $1500 \text{ hm}^3$ . Existen años donde las nevadas fueron superiores a los años normales, es el caso de los años 2000, 2002 y 2005, y también sucede que, ante similares coberturas de nieve estimadas el derrame varía ampliamente. Esto puede deberse a sobreestimaciones del área cubierta por nieve, o a precipitaciones que hayan aportado de manera significativa al caudal.



**Figura 2.44.** Derrame anual del río Colorado (hm<sup>3</sup>) en la estación Buta Ranquil en función de la cobertura de nieve (km<sup>2</sup>) estimada mediante MOD10A2, desde 2000 a 2015.

Además, se encontró que existe una relación directamente proporcional entre el derrame anual y el área cubierta por nieve en cada una de las subcuencas bajo análisis (Figura 2.45 A y B). El mejor ajuste se obtuvo en la subcuenca del Barrancas (Figura 2.45 A), y el menor ajuste entre cobertura estimada y derrame en la del Grande, lo que podría deberse a que la estación de aforo de este último se encuentra en su cuenca media y no estaría registrando todo el caudal de la subcuenca del Grande. En todas las correlaciones existió un punto máximo de cobertura de nieve que corresponde al año 2005, aunque el caudal de ese período no registró el mismo aumento, pero sí se registró en el período siguiente. Por tanto, la reducción del área cubierta por nieve tiene efecto directo sobre el caudal del río, salvo en el caso del ciclo hidrológico 2006-2007, donde la cobertura de nieve se ve reducida y su derrame tuvo valores altos (6851 hm<sup>3</sup>), lo que podría deberse a un efecto de tipo retardado por la acumulación de nieve en el ciclo anterior.

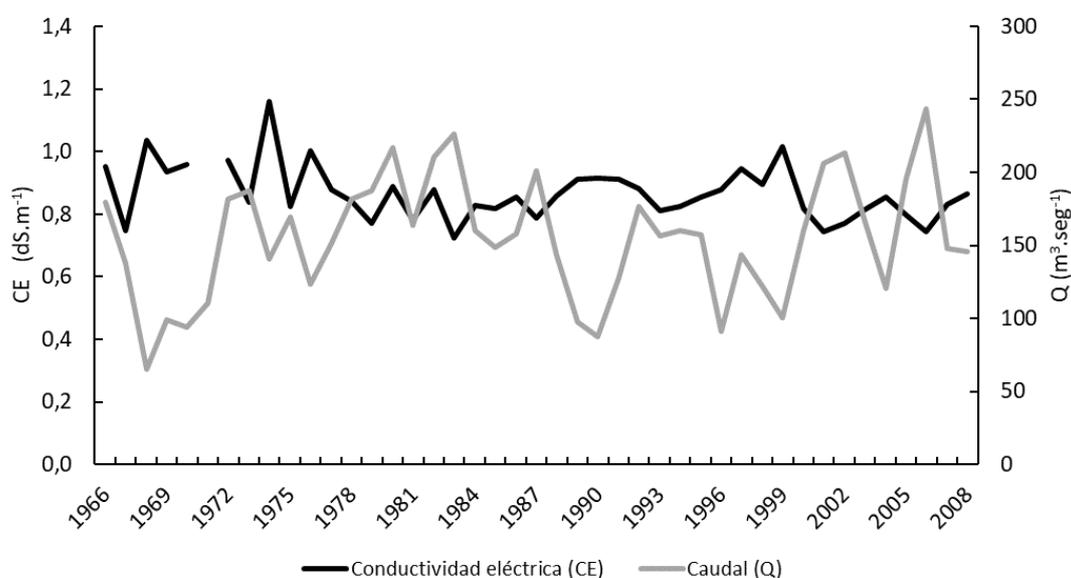


**Figura 2.45.** Relación del área cubierta por nieve (km<sup>2</sup>) de 176 a 216 días y el derrame anual (hm<sup>3</sup>) en el período julio de 2000 a julio de 2016. A) Subcuenca del Barrancas y derrame del río Barrancas en la estación Barrancas, B) subcuenca del Grande y derrame del río Grande en la estación La Gotera.

### B 3.2) Calidad de agua para riego: relación caudal-salinidad.

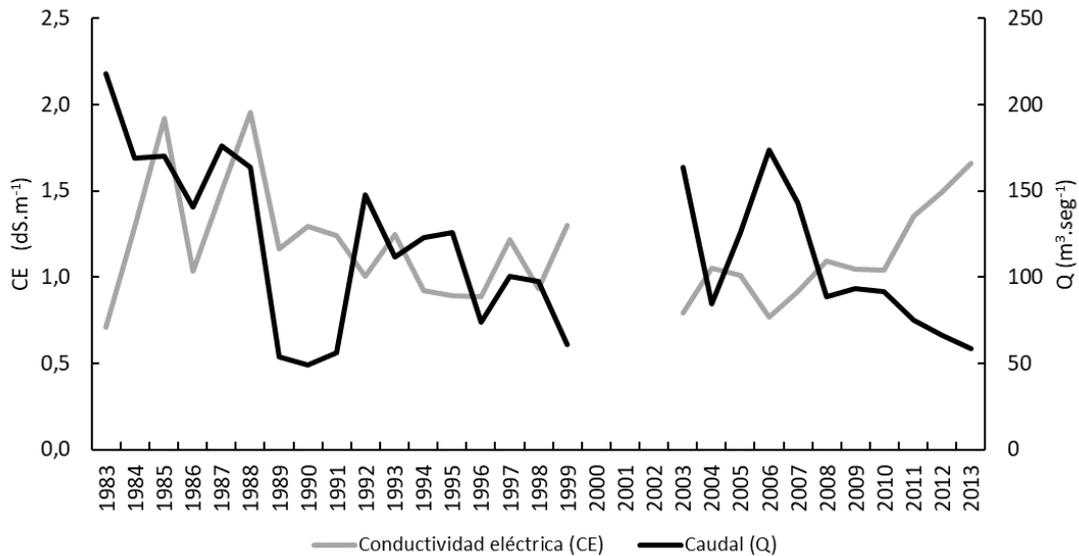
El Programa Único de Distribución de Caudales y Habilitación de Áreas de Riego del río Colorado, firmado en 1976, evaluó la distribución de caudales por provincia, teniendo en cuenta la restricción de salinidad del agua. La conductividad eléctrica (CE) fue una de las variables tenidas en cuenta para la distribución del agua destinada para riego tomando como límite máximo el valor de  $1,8 \text{ ds.m}^{-1}$ .

A partir de la evaluación y análisis del registro histórico de Punto Unido (PU) (La Pampa) y Paso Alsina (PA) (Buenos Aires), que se corresponden con las entradas a las áreas bajo riego más importantes de la cuenca, en términos generales se observó una relación inversamente proporcional entre el caudal y la CE (Figura 2.46). En PU los valores medios anuales de CE rondan entre  $0,7$ - $1,2 \text{ ds.m}^{-1}$ , alcanzando los valores máximos en 1974 y 1999. Los valores de caudal máximos registrados corresponden a diciembre de 1982 y el segundo máximo histórico se alcanzó en mayo de 2008, esto coincide con informes de COIRCO (2015).



**Figura 2.46.** Conductividad eléctrica ( $\text{ds.m}^{-1}$ ) y caudal medio anual ( $\text{m}^3.\text{seg}^{-1}$ ) para el período 1965-2009 en la estación Punto Unido (La Pampa).

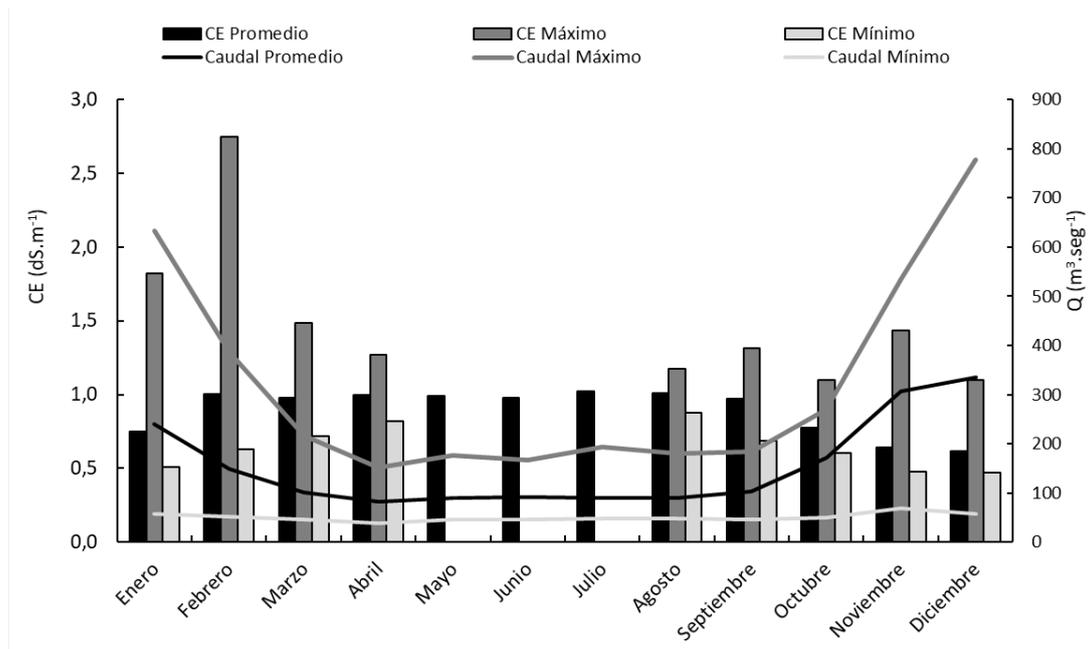
En PA los valores de CE promedio anual rondan entre  $1,0$ - $1,7 \text{ ds.m}^{-1}$ , alcanzando valores máximos en 1988 con  $1,96 \text{ ds.m}^{-1}$  y en 2013 con  $1,66 \text{ ds.m}^{-1}$  (Figura 2.47). Si se toma en cuenta el período común de medición en ambas estaciones (1983-2009) puede observarse que, en todos los años, la CE promedio anual es mayor en la estación de aforo de PA, por lo que la salinidad del agua para riego en CORFO puede ser una limitante para el desarrollo de algunos cultivos o se necesitaría de prácticas de manejo que aseguren la sustentabilidad de esos sistemas.



**Figura 2.47.** Conductividad eléctrica (ds.m<sup>-1</sup>) y caudal medio mensual (m<sup>3</sup>.seg<sup>-1</sup>) para el período 1982-2013 de la estación Paso Alsina, con interrupción entre 2000 y 2013.

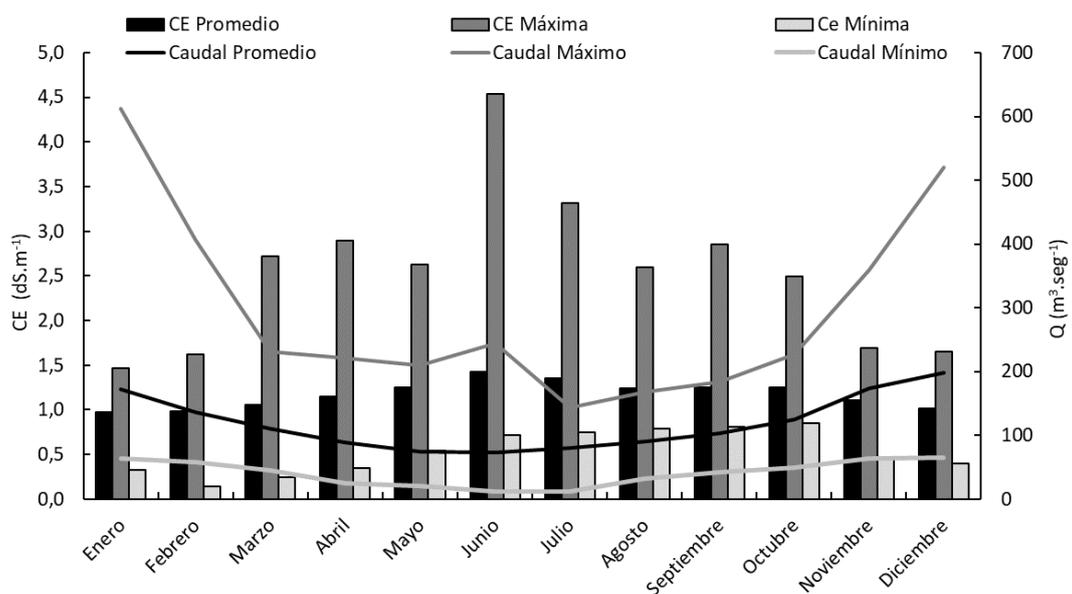
La CE presenta variaciones a lo largo del año, y con ello la calidad del agua. En términos generales, la CE se reduce con la crecida debido a la fusión nival (entre octubre y febrero), presentando los valores más bajos de CE específicamente en noviembre, diciembre y enero, y se incrementa con los bajos caudales los restantes meses. En la estación PU, durante el año, los valores promedio oscilan entre 0,6 y 1,0 ds.m<sup>-1</sup>, aunque se debe tener en cuenta que se han registrado en la serie analizada, valores máximos que fluctúan entre 1,1-2,7 ds.m<sup>-1</sup> (Figura 2.48). El río Colorado presenta crecidas en su caudal en los meses de octubre o noviembre, y se extienden hasta los meses de enero o febrero. Si se observan los valores máximos de caudal, se encuentra que existieron crecidas entre los meses de enero y febrero, que se deben a crecidas pluviales. Según informes de COIRCO (2015), estas crecidas pueden alcanzar caudales instantáneos importantes, aunque el derrame asociado no es significativo.

PU presenta los mayores valores mensuales de caudal y menores valores de CE, respecto a PA, para el período 1982-2009, con una relación inversamente proporcional bien marcada entre ambas variables (Figura 2.45). Esto genera menores restricciones para el sistema bajo riego en la cuenca alta del río Colorado, con valores de CE que no superan 1,0 ds.m<sup>-1</sup>. En ambos casos el máximo caudal se registra en el mes de diciembre y los más bajos en los meses de julio y junio.



**Figura 2.48.** Conductividad eléctrica ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) y caudal ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ), valores promedios, máximos y mínimos mensuales de la estación Punto Unido, para el período 1965-2009.

En la Figura 2.49, se observan los valores mínimos, promedios y máximos mensuales de caudal y CE, para la estación PA, correspondiente al período 1982-2013. Los valores más bajos de CE se presentan en enero, febrero y marzo. En promedio, durante el año los valores oscilan entre 1,0 y 1,4  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , aunque se debe tener en cuenta que se han registrado, en la serie analizada, valores máximos que fluctúan entre 1,6-4,5  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ .



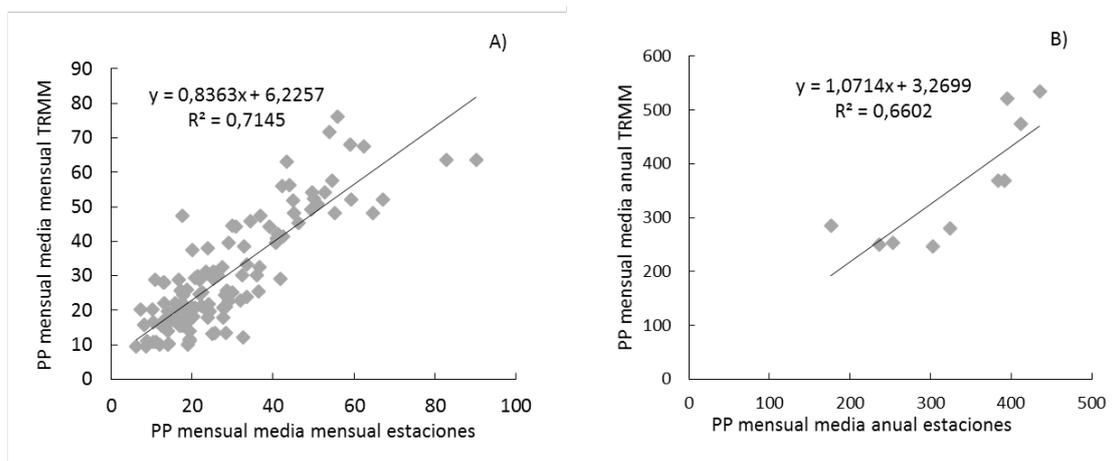
**Figura 2.49.** Conductividad eléctrica ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) y caudal ( $\text{m}^3\cdot\text{seg}^{-1}$ ), valores promedios, máximos y mínimos mensuales de la estación Paso Alsina, el período 1982-2013.

Los valores mensuales alcanzados (promedios, máximos y mínimos) en la cuenca baja (PA) son siempre superiores a los de la cuenca alta (PU), por lo que las restricciones de cultivos, y las exigencias en la performance de operación de los sistemas de riego aumentan. Cabe aclarar que los valores máximos alcanzados de CE corresponden al año 1987 en el que se tuvo aportes importantes por escurrimiento superficial del río Desaguadero-Salado-Chadileuvú-Curacó, con grandes aportes de sales al río Colorado en las proximidades de Pichi Mahuida (Perl, 2015).

Cotidianamente, en sistemas de riego gravitacional donde las láminas de riego aplicadas son superiores a los requerimientos de agua de los cultivos, se genera indirectamente el lavado de sales, por la baja eficiencia de aplicación del agua de riego. Ante cambios de aplicación de tecnologías de riego (presurizados) que aumenten la eficiencia de riego, una de las prácticas a utilizar sería lavados con riego excedentario, donde la cantidad de riego debe ser mayor que la demanda del cultivo, para permitir la movilización de sales en el perfil, siempre que se cuente con un sistema adecuado de drenaje (Ayers y Westcot, 1977).

### 2.3. C1) EVAPOTRANSPIRACIÓN

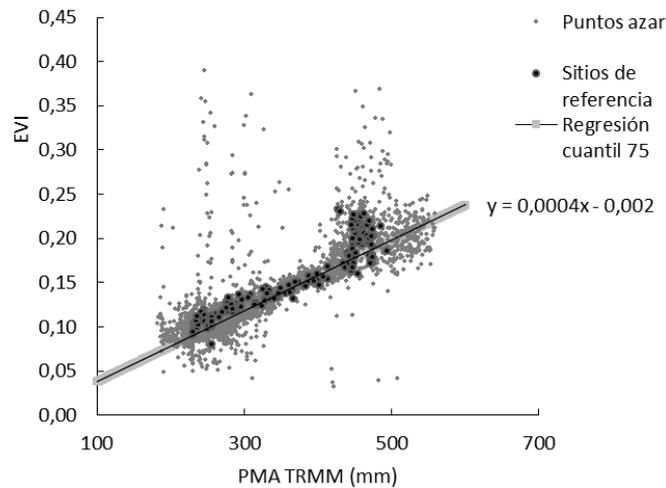
Se obtuvo una relación entre la precipitación registrada por las estaciones de la cuenca y la obtenida mediante imágenes TRMM con coeficientes de 0,71 y 0,66, para la precipitación media mensual (Figura 2.50 A) y media anual (Figura 2.50 B), respectivamente.



**Figura 2.50.** Relación entre los datos de precipitación (mm) de las estaciones meteorológicas de la cuenca y los datos de precipitación de TRMM (mm). A) Valores medios mensuales. B) Valores medios anuales.

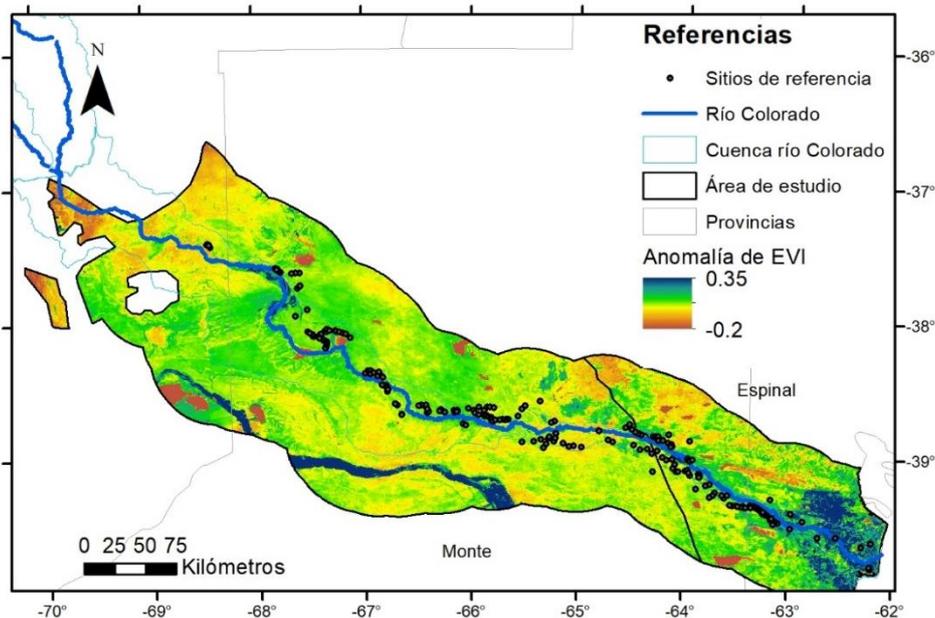
En la aplicación del modelo de equilibrio hidrológico planteado, se estableció una relación positiva entre los valores de EVI observados y la precipitación media anual (PMA) obtenida mediante imágenes TRMM (Figura 2.51). Los sitios ubicados por encima de la línea de ajuste corresponden a las anomalías positivas de EVI en las que la evapotranspiración media anual (ETMA) es igual a la PMA más los aportes extras de agua como riego o agua subterránea. Los sitios ubicados por debajo de la línea de dicha relación corresponden a las anomalías

negativas de EVI, en las que parte de la PMA se pierde por escurrimiento, evaporación directa o drenaje profundo.

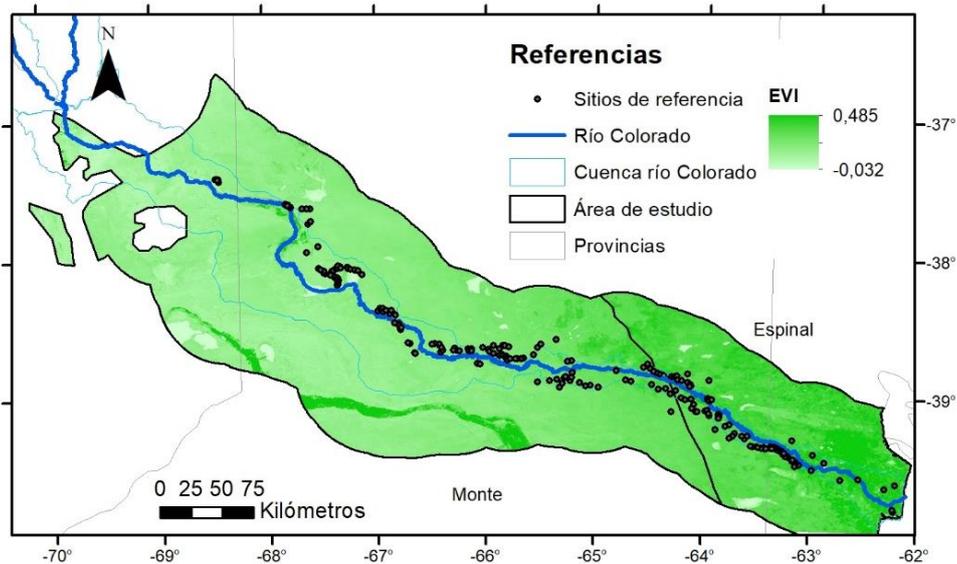


**Figura 2.51.** Relación entre el EVI y la PMA con datos de TRMM para el área de estudio. La línea de ajuste PMA-EVI se corresponde al cuantil 75.

En la Figura 2.52 se muestra un mapa de las anomalías de EVI en el área de estudio. Aunque la mayor parte de la región muestra un patrón generalizado de anomalías ligeramente negativas de EVI, los grupos de anomalías de EVI altamente positiva fueron especialmente evidente en la porción más seca de la región (Figura 2.52). Las anomalías positivas de mayor magnitud están asociadas a los oasis de riego, en torno a los ríos Colorado y Neuquén. Además, anomalías positivas de EVI en los sistemas naturales están vinculadas a los humedales y vegetación ribereña alimentados por aguas subterráneas cerca del curso principal de los ríos, correspondiendo estas zonas con los máximos valores de EVI (Figura 2.53).

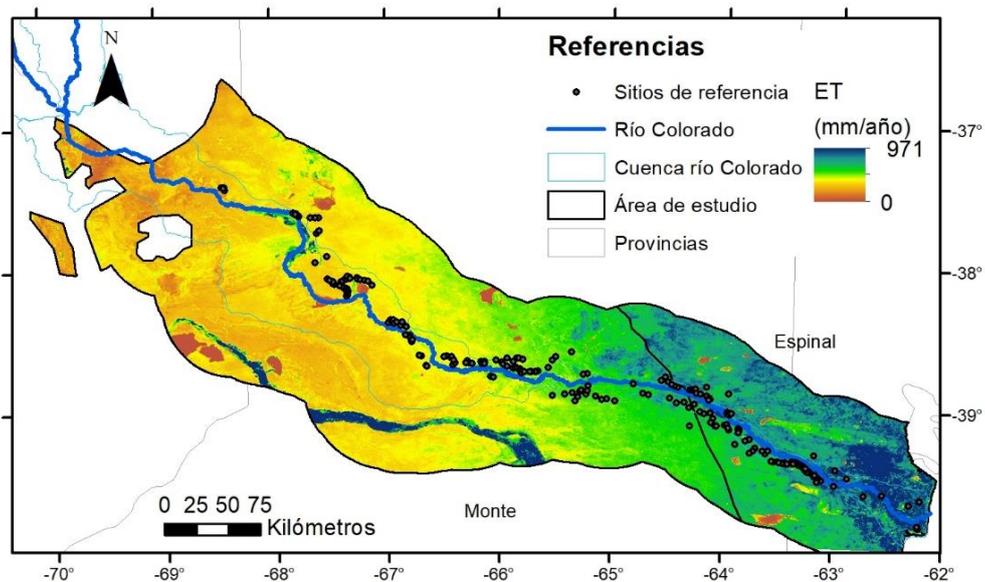


**Figura 2.52.** Anomalía del EVI para el área de estudio.



**Figura 2.53.** EVI promedio anual para la región de estudio.

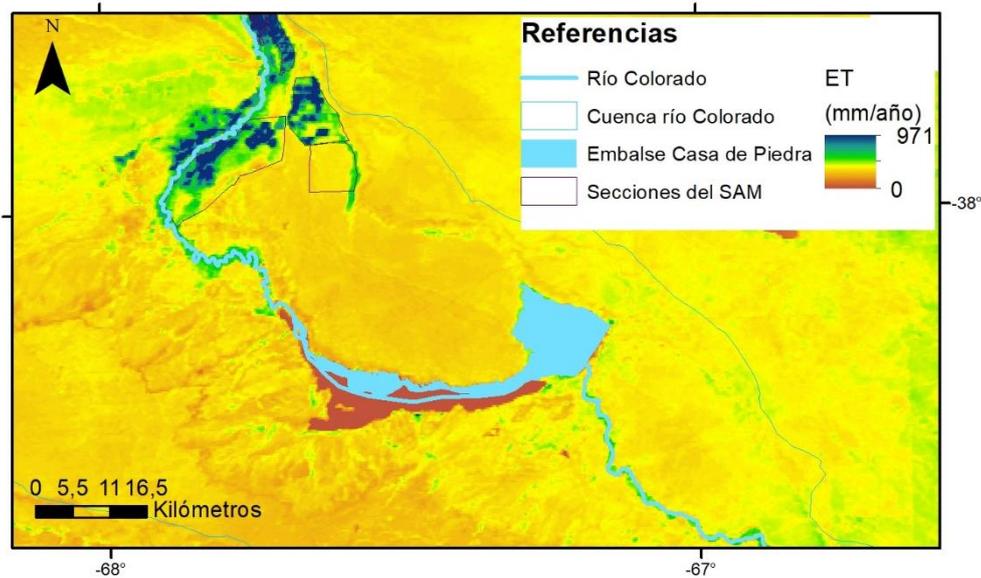
La ETMA de la cuenca varió entre valores extremadamente bajos correspondientes al suelo desnudo y vegetación natural de la cuenca media (provincia del Monte) y valores cercanos a 970 mm/año en áreas regadas del Valle Bonaerense del Río Colorado (provincia del Espinal) y las áreas bajo riego en el oeste de la provincia de La Pampa, con un promedio de 300 mm/año aproximadamente (Figura 2.54 y 2.55).



**Figura 2.54.** Evapotranspiración media anual estimada para el área de estudio.

Se observan las diferencias en los valores estimados de ETMA entre los oasis de riego, en este caso el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado (La Pampa) y las áreas

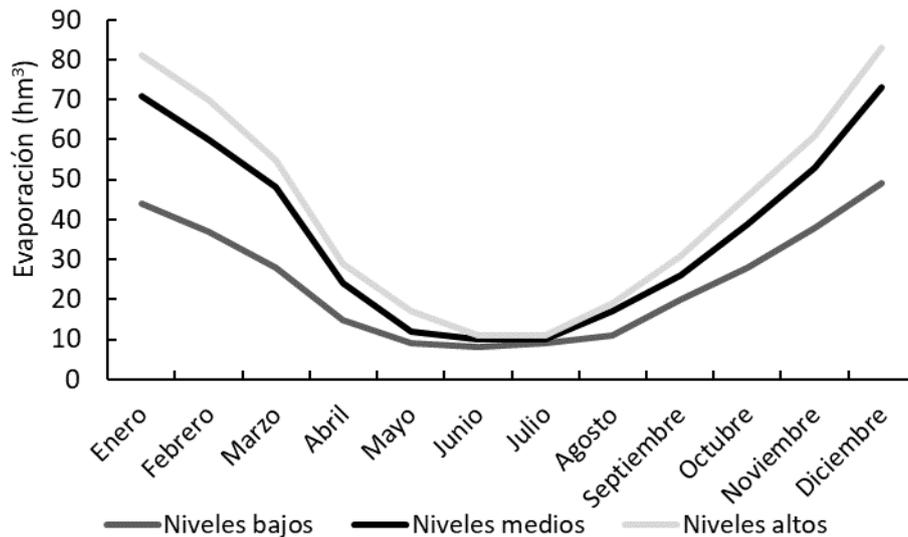
de vegetación natural del secano (Figura 2.5). Puede observarse que la vegetación en los oasis de riego, consume un volumen de agua suplementario aparte de la precipitación (PMA) que, en el caso del área de estudio es extraída del río Colorado.



**Figura 2.55.** Evapotranspiración media anual estimada para el área de estudio: Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado (SAM, La Pampa).

### 2.3. C2) EVAPORACIÓN

La evaporación total anual promedio del lago de Casa de Piedra (La Pampa) es de 415 hm<sup>3</sup>. La evaporación mensual mínima se registró en los meses de junio y julio, y la máxima evaporación ocurre en diciembre (Figura 2.56). Existe una diferencia de 37 hm<sup>3</sup> para el mes de diciembre entre los escenarios de bajo y alto nivel del embalse, lo cual significa el doble de pérdida de agua. A mayor abundancia de agua resultan mayores los niveles del agua en el embalse y por ende son también mayores las pérdidas por evaporación coincidiendo con Díaz (2013).



**Figura 2.56.** Evaporación mensual ( $\text{hm}^3$ ) del Lago de Casa de Piedra (La Pampa) para tres ciclos hidrológicos distintos.

### 2.3. C3) INFILTRACIÓN y EVAPORACIÓN CURSO DE AGUA

Se estimó que en promedio el agua que escurre por la sección de aforo de Buta Ranquil (Neuquén) llega a la Pichi Mahuida (La Pampa), donde los meses de primavera y verano son los que mayor pérdida presentan, debido a la alta demanda atmosférica y mayor caudal. En un año medio se perderían  $720 \text{ hm}^3$  de agua entre ambas secciones.

### 2.4. DISCUSIÓN

Mediante la utilización de sensores remotos, las capacidades de obtención de datos espaciales de cobertura de nieve han aumentado en los últimos años, permitiendo una continuidad espacio-temporal en el seguimiento. Los productos MODIS son ampliamente utilizados debido a su alta resolución temporal (Paudel y Andersen, 2011; Telesca *et al.*, 2014; Tahir *et al.*, 2015), aunque para el área bajo estudio existe la necesidad de mejorar la información relevada a campo, sobre densidad, espesor y humedad de la nieve.

En este trabajo se obtuvo una serie temporal de datos de cobertura de nieve para la cuenca del río Colorado. En Argentina, trabajos similares se llevaron a cabo por Cogliati *et al.* (2015) para la cuenca alta del río Neuquén y Cara *et al.* (2016) para la cuenca superior del río Mendoza. Sin embargo, no existían para la zona bajo estudio investigaciones sobre la dinámica y acumulación de la cobertura de nieve para toda la cuenca alta, y para una serie de tiempo de 16 años. Este análisis proporcionó mayor comprensión de los patrones espaciales y temporales de la cobertura de nieve.

Para la serie de años analizada, el año 2005 fue el que presentó mayor cobertura de nieve en ambas cuencas bajo estudio, lo cual coincide con los mayores valores de derrame

registrados por COIRCO durante el ciclo hidrológico 2005-2006 (7897 hm<sup>3</sup>) en la estación Buta Ranquil. Se encontraron resultados similares por Cogliati *et al.* (2015) en cuanto a mínimos y máximos de cobertura de nieve mensuales.

La relación entre la cobertura de nieve y la altimetría ha sido investigada por varios autores en otras cuencas. En esta investigación también se sumó la permanencia de la nieve o días en los cuales el suelo está cubierto por nieve. Los mapas obtenidos de permanencia de nieve para la serie bajo estudio (2000-2015) muestran que los sectores con mayor permanencia coinciden con la ubicación de los glaciares, los sectores más elevados, protegidos y de menor insolación de la cuenca. El 0,6 % de la cuenca del Grande está cubierta por glaciares, con un total relevado de 60,3 km<sup>2</sup> (Inventario Nacional de Glaciares, 2018), y se ubican sobre la zona noroeste, al límite con la Cordillera de los Andes.

La mayor variabilidad de cobertura de nieve corresponde a aquella menos permanente y se presenta en zonas más bajas con pendientes menores a 15°. Al ser estas capas de menor espesor, es esperable que fluctúen más rápidamente ante aumentos de temperatura. Según Ault *et al.* (2006) la fiabilidad del producto MOD10A2 es considerablemente más baja cuando la capa de nieve es delgada o se distribuye de forma discontinua; lo que podría estar ocurriendo en los sitios de nieve no permanente, o, dicho en otras palabras, con mayores variaciones de cobertura, que corresponden con las zonas más bajas de las cuencas. En el área analizada los mayores errores en la estimación de la cobertura de nieve podrían presentarse en zonas donde el área cubierta de nieve es variable, o muy pequeña, ya que la resolución espacial de los sensores MODIS (500 m) no puede detectar pequeñas áreas de cobertura nívea, siendo la resolución espacial de las escenas analizadas la que afectaría al producto final obtenido (Cogliati *et al.*, 2015).

El análisis de la cobertura de nieve durante el período de fusión es muy importante para la estimación de los aportes de agua a toda la cuenca. En ese período la cobertura de nieve es menor y la respuesta de la nieve a los cambios de temperatura influye rápidamente en las áreas más bajas donde la cobertura de nieve presenta un espesor menor. Sería importante combinar este análisis con un producto de temperatura y/o variación de la isoterma de cero grados.

Aún no se han realizado validaciones en terreno para encontrar la precisión en la estimación del área cubierta por nieve tal como lo plantean Dahri *et al.* (2011) y Cartes (2009). Sin embargo, se relacionó la superficie cubierta por nieve estimada con el caudal medio mensual para las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas y el derrame del río Colorado. A partir de estas relaciones se pudieron determinar los ciclos secos y húmedos, la duración de los mismos, y con ello la variación de la calidad del agua a partir de la conductividad eléctrica.

El río Colorado se alimenta a partir de la fusión de la nieve de modo dominante. La altimetría y el escaso desarrollo de su área de aporte por sobre los 4250 m.s.n.m. determinan la falta de relevancia de los aportes que pueden corresponder a un desfase interanual de precipitaciones en la Cordillera central (Lascano y Villalba, 2007). Tal como indican trabajos realizados por Bruniard (1994), Lascano y Villalba (2005), Carrasco *et al.*, (2005) y Lascano y Villalba (2007), las diferencias de altura media entre cuencas tienen una importancia mayor a la latitud, como factor determinante del rango del ciclo anual de temperaturas. En el caso de la cuenca del río Grande presenta una altura media superior (3945 m.s.n.m.) a la del Barrancas (3786,4 m.s.n.m.). En relación a la pendiente y a la orientación, Salcedo (2011) para la cuenca del río Neuquén, identificó que la nieve localizada en las laderas con pendiente superior a 15°, en especial orientada al Norte, fusiona entre los meses de junio a septiembre; mientras que en

los sitios con pendiente por debajo de los 15°, la fusión de la nieve se intensifica del mes de octubre en adelante. En orientación norte, la máxima fusión se ubica en pendientes menor a 10°.

Otro de los ingresos de agua al sistema lo constituyen las precipitaciones. El análisis abarcó los gradientes naturales para la precipitación, su variabilidad anual e interanual. La distribución media obtenida indica la evolución de las precipitaciones anuales en la cuenca del río Colorado, en el rango de 200 a 1000 mm. La variabilidad de las precipitaciones en los valores totales mensuales y en los totales anuales es amplia, siendo ésta una característica distintiva de la cuenca, propia de regiones áridas y semiáridas. En el extremo occidental de la cuenca los valores totales anuales son superiores a 1000 mm, mientras que en el extremo oriental alcanzan los 450 mm luego de presentar una disminución en la región central a valores del orden de 200 mm anuales, debido fundamentalmente a las diferencias en el contenido de humedad del aire; que responden al aumento de la continentalidad.

La variabilidad de las precipitaciones (con tendencia negativa) y de la temperatura (con tendencia positiva) han ocasionado una disminución de las masas de hielo de la Cordillera, en consecuencia el retroceso de los glaciares se observa desde el siglo 19 (Boninsegna y Villalba, 2006). Su impacto en los caudales aún no es bien comprendido, pero indica la pérdida de una reserva de agua importante y de un mecanismo de regulación de los caudales también importante.

El caudal del río representa la función de respuesta o síntesis de todos los procesos que se verifican en la cuenca, en la región andina entre los 30° y 37° S está estrechamente relacionado con las precipitaciones durante el período invernal (Masiokas *et al.*, 2006) y con las variaciones de temperatura durante la marcha del ciclo anual o componente estacional. Por lo tanto, las fluctuaciones en las condiciones de estas variables pueden verse reflejadas en la magnitud y temporalidad de los escurrimientos (Lauro *et al.*, 2016). Los caudales se incrementan en la medida que aumenta la temperatura y disminuye el manto de nieve, alcanzando sus valores máximos mensuales medios en diciembre. La precipitación tiene sus máximos mensuales hacia fines de otoño y principios de invierno, contribuyendo al mantenimiento de los caudales en este período.

Tal como lo plantea Contreras *et al.* (2011), en áreas con poca disponibilidad de información, la estimación de la ETMA a escala regional mediante información satelital basada en principios ecológicos, es una herramienta valiosa que permite obtener grandes beneficios. Comprender el balance hídrico regional a partir de la PMA y la ETMA es fundamental para la estimación de las necesidades totales de agua de la vegetación nativa y los cultivos. En este sentido, en el caso de los cultivos es necesario un volumen de agua suplementario para cubrir sus demandas.

Al igual que lo encontrado en otras zonas áridas por numerosos autores (Baret *et al.*, 1989; Bannari *et al.*, 1995; Marsett *et al.*, 2006; Goirán *et al.*, 2012), debido a los niveles relativamente bajos de cobertura, puede ocurrir que la influencia de la respuesta espectral del suelo sea mayor que la respuesta espectral de la vegetación y esto genera ciertas dificultades de interpretación, y en la clasificación de los usos y coberturas del suelo. Los principales cambios se observaron entre Buta Ranquil y Casa de Piedra, cuenca media del río Colorado donde se intensificó la actividad petrolera y se expandió la agricultura bajo riego. Los principales factores causales de la degradación del suelo de relevancia en la región se deberían, principalmente, al

efecto negativo sobre la cobertura del suelo de caminos y picadas, locaciones y ductos y residuos contaminantes propios de la actividad petrolera (Vázquez Amábile, 2018).

Coincidiendo con Michelini (2010) no se ha alcanzado una verdadera unidad de cuenca que permitiera poner en marcha un proyecto de desarrollo único. Uno de los principales puntos radica en la falta de infraestructura, en cuanto a rutas pavimentadas que unan todos los pueblos ribereños de la cuenca, y de esta forma lograr la articulación del territorio en sentido oeste-este. Por otro lado, tampoco existen políticas comunes de desarrollo capaces de favorecer la interacción entre los núcleos urbanos y las áreas de regadío en la cuenca, a partir de las cuales se estimule, por ejemplo, la conexión entre regantes cuenca baja y cuenca alta.

En coincidencia con Boninsegna (2013), los datos climáticos e hidrológicos no son particularmente abundantes en la región cuyana de Argentina, y a partir de este estudio de tesis se identificó que la cuenca del río Colorado también dispone de escasos datos. Existe información climática e hidrológica, parcial, interrumpida y dispersa en varias instituciones lo cual implicó un esfuerzo considerable para llevar adelante la investigación. Por otra parte, la falta de registros actualizados de regantes, sus producciones y caudales utilizados en la provincia de La Pampa, generó que algunos parámetros utilizados deban tomarse de referencias teóricas, y que la superficie actual bajo riego, los métodos de riego utilizados y los cultivos desarrollados deban ser cuantificados y relevados para este trabajo.

## **2.5. CONCLUSIONES**

En cuencas de grandes extensiones, como la cuenca del río Colorado, donde existe además inaccesibilidad para la toma de datos sobre todo a fines del invierno y en primavera, la información derivada de sensores remotos es la única herramienta disponible para el seguimiento de la cobertura de nieve.

A partir de la estimación realizada con el producto de MODIS, pudo observarse que la cobertura de nieve en la cuenca del río Colorado es altamente variable en el espacio y el tiempo. La información provista por el sensor MODIS es una buena herramienta para caracterizar la cobertura de nieve, ya que su resolución temporal ayuda a tener una cartografía actualizada. Hasta el momento, este análisis representa la serie de tiempo más larga de cobertura de nieve, estimada mediante información satelital, para la cuenca del río Colorado. En un contexto de variabilidad climática, el uso de esta información constituye una valiosa herramienta para el monitoreo de la cobertura de nieve de forma periódica en tiempo real, en grandes extensiones de baja accesibilidad.

La aplicación de la metodología permitió definir, desde las imágenes de SRTM, parámetros que describen el terreno de la cuenca, siendo la pendiente y orientación los primeros derivados del MDE. Las cuencas bajo estudio presentan diferencias (elevación, tamaño) en sus áreas de aporte que se reflejan en el comportamiento hidrológico, de uso y cobertura del suelo. Este trabajo proporcionó información de base para la cuenca del río Colorado, útil para su planificación y gestión, con vistas al ordenamiento territorial.

Este modelo utilizado constituye una herramienta sencilla y práctica para el seguimiento espacial y temporal de la cobertura de nieve en tiempo real, que, si bien no tiene en cuenta el espesor de nieve y densidad, la cobertura cuantificada por el modelo está asociada al derrame

anual del río, sirviendo de base para la planificación y manejo integral del recurso hídrico. Mediante la complementación de información hidrológica y meteorológica se podrían generar pronósticos de derrame y tendencias sobre cobertura de nieve en la cuenca activa del río Colorado. Se plantea la necesidad de contar con mayor información de equivalente de agua nieve y espesor de nieve, que puedan transformarse en volumen de agua, y otros datos como temperatura, radiación solar, precipitación.

La metodología propuesta de estimación de la ETMA constituye una herramienta muy útil a escala regional y en los casos en que se cuenta con limitada información de terreno. Basada en un enfoque ecológico, la hipótesis del equilibrio hidrológico supone que el estado productivo de la vegetación, potencialmente cuantificado a través de un índice de vegetación espectral, está en equilibrio con la precipitación local en aquellos sitios no degradados y que no reciben aportes de agua extra. El método de las anomalías espaciales del índice de vegetación permite cuantificar la ETMA y asociar aquellas anomalías positivas con el consumo de agua freática o de riego, y las negativas con las pérdidas de agua por escorrentía superficial, evaporación directa o drenaje profundo.

La fisiografía semidesértica de la cuenca hace que la pérdida por evapotranspiración de la vegetación nativa sea muy baja. Por el contrario, los cursos y cuerpos de agua de la cuenca están expuestos a una atmósfera con altas temperaturas en verano, bajo contenido de vapor de agua, intensos vientos y altos niveles de radiación solar; factores todos ellos que potencian las pérdidas por evaporación de los cuerpos de agua.

## **2.6. BIBLIOGRAFÍA**

- Abrahamo, R., Causapé, J., García-Garizábal, I., Merchán, D.** 2011. Implementing irrigation: Water balances and irrigation quality in the Lerma basin (Spain). *Agricultural Water Management* 102: 97-104 p.
- Ault, T. W., Czajkowski, K. P., Benko, T., Coss, J., Struble, J., Spongberg, A., Templin, M., Gross, C.** 2006. Validation of the MODIS Snow Product and Cloud Mask Using Student and NWS Cooperative Station Observations in the Lower Great Lakes Region, *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 341-353 p.
- Ayers, R. S; Westcot, D. W.** 1977. "Estudio FAO: Riego y Drenaje 29. Calidad del agua para la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación". Roma, Italia. 85 p.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A. R.** 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13: 95–120 p.
- Baret, F., Guyot, G., Major, D. J.** 1989. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3(2): 1355–1358 p.
- Bernex, N.** 2006. Agua y ecosistemas: De los diferentes enfoques de gestión a una apuesta para el bien común. Piura: GIGA-PUCP, 16/1/2006. Taller convocado por el Grupo de Diálogo y Desarrollo Sostenible.
- Bologaro-Crevenna, A., Torres-Rodriguez, V., Sorani, V., Frame, D., Ortiz, M. A.** 2005. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, México. *Geomorphology*, 67: 407-422 p.

- Boninsegna, J., Villalba, R.** 2006. Los condicionantes geográficos y climáticos. Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan. Primer informe a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 19p.
- Boninsegna, J. A.** 2013. Impacto del cambio climático en los oasis del oeste argentino; Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias; Ciencia e Investigación, 64 (1): 12; 45-5 p.
- Boninsegna, J. A.** 2014. Impacto del cambio climático en los oasis del oeste argentino. Ciencia e investigación 64 (1): 45-58 p.
- Bruniard, E.** 1994. Los regímenes fluviales de alimentación sólida en la República Argentina. Academia Nacional de Geografía, publicación especial Nº 7. Buenos Aires, Argentina.
- Campos, A.** 1992. Procesos del Ciclo Hidrológico. 2 ed., México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 33-34 p.
- Cara, L., Masiokas, M., Viale, M., Villalba, R.** 2016. Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS. Meteorológica, 41: 21-36 p.
- Carrasco, J., Casassa, G., Quintana, J.** 2005. Changes of the 0°C isotherm in central Chile during the last quarter of the XXth Century. Hydrological Sciences Journal, 50(6): 933-948 p.
- Cartes, M. A.** 2009. Pronóstico de volúmenes de deshielos mediante redes neuronales recurrentes e imágenes satelitales MODIS. Tesis Ms. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento De Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Chapin, F. S., Matson, P., Mooney, H. A.** 2002. Terrestrial water y Energy Balance. Springer-Verlag, New York.
- Chow, V. T., Maidment, D.R., Mays, L.** 1994. Hidrología Aplicada. Ediciones McGraw-Hill. Colombia. 583 p.
- Cogliatti, M. G., Groch, D., Finessi, F.** 2015. Utilización de producto MOD10A1 para el estudio de la variabilidad de cobertura de nieve en la Cordillera del Viento (Neuquén, Argentina): VII Congreso Argentino de Tecnología Espacial. Buenos Aires, Argentina. (Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/320720242\\_Utilizacion\\_de\\_productos\\_MOD10A1\\_para\\_el\\_estudio\\_de\\_la\\_variabilidad\\_de\\_cobertura\\_de\\_nieve\\_en\\_la\\_Cordillera\\_del\\_Viento\\_Neuquen\\_Argentina](https://www.researchgate.net/publication/320720242_Utilizacion_de_productos_MOD10A1_para_el_estudio_de_la_variabilidad_de_cobertura_de_nieve_en_la_Cordillera_del_Viento_Neuquen_Argentina)).
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado).** 2013. Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. Disponible en: [www.coirco.com.ar](http://www.coirco.com.ar) .
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado).** 2015. Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. Disponible en: [www.coirco.com.ar](http://www.coirco.com.ar) .
- Contreras, S., Jobbágy, E.G., Villagra, P.E., Noretto, M.D., Puigdefábregas, J.** 2011. Remote sensing estimates of supplementary water consumption by arid ecosystems of central Argentina. Journal of Hydrology 397: 10-22 p.
- Dahri, Z. H., Ahmad, B., Leach, J. H., Ahmad, S.** 2011. Satellite-Based Snowcover Distribution and Associated Snowmelt Runoff Modeling in Swat River Basin of Pakistan. En Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences, 48 (1): 19–32 p.
- Díaz, G. E.** 2013. Informe técnico: Cuenca del río Colorado. Uso de las Aguas el río Colorado. 83 p.

- Didan, K.** 2015. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. doi: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006
- Eagleson, P. S.** 1982. Ecological optimality in water-limited natural soil–vegetation systems: theory and hypothesis. *Water Resources Research* 18 (2) : 325–340 p.
- Ehrler, C., Seidel, K., Martinec, J.** 1997. Advanced analysis of the snow cover based on satellite remote sensing for the assessment of water resources. In Baumgartner, M. F., Schultz, G. A., and Johnson, A. I., editors, 5th Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences, Rabat, Morocco, 242: 93–101.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D.** 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45: 21-22. doi: 10.1029/2005RG000183.
- Ferrari Bono, B.** 1997. Uso social del agua, ciencia y planificación para el desarrollo sostenible en la planificación y el manejo de cuencas hidrográficas. Formación Superior para un manejo eficiente de los recursos. Libros del LIPAT Serie Manejo de Cuencas. U.N.C, Argentina.
- Gabriel, J. L., Almendros, P., Hontoria, C., Quemada, M.** 2012. The role of cover crops in irrigated systems: Soil salinity and salt leaching. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 158: 200-207 p.
- Gao X., Huete A. R., Ni W., Miura T.** 2000. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sens. Environ.* 74: 609– 620 p.
- Gaspari, F. J.** 2002. Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica. Huelva. España. Ediciones cooperativas. Buenos Aires. 179 p.
- Gaspari, F. J., Senisterra, G.E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A.M., Besteiro, S. I.** 2009. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Editorial Autores, 1 ed, La Plata, Argentina. 321 p.
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A., Besteiro, S.** 2010. Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Primera Edición. La Plata. 321 p.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Besteiro, S. I.** 2013. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Nacional de La Plata-Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p.
- Gravelius, H.** 1914. Flusskunde. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En Zavoianu, I. (1985): Morphometry of Drainage Bassins. Amsterdam, Elsevier.
- Glenn E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., Nelson, S. G.** 2008. Relationship between remotely sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors* 8: 2136-2160 p.

- Goirán, S. B., Aranibar, J. N., Gómez, M. L.** 2012. Heterogeneous spatial distribution of traditional livestock settlements and their effects on vegetation cover in arid groundwater coupled ecosystems in the Monte Desert (Argentina). *Journal of Arid Environments*, 87: 188-197 p. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.07.011>
- Haefner, H., Seidel, K, Ehrler, C.** 1997. Applications of snow cover mapping in high mountain regions. *Physics and Chemistry of the Earth* 22 (3-4): 275-278 p.
- Halcrow.** 2013. Cuenca del río Colorado determinación de áreas de riesgo hídrico. Programa Multisectorial de preinversión III. Préstamo BID 1896/OC-AR. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado. Hidroestructuras S.A.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V.** 2001. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. Disponible en: [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod10.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod10.pdf)
- Hall, D. K., Riggs G. A., Salomonson, V. V.** 2006. MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. Version 5. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <http://sci-hub.tw/10.5067/ACYTYZB9BEOS> .
- Henaos, J. E.** 1988. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada, Bogotá, Colombia. 396 p.
- Hatton, T. J., Salvucci, G. D., Wu, H. I.** 1997. Eagleson's Optimality Theory of an ecohydrological equilibrium: quo vadis? *Functional Ecology* 11 (6): 665–674 p.
- Horton, R.E.** 1932. Drainage basin characteristics. *Transactions of the American Geophysical Union*, Nº 13. 350-361 p.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G.** 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83: 195–213.
- Immerzeel, W. W., Droogers, P., De Jong, S. M., Bierkens, M.** 2009. Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 113: 40–49. doi:10.1016/j.rse.2008.08.010
- Jardí, M.** 1985. Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía, Barcelona, España*: 19: 41-68 p.
- Inventario Nacional de Glaciares.** 2018. Informe de la subcuenca del río Grande (sectores norte y sur) Cuenca del Río Colorado. Provincia de Mendoza. ([http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/Mendoza/docs/informes/informe\\_final\\_grande\\_APN\\_24-04-2018.pdf](http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/Mendoza/docs/informes/informe_final_grande_APN_24-04-2018.pdf))
- Jobbágy, E. G., Noretto, M. D., Santoni, C. S., Baldi, G.** 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura chaco-pampeana. *Ecología Austral* 18: 305-322.
- Jobbágy, E. G.** 2011. Servicios hídricos de los ecosistemas y su relación con el uso de la tierra en la llanura Chaco- Pampeana. En: Valoración de los servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Editores: Laterra Pedro, Jobbágy Esteban, Paruelo, José. Buenos Aires-INTA. 740 p.
- Kalma, J. D., McVicar, T. R., McCabe, M. F.** 2008. Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data. *Surv Geophys* 29: 421-469 p.

- Knapp, A. K., Fay, P. A., Blair, J. M., Collins, S. L., Smith, M. D., Carlisle, J. D., Harper, C. W., Danner, B. T., Lett, M. S., McCarron, J. K.** 2002. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland. *Science* 298: 2202-2205 p.
- Langbein, W. B.** 1947. Topographic characteristics of drainage basins. U.S. Geology Survey. Water-Supply Paper. 968-C: 125- 155 p.
- López Cadenas de Llano F.** 1998. Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España. 945 p.
- López Cadenas de Llano F., Mintegui Aguirre, J. A.** 1987. Hidrología de superficie. Editorial Salazar. Escuela de Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid. 222 p.
- Lascano, M. E., Velasco, I.** 2007. Estimación de cobertura de nieve en los Andes Centrales con datos NOAA-AVHRR. Cuencas de los ríos Colorado y Neuquén. [www.infraestructura.com.ar](http://www.infraestructura.com.ar)
- Lascano, M. E., Villalba, R.** 2005. Impacto del calentamiento regional sobre el régimen de los ríos de alimentación nival en la Argentina. XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza, Argentina. 16 p.
- Lascano, M. E., Villalba, R.** 2007. Algunas precisiones sobre el rol de los glaciares en el escurrimiento andino. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina.
- Lauro, C., Vich, A., Moreiras, S. M.** 2016. Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. *Geoacta* 40 (2): 28-51 p.
- Lee, S., Klein, A. G., Over, T. M.** 2005. A comparison of MODIS and NOHRSC snow-cover products for simulating streamflow using the snowmelt runoff model. *Hydrological Processes* 19 (15): 2951–2972 p.
- Luque, J. A.** 1967. Caracterización del río Colorado con fines de riego. Centro de Coordinación de investigaciones de recursos naturales y su aplicación. *Cecirna*. Nº 1. Bahía Blanca, (Buenos Aires). 27 p.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment).** 2005. Ecosystems and Human Well-Being. Our Human Planet. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington 109 p.
- Magliano, P. N., Fernández, R. J., Giménez, R., Marchesini, V. A., Páez, R. A., Joggágy, E. G.** 2016. Cambios en la partición de flujos de agua en el Chaco árido al reemplazar bosques por pasturas. *Ecología Austral* 26: 095-106 p.
- Marsett, R. C., Qi, J., Heihnan, P., Biedenbender, S. H., Watson, M. C., Amer, S., Marsett, R.** 2006. Remote Sensing for Grassland Management in the Arid Southwest. *Rangeland Ecology y Management*, 59 (5): 530–540 p.
- Martinez Zavala, L., Jordán, A., Anaya, M., Gómez, I., Bellinfante, N.** 2005. Clasificación automática de elementos geomorfológicos en la cuenca del río Tepalcatepec (México) a partir de un modelo digital de elevaciones. *Revista Cuaternario y Geomorfología* 19: 3-4 p.
- Mas, J. F.** 2011. Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Presentación del sensor MODIS. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Primera edición, ISBN: 978-607-7908-55-5.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Le Quesne, C., Aravena, J. C.** 2006. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale

- atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Climate* 19: 6334–6352 p.
- Matson, M. C.** 1991. NOAA satellite snow cover data. *Paleogeography, Global Planetary Change* 4: 213-218 p.
- Maurer, E. P., Rhoads, J. D., Dubayah, R. O., Lettenmaier, D. P.** 2003. Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS. *Hydrol Process* 17: 59–71.
- Michelini, J. J.** 2010. *Instituciones, capital social y territorio. La Pampa y el dilema del desaroolo de la cuenca del Colorado*. Buenos Aires, Editorial Biblos. 524 p. ISBN 978-950-786-853-5.
- Morisawa, M.E.** 1959. Relation of Morphometric Properties to Runoff in the Little Mill Creek, Ohio Drainage Basin, (Columbia University, Dept. of Geol.) Technical Report, 17, office of Naval Research, Project NR 389-042.
- Newman, B. D., Wilcox, B. P., Archer, S. R., Breshears, D. D., Dahm, C. N., Duffy, C. J., McDowell, N. G., Phillips, F. M., Scanlon, B. R., Vivoni, E. R.** 2006. Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research* 42:W06302, doi:10.1029/2005WR004141.
- Nicholson, S. E.** 2011. *Precipitation in the drylands. Dryland climatology*. Cambridge University Press. 528 p.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbágy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G., Baeza, S.** 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* 2: 47-61 p.
- Paudel, K. P., Andersen, P.** 2011. Monitoring snow cover variability in an agropastoral area in the Trans Himalayan region of Nepal using MODIS data with improved cloud removal methodology. *Remote Sensing of Environment* 115: 1234–1246 p.
- Pérez, A. J., Abrahao, R., Causape, J., Cirpka, O. A., Burger, C. M.** 2011. Simulating the transition of a semi-arid rainfed catchment towards irrigation agriculture. *Journal of Hydrology* 409: 663-681 p.
- Perl, J. E.** 2015. Desafíos por el agua en la cuenca del río Colorado. En Sili, M., Kozel, A., Bustos Cara, R. *La región del Colorado. Historia, cultura y paisaje en la frontera*. Fundación ArgenINTA. Buenos Aires, Argentina. 213 p.
- Qu, J.J., Gao, W., Kafatos, M., Murphy, R.E., Salomonson, V.V.** 2006. *Earth Science Satellite Remote Sensing. Vol. 2: Data, Computational Processing and Tools*. Beijing: Tsinghua University Press/Berlin, Heidelberg. Springer.
- Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner II, B. L., Mortimore, M., Butterbury, S. P. J., Dowlatabadi, H., Fernández, R. J.** 2007. Global Desertification: Building a science for dryland development *Science* 316: 847-851 p.
- Richter, A. H.** 2010. Informe Técnico “Estudio de Salinidad de las Aguas del río Colorado”. Punto Unido. Provincia de La Pampa, 1965-2009. Congreso Pampeano del Agua. Santa Rosa, La Pampa.
- Riggs, G., Hall, D.** 2011. MODIS Snow Cover Algorithms and Products- Improvements for Collection 6: 163-171 p.
- Rittger, K., Painter, T. H., Dozier, J.** 2013. Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS, *Adv. Water. Resour.* 51, 367–380, doi:10.1016/j.advwatres.2012.03.002.

- Rodríguez-Iturbe, I., Porporato, A.** 2005. Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN: 9780511535727.
- Salcedo, A. P.** 2011. Estimate of Area of Snow Cover in Watersheds with High Rate of Data Fusion Using ERS-2. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Córdoba (inédito), Córdoba. 103 p.
- Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L.** 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water resources research* 43: 1-18 p.
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Stonestrom, D. A., Prudic, D. E., Dennehy, K. F.** 2005. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology* 11: 1577-1593 p.
- Schimel, D. S.** 2010. Drylands in the earth system. *Science* 327:418-419 p.
- Schlesinger, W. H., Jasechko, S.** 2014. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190:115–117 p.
- Schwinning, S., Sala, O. E., Loik, M. E., Ehleringer, J. R.** 2004. Thresholds, memory, and seasonality: Understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. *Oecologia* 141: 191-193 p.
- Seidel, K., Martinec, J.** 2004. Remote Sensing in Snow Hydrology. *Runoff Modelling, Effect of Climate Change*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-07417-2.
- Solano, R., Didan, K., Jacobson, A., Huete, A.,** 2010. MODIS vegetation indices (MOD13) C5— User's guide. Tucson: The University of Arizona 38 p.
- Specht, R. L.** 1972. Water use by perennial evergreen plant communities in Australia and Papua New Guinea. *Aust. J. Bot.* 20: 273-299 p.
- Strahler, A. N.** 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V.T. (Ed.): *Handbook of applied hydrology*. 4-39/4-76.
- Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública.** 2013 Diagnóstico Integrado y escenarios de futuro de la región y la cuenca del río Colorado. Programa de fortalecimiento institucional. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado. Disponible en: <http://consorciohidraulico.com.ar/userfiles/RC1-pla.pdf> .
- Tahir, A. A., Chevallier, P., Arnaud, Y., Ahmad, B.** 2011. Snow cover dynamics and hydrological regime of the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan. *Hydrol Earth Syst Sci* 15: 2275-2290 p.
- Tahir, A. A., Chevallier, P., Arnaud, Y., Ashraf, M., Bhatti, M. T.** 2015. Snow cover trend and hidrological characteristics of the Astore River basin (Western Himalayas) and its comparison to the Hunza basin (Karakoram region). *Science of the Total Environment* 505: 748-761 p.
- Tekeli, A. E., Akyürek, Z., Arda Sorman, A., Sensoy, A., Ünal Sorman, A.** 2005. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing Environment* 97: 216–30 p.
- Telesca, L., Shaban, A., Gascoin, S., Darwich, T., Drapeau, L., Hage, M.E., Faour, G.** 2014. Characterization of the time dynamics of monthly satellite snow cover data on Mountain Chains in Lebanon. *Journal of Hydrology* 519: 3214-3222 p.

- Tweed, S., Leblanc, M., Cartwright, I., Favreau, G., Leduc, C.** 2011. Arid zone groundwater recharge and salinisation processes; an example from the Lake Eyre Basin, Australia. *Journal of Hydrology* 408: 257-275 p.
- Vázquez Amábile, G.** 2018. *Gestión ambiental: desafíos para una producción sostenible*. Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola. Buenos Aires. 160 p. ISBN 978-987-1513-30-7.
- Viglizzo, E. F., Frank, F. C.** 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158: 122-126 p.
- Weisnet, D. R., Ropelewski, C. F., Kukla, G. J., Robinson, D. A.** 1987. A discussion of the accuracy of NOAA satellitederived global seasonal snow cover measurements. *Proc. Vancouver Symp. on Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover.*, IAHS Publ. 166: 291-304 p.
- Xu, X., Huang, G., Sun, G., Pereira, L. S., Ramos, T. B., Huang, Q., Hao, Y.** 2013. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: Searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin. *Agricultural Water Management* 125: 46-60 p.
- Zhang, X., Liu, Y., Fang, Y., Liu, B., Xia, D.** 2012. Modeling and assessing hydrologic processes for historical and potential land-cover change in the Duoyingping watershed, southwest China. *Physics and Chemistry of the Earth* 53-54: 19-29 p.

# **CAPÍTULO 3**

---

## **CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA A NIVEL DE LOTE PARA LOS PRINCIPALES CULTIVOS DE LA CUENCA DEL RIO COLORADO**

### 3.1. INTRODUCCIÓN

#### 3.1.1 Agricultura bajo riego

En las regiones áridas y semiáridas, el agua constituye el principal factor limitante al desarrollo agrícola, y el riego es la práctica mediante la cual se satisfacen las necesidades de agua de los cultivos. La agricultura bajo riego resulta uno de los mayores consumidores de agua dulce en el mundo. Esto ha generado, en situaciones de limitaciones de recursos hídricos, severos conflictos de uso, al entrar en juego las demandas de agua para abastecimiento humano, hidroeléctrico e industrial, entre otros. El desafío actual es aumentar la eficiencia en el uso del agua, lo que conlleva a producir más alimentos utilizando menos agua (FAO, 2002).

En Argentina 2,1 millones de hectáreas están siendo irrigadas (Figura 3.1), de las cuales el 65 % de esa superficie se riega a partir de fuentes superficiales, y el resto con agua subterránea (Morábito *et al.*, 2015). Estas áreas se localizan tanto en sistemas públicos como en áreas privadas y generan alrededor de un 13 % del valor de la producción agrícola del país.

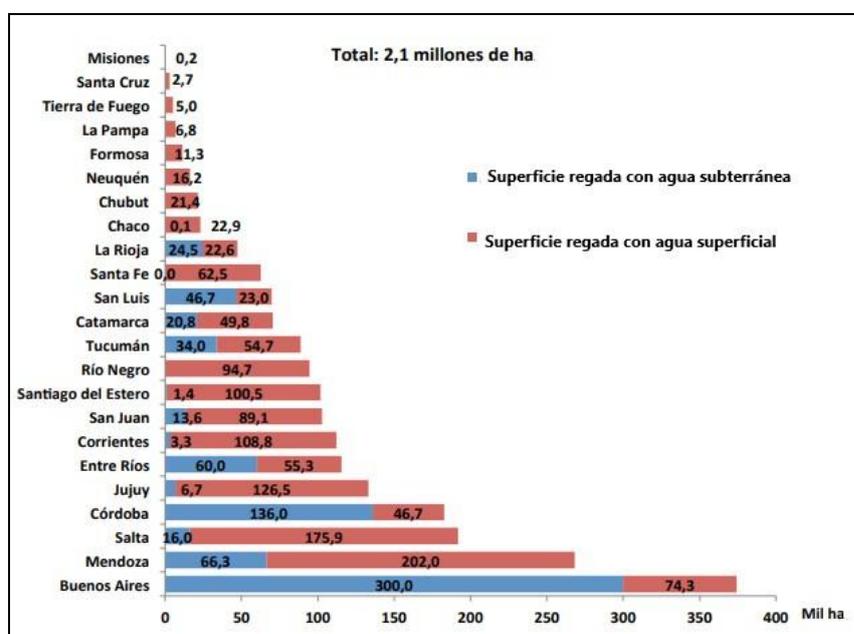


Figura 3.1. Superficie bajo riego por provincias (1000 ha). Fuente: Morábito 2015.

En la cuenca del río Colorado se desarrolla la agricultura bajo riego principalmente en sus porciones media y baja (Tabla 3.1). Actualmente se encuentra bajo riego la mitad del área potencial en toda la cuenca (COIRCO, 2014). En dichas áreas se desarrollan principalmente cultivos de forrajeras, hortícolas y cereales (Sánchez, 2013) siendo el riego superficial o gravitacional es el que ocupa el primer lugar en cuanto a la superficie regada en toda la cuenca. Aunque los otros métodos presurizados, tanto por aspersión como por goteo, han experimentado un muy importante incremento porcentual en los últimos años, principalmente en la cuenca media. Según Díaz (2013) se localizan diez sistemas de riego en La Pampa, nueve en Río Negro, seis en Neuquén, uno en Buenos Aires y uno en Mendoza. La agricultura bajo riego que se desarrolla en la cuenca media del río Colorado es un sistema público, administrado en la

provincia de La Pampa por el Ente Provincial del Río Colorado (Gobierno de La Pampa) y el Departamento Provincial del Agua en la provincia de Río Negro. Los cultivos que prevalecen en la cuenca media alta son: alfalfa (*Medicago sativa*), maíz (*Zea mays*), cebolla (*Allium cepa*) y vid (*Vitis vinifera*), con riego gravitacional y riego presurizado.

En las zonas áridas, como el área bajo estudio, el riego es de tipo integral, ya que el aporte de la lluvia al proceso de evapotranspiración es de escasa magnitud, de manera que puede despreciarse, entonces el período y la magnitud del déficit es significativo, por lo que la totalidad del agua demandada por los cultivos debe ser proporcionada por el riego. En este punto juega un papel importante la planificación y la eficiencia del método de riego.

En todo sistema de riego existen pérdidas de distribución y de aplicación. Las primeras ocurren a lo largo de la red de riego y las de aplicación ocurren dentro de la parcela, las cuales se expresan a través de parámetros denominados "eficiencia". En esta tesis, se hará énfasis sólo en la eficiencia de aplicación (EAP), que es el cociente entre el volumen de agua almacenado en el suelo en la zona de profundidad efectiva de raíces (que luego será evapotranspirado por el cultivo) respecto del volumen ingresado a la parcela cultivada durante el riego. Cada método de riego, ya sea de superficie (surcos, melgas) o presurizado (pivote central, aspersión fija) tiene su eficiencia de aplicación. En el riego por superficie, la infiltración del suelo y la velocidad de avance del frente del agua sobre el suelo determinan la uniformidad de aplicación. Ésta es mayor cuanto más rápido es el avance del agua a lo largo de la unidad de riego. En este caso la eficiencia de aplicación es de alrededor del 30 %. En el riego por aspersión la uniformidad depende, en gran parte, del diseño del sistema: tipo, medida y espaciamiento de los aspersores, altura de carga, presión de operación, y del viento predominante (dirección, velocidad, etc.), pudiendo llegar a una eficiencia del 98 %.

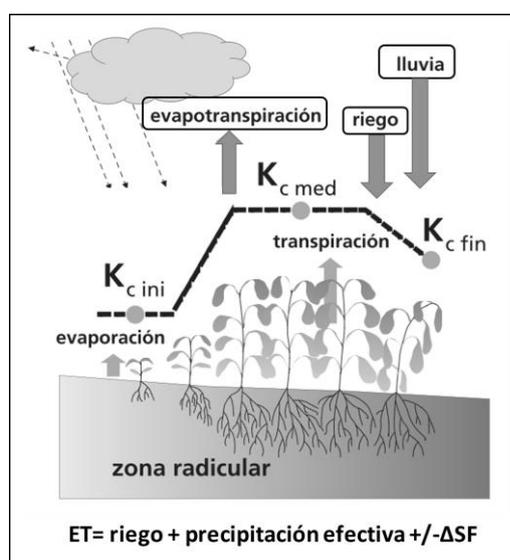
### **3.1.2. Balance de agua: evapotranspiración y requerimiento de agua de los cultivos**

En áreas donde la agricultura bajo riego está en expansión, como en el área bajo estudio, la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos constituye un dato básico para el diseño de un proyecto y la planificación de estrategias de riego. Para su estimación, los inconvenientes más comunes derivan de la falta de sistematización de la información básica disponible, tanto meteorológica, como información del suelo y del cultivo. Para determinar la cantidad de agua necesaria que tiene que ser aplicada en el riego, es esencial conocer los requerimientos del cultivo (evapotranspiración, ET) así como la cantidad de agua de lluvia aportada durante el periodo de crecimiento. La ET es definida como la combinación de dos procesos físicos muy similares a través de los cuales el agua se pierde a la atmósfera, por un lado, desde la superficie del suelo por evaporación y, por otro, desde el cultivo por el proceso de transpiración (Allen *et al.*, 1998) (Figura 3.2).

La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por ET del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo. A pesar de que los valores de la ET y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo, como riego o precipitación, mientras que la ET del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a la atmósfera. Los requerimientos de riego básicamente representan la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. El requerimiento de riego también

incluye agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua (Allen *et al.*, 2006). Una vez conocidas las necesidades netas del cultivo se debe pensar en cómo satisfacerlas, y cuál es la eficiencia de aplicación del método de riego a utilizar.

Los modelos de crecimiento de cultivos son una herramienta útil a la hora de cuantificar y planificar el requerimiento y consumo del agua a escala de lote (e.g. Stancalie *et al.*, 2010; Arteaga Ramírez *et al.*, 2011). El modelo CROPWAT, desarrollado por la FAO (Doorenbos y Pruitts, 1975 y 1977; Smith *et al.*, 1991, Smith, 1992; Smith, 1993) es un modelo para la planificación y el manejo del riego, que permite evaluar los requerimientos de agua de los cultivos y las necesidades de riego. Dentro de sus aplicaciones principales se encuentran: el cálculo de la evapotranspiración de referencia, los requerimientos de agua de los cultivos, la planificación de riego bajo diferentes condiciones de gestión y de abastecimiento de agua, la estimación de los efectos de una sequía en sistemas de secano y la evaluación del rendimiento de las prácticas de riego. Los algoritmos para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos (RAC) y requerimientos de riego (RR) en este modelo se basan en la estimación de la evapotranspiración potencial (ET<sub>o</sub>) con el método de Penman-Ecuación Monteith. El modelo CROPWAT presenta simplicidad en su uso y precisión en sus cálculos, que lo hace interesante su aplicación. Permite planificar cronogramas de riego para varias condiciones de operación y para diferentes fechas de siembra permitiendo mejorar el aprovechamiento del recurso agua.



**Figura 3.2.** Balance de agua simplificado a escala de lote en el que se basa el modelo CROPWAT. Fuente: adaptado de Allen *et al.*, 2006.

La adecuada gestión del riego es la que determina cuándo y cuánto regar, en base a las necesidades de agua de los cultivos, las características del suelo y las condiciones climáticas del entorno, para optimizar la calidad y cantidad de la producción (Morábito *et al.*, 2015). Una vez determinados los requerimientos de agua de cada cultivo se debe realizar el calendario de riego para cada establecimiento y la zona de riego (Palacios-Vélez y Exebio-García, 1989; Shayya y Bralts, 1991; Smith *et al.*, 1991; Smith y Allen, 1996).

### 3.1.3. Huella hídrica de los cultivos

En el año 2002 surgió el concepto de huella hídrica (HH) desarrollado por Hoekstra y Hung con el objetivo de obtener un indicador que relacionara el uso del agua con el consumo humano (Raes *et al.*, 2009). Así, la HH se presenta como un indicador de sostenibilidad complementario que permite conocer cuál es el volumen total de agua que se necesita para producir los bienes y servicios de una población. Para la agricultura bajo riego, uno de los aspectos más relevantes de la HH, es que permite diferenciar el agua consumida según su procedencia, distinguiendo entre HH azul y HH verde (e.g. Cao *et al.*, 2014). De esta forma, la HH total se define como el volumen de agua consumida por unidad de producción y puede descomponerse en HH verde, azul y gris (Hoekstra *et al.*, 2009). El agua verde, procedente de las precipitaciones que queda retenida en el suelo, utilizada por unidad de rendimiento; la HH azul que corresponde al agua azul procedente de ríos, lagos y acuíferos que es aplicada mediante riego, por unidad de rendimiento; y, por último, HH gris, relacionada con la contaminación, y definida como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes en base a los estándares de calidad del agua existentes en el ambiente.

Si la ET es más alta que la precipitación efectiva ocurrida durante el crecimiento del cultivo, la HH verde es igual a la precipitación efectiva; por el contrario, si la ET es menor que precipitación efectiva, la HH verde es igual a la ET (Bocchiola *et al.*, 2013; Lovarelli *et al.*, 2016). Si el agua verde es insuficiente para cubrir las demandas del cultivo, se requiere de agua azul. En particular, si la ET es más alta que la precipitación, el HH azul es potencialmente igual a la diferencia entre la ET y la lluvia (Bocchiola *et al.*, 2013), de lo contrario, HH azul es cero. Esta distinción es importante ya que ambas poseen diferentes características en cuanto a costo de oportunidad e impacto hidrológico y medioambiental, como también son diferentes el manejo y la gestión de cada una de ellas (Rodríguez Casado *et al.*, 2008).

En áreas donde la agricultura bajo riego está en expansión, la estimación de los consumos de agua de los cultivos, constituye un dato básico para el diseño de proyectos y planificación de estrategias de riego, así como un indicador de la sustentabilidad ambiental de los recursos hídricos utilizados en su producción. Por tanto, se requieren indicadores que permitan analizar escenarios de manejo y gestión del agua en diferentes condiciones de baja disponibilidad hídrica, mayores rendimientos de los cultivos, o mayor demanda de agua para otros usos. En este sentido, la HH de los cultivos es un indicador geográfico y temporalmente explícito. La información obtenida mediante su aplicación constituye una herramienta para la toma de decisiones, tanto a nivel de productores, como de los gestores y planificadores del agua. El concepto de HH apunta a un cambio de paradigma en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y en las políticas hídricas, agropecuarias y comerciales en todo el mundo. El foco de análisis es la sustentabilidad, eficiencia, tanto en contextos locales o globales, como en regiones geográficas y cuencas.

En cuencas como la del río Colorado, donde el área bajo riego está en aumento, el agua es un recurso que debe ser utilizado de manera planificada, con el fin de aumentar las eficiencias de uso del agua de los sistemas agrícolas, siendo el sector agrícola el mayor usuario de agua en la cuenca. Sin embargo, en general, los riegos se aplican de manera sistemática sin estar asociados a las demandas de los cultivos. A su vez, en un contexto de variabilidad en el clima, y con consecuencia en el caudal del río Colorado (COIRCO, 2013), regar eficientemente debería estar en la agenda de los agricultores, planificadores y los entes reguladores. Bajo esta situación

es necesario caracterizar hidrológicamente los lotes bajo riego, especialmente las demandas de los cultivos, para conocer sus requerimientos de riego y su HH. Para esta caracterización se requieren herramientas que permitan analizar escenarios de manejo diferentes en condiciones de baja disponibilidad hídrica, para mejorar el uso del agua y reducir los efectos en los rendimientos de los cultivos (Flores Gallardo *et al.*, 2013). La información obtenida, constituirá una herramienta para la toma de decisiones, tanto a nivel de productores, como de los gestores y planificadores del agua.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Caracterizar la hidrología a nivel de lote para los principales cultivos en la cuenca media del río Colorado.

### **Objetivos específicos**

- A) Estimar la evapotranspiración de los cultivos de alfalfa y maíz.
- B) Determinar las necesidades de riego para los principales cultivos.
- C) Calcular la eficiencia del uso del agua para los cultivos de alfalfa y maíz, con riego presurizado y gravitacional.
- D) Evaluar la huella hídrica de los cultivos y del área bajo riego.

## **3.2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.2.1. Área de estudio**

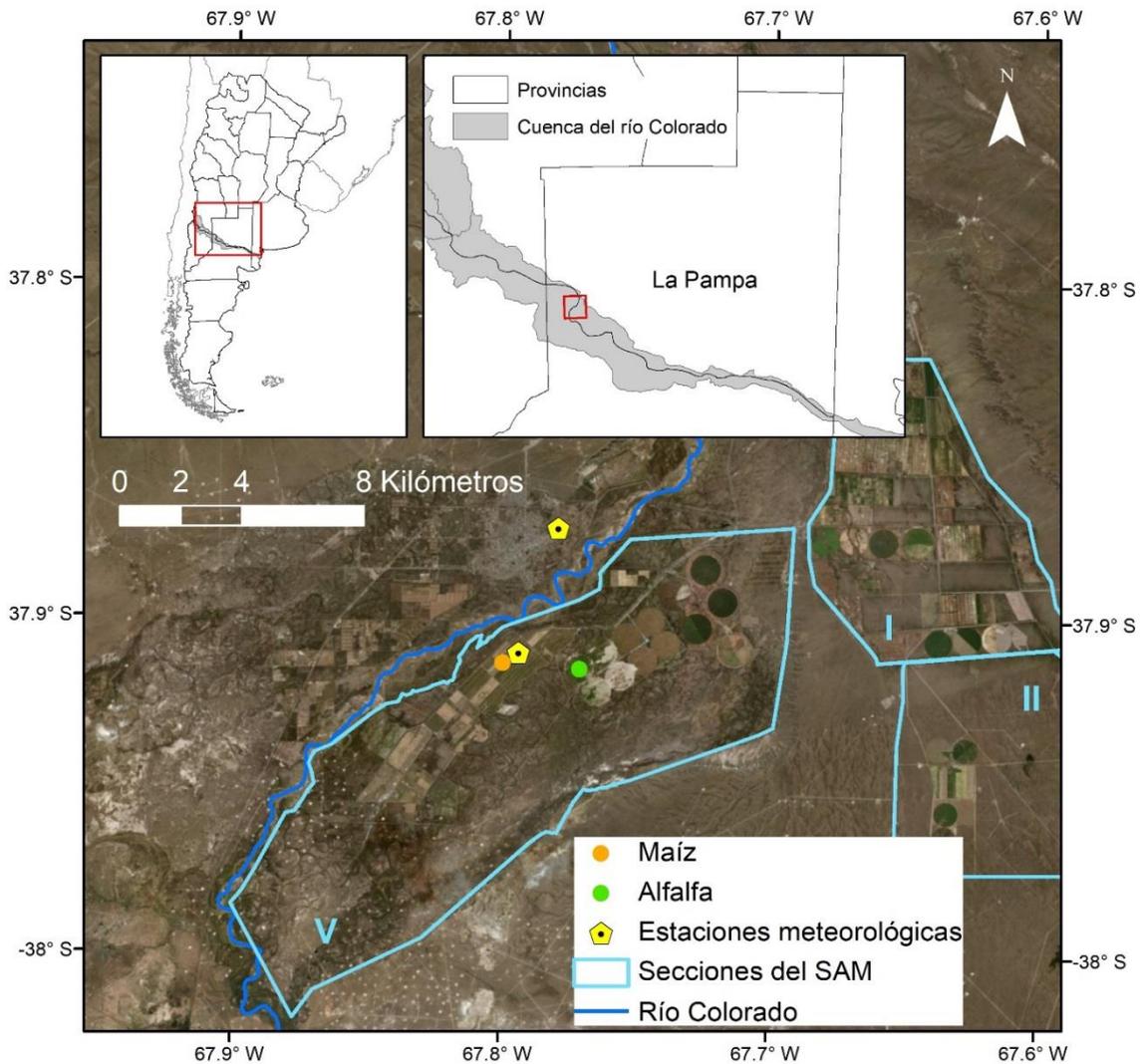
El área de estudio se ubica en la cuenca media del río Colorado, precisamente en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple de 25 de Mayo, La Pampa (SAM), Argentina (Figura 3.3). El SAM es un sistema público, administrado por el Ente Provincial del Río Colorado (Gobierno de La Pampa). El sistema se abastece con aguas del río Colorado en la obra de cabecera, Dique Derivador Punto Unido, 10 km aguas arriba del ejido municipal de 25 de Mayo.

De la obra de toma de riego, parte un canal matriz revestido de 22,5 km de longitud que transporta agua con cuatro destinos:

- (i) regar las Secciones I, II y V (18.300 ha empadronadas);
- (ii) suministrar agua para uso industrial,
- (iii) generar hidroelectricidad en la central Los Divisaderos; y
- (iv) trasvasar agua al sistema de riego de Catriel (Río Negro).

Los caudales derivados en Punto Unido oscilan entre un mínimo de  $7-9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  cuando se trata de servir al riego exclusivamente; se eleva al rango de  $12-13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  cuando se suma agua para uso industrial y la que se trasvasa a Río Negro; y llega a un máximo de  $66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  cuando se genera hidroelectricidad en la central Los Divisaderos a máxima capacidad. Actualmente, no se cuenta con registros de los caudales que ingresan por el canal matriz al sistema de riego, ni se

dispone de mediciones periódicas de cómo se reparten los caudales dentro del sistema (hidrogeneración, industria, riego), ni de la cantidad de agua que retorna al río.



**Figura 3.3.** Localización del área de estudio, secciones del Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado, ubicación de los lotes y estaciones meteorológicas.

El clima de la región es continental, árido y mesotérmico. La precipitación media anual es de 263 mm, llegando a cubrir aproximadamente sólo el 20 % de las necesidades potenciales de agua. La época de mayor precipitación es el semestre cálido (octubre a marzo), con picos máximos al principio y al fin del período. La temperatura media anual es de 14,6°C. El mes más cálido es enero, con una temperatura media de 23,5°C y los meses más fríos son junio y julio con una temperatura media de 6,2°C, dando lugar a un período medio libre de heladas de 158 días. La velocidad media del viento es de 6,18 Km.h<sup>-1</sup>, con dirección dominante sudoeste (Interconsul *et al.*, 1982).

Desde el punto de vista de los procesos pedogenéticos el factor climático, a través de la baja cantidad de agua de precipitación, el régimen térmico, los vientos fuertes y el balance hídrico muy deficitario, determinan un escaso desarrollo de los suelos. La lixiviación es casi nula

ya que la poca cantidad de agua caída no alcanza a lavar las sales más solubles. El proceso de pedogénesis está en su fase inicial, los contenidos de materia orgánica y nitrógeno son bajos. Los suelos formados bajo tales condiciones climáticas y presentando tales características pertenecen al orden Entisoles y se clasifican como Torripsammentes Típicos y Torriortentes (Cano *et al.*, 1980). En un perfil pedológico de la zona se puede observar que, con excepción de las lomas con gravas, los suelos de las demás geoformas presentan una sucesión de estratos constituidos por arenas eólicas depositadas sobre un material aluvial; por debajo se distinguen un manto de grava y un estrato impermeable subyacente a la grava. El material eólico arenoso es no carbonatado y no salino. Este estrato aluvial varía de texturas moderadamente finas hasta moderadamente gruesas (franco arcillo - arenosa hasta franco arenosa), es de color pardo rojizo claro y presenta además contenidos de carbonatos y sales en paleocauces. En cambio, en las formas positivas del relieve, generalmente no presentan contenido importante de sales. Tanto el color como las acumulaciones salinas no se consideran resultado de la pedogénesis actual o pasada sino características heredadas de los sedimentos que transporta el río Colorado (Interconsul *et al.*, 1982).

La superficie efectivamente regada en el SAM corresponde a las secciones I, II y V, las cuales alcanzan las 3338 ha (Tabla 3.1). El riego es principalmente por gravedad, aunque en los últimos años se incorporaron hectáreas bajo riego presurizado (pivote y goteo) lo que hizo mejorar la eficiencia de riego promedio de la zona. La producción está diversificada tal como lo indica la Tabla 3.1, con el predominio de los cultivos forrajeros.

**Tabla 3.1.** Cultivos y métodos de riego en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple de 25 de Mayo (La Pampa). Fuente: Cámara de Productores Bajo Riego. Consulta: diciembre de 2015.

Cultivo	Superficie por método de riego (ha)				Total
	Gravitacional	Pivote	Goteo	Aspersión fija	
Alfalfa	810	490			1300
Maíz	230	140			370
Verdeos de verano	190	80			270
Pastura consociada	530	40			570
Vid			140		140
Nogales	70				70
Cebolla		50		50	100
Zanahoria				50	50
Papa		50		50	100
Álamos	368				368
<b>Total</b>	<b>2198</b>	<b>850</b>	<b>140</b>	<b>150</b>	<b>3338</b>

La producción de alfalfa de la zona se destina a la confección de heno en forma de cubos, mega fardos y pellets de alfalfa. Estos representan un recurso clave en los sistemas productivos de los ganados bovino, equino, ovino, caprino, entre otros. Parte de la producción se destina a consumo en la zona, y el resto se vende en la zona norte de Patagonia. La producción de maíz se destina tanto para cosecha como para picado para el engorde a corral, principalmente de bovinos a corral.

## 3.2.2. Metodología

### 3.2.2.1. Relevamiento de información a campo

Se evaluaron tres campañas, desde noviembre a abril, correspondientes a las campañas agrícolas 2013/2014, 2014/2015 y 2015/2016, en lotes de maíz y alfalfa (Figura 3.3). La información climática, de cultivos y de suelos evaluados se detalla a continuación y servirá como datos de entrada para el modelo CROPWAT:

#### **Información climática**

En las campañas bajo evaluación la información fue obtenida de una estación meteorológica situada en el Establecimiento Curacó (sección V), a 20 km de la localidad de 25 de Mayo, y a menos de 5 km de los lotes evaluados, la cual pertenece a la Agencia de Extensión Rural de 25 de Mayo y otra estación que pertenece al Departamento Provincial del Agua, ubicada en la localidad de Catriel, a 4 km de los lotes en cuestión (Figura 3.3).

#### **Información de cultivos**

Se seleccionó un lote de maíz (*Zea mays*) con riego gravitacional (37° 56' 29,74"S 67° 50' 23,28"O) de 27 ha donde se designaron 6 unidades elementales de muestreo (UEM), un lote de alfalfa (*Medicago sativa*) con riego por pivote central (37° 54' 53,03"S 67°46'16,52"O) de 65 ha donde se instalaron 12 UEM, y un lote de alfalfa con riego gravitacional (37° 54' 43,25"S 67°47'44,46"O) en el cual se instalaron 4 UEM. Todos los lotes se ubican en la sección V del SAM (Figura 3.3). A partir de la información brindada por los productores y mediciones a campo se obtuvieron la fecha de siembra, de cosecha, días en cada etapa fenológica, altura y profundidad de enraizamiento para el cultivo de alfalfa (Tabla 3.2) y maíz (Tabla 3.3).

El rendimiento de los cultivos fue evaluado mediante mediciones semanales en el caso de la alfalfa, desde noviembre a abril en cada campaña, y en el cultivo de maíz mediante la determinación de rendimiento al fin del ciclo del cultivo, en cada una de las campañas (Figura 3.4). Para la estimación del rendimiento de alfalfa, se cuantificó la producción de materia seca por corte manual sobre cada UEM a partir de cortes de material aéreo en un área de 0,2 m<sup>2</sup>. Los cortes se realizaron de manera perpendicular a las hileras de siembra. Las muestras fueron pesadas a campo (materia verde) y secadas en estufa (60 °C). Se realizaron 5 repeticiones por UEM y por fecha de muestreo. Para la estimación de rendimiento de grano en el cultivo de maíz, se seleccionó un surco representativo en cada UEM, y se midió 14,3 m lineales en los cuales se contó la cantidad de plantas y la cantidad de espigas en dicha superficie. Esta distancia se multiplicó por la distancia de siembra (0,7 m) resultando el área muestreada de 10 m<sup>2</sup>. En dicha área se seleccionó 10 espigas en cada UEM y se determinó el número de hileras, el número de granos por hilera y se calculó el peso (grs) de 1000 granos. Por último, se calculó el rendimiento promedio por UEM en tn.ha<sup>-1</sup>.



**Figura 3.4.** Monitoreo de los cultivos a campo. A) Lote de maíz B) Lote de alfalfa.

Por otro lado, el coeficiente de los cultivos ( $K_c$ ) y las fases de crecimiento fueron obtenidos de trabajos realizados en la misma región por Fontanella y Aumassanne (2015). En el caso de la fracción de agotamiento crítico y el factor de respuesta de la productividad del cultivo fueron tomados de Allen *et al.* (2006).

Los parámetros de ingreso del módulo de cultivos utilizados en CROPWAT para los cultivos de alfalfa y maíz se observan en las Tablas 3.2 y 3.3, respectivamente.

**Tabla 3.2.** Parámetros del cultivo de alfalfa ingresados a CROPWAT.

<b>Etapas de crecimiento</b>	<b>Inicial</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>Media</b>	<b>Final</b>	<b>Total</b>
Duración (días)	10	40	150	35	235
Coeficiente del cultivo	0,65	1,23		1,2	
Profundidad de raíces (m)		1,2			
Nivel de agotamiento (fracción)		0,55			
Respuesta al rendimiento		1			

**Tabla 3.3.** Parámetros del cultivo de maíz ingresados a CROPWAT.

<b>Etapas de crecimiento</b>	<b>Inicial</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>Media</b>	<b>Final</b>	<b>Total</b>
Duración (días)	30	40	50	30	150
Coeficiente del cultivo	0,65	1,24		0,35	
Profundidad de raíces (m)	0,3		1,5		
Nivel de agotamiento (fracción)	0,7		0,5	0,4	
Respuesta al rendimiento	0,4	0,4	1,3	0,5	1,25

### **Estudio y determinaciones de suelo**

En cada uno de los lotes bajo estudio se realizó el muestreo de suelos en las diferentes UEM a través de la información georreferenciada, en sitios estadísticamente representativos del comportamiento de cada zona (Figura 3.5).

En cada uno de los sitios seleccionados se realizó la descripción y el muestreo de los perfiles para su caracterización (Soil Survey Division Staff, 1993) y posterior clasificación (Soil Taxonomy, 2014). Se determinó en cada punto y capa: textura por el método de la pipeta de Robinson (Buol *et al.*, 1973), densidad aparente por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), constantes hídricas por medio de las ollas de Richards (Richards, 1948) y conductividad hidráulica (Gavande, 1972).

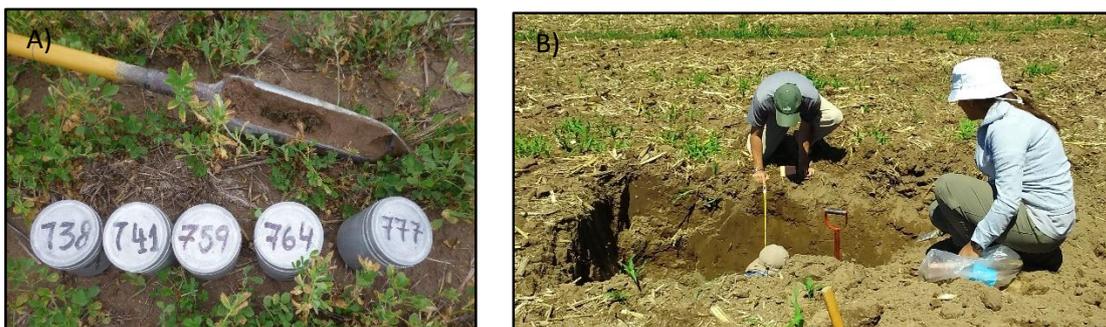
Se evaluó la infiltración acumulada a campo y la infiltración básica para evaluar cambios en el sistema poroso (Método de Kostiakov descrito por Fernández *et al.*, 1971). Se efectuaron 5 determinaciones sobre una transecta de 5 m con infiltrómetros de doble anillo equidistantes 1 m para reducir la variabilidad. Los análisis se realizaron en los laboratorios de la AER 25 de Mayo de INTA, de la Estación Experimental de INTA Anguil “Guillermo Covas” y en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Suelos del CNIA-INTA.

Se determinó el contenido de humedad del suelo ( $\theta_g$ ) a la siembra de los cultivos mediante la determinación de la humedad gravimétrica. Siendo esta última la relación entre la masa de agua y la masa de suelo (Ecuación 3.1).

(3.1)

$$\theta_g (\%) = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de suelo seco}} * 100$$

Se extrajeron muestras de suelo con el barreno, en cada uno de los UEM, cada 20 cm de profundidad hasta el 1 m. Se colocaron las muestras en tarros de aluminio, se pesaron, y se colocaron en estufa a 105 °C durante 24 horas. Se procedió a pesar nuevamente el tarro una vez que obtuvo temperatura ambiente.



**Figura 3.5.** Muestreo de suelo. A) Cilindros utilizados para la determinación de humedad gravimétrica. B) Calicata y recolección de muestras de suelo en lotes de maíz.

Los parámetros requeridos para la modelización son la humedad del suelo total disponible, que es la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (FAO, 2012) y es expresado en milímetros (mm) por metro de profundidad del suelo fue tomada de Sartor *et al.* (2018). La tasa máxima de infiltración de la precipitación, la cual se refiere a la lámina de agua que puede infiltrar en el suelo durante 24 horas. Los valores de referencia para suelos arenosos fueron tomados de FAO (2012). La profundidad radicular máxima expresada en centímetros (cm) se midió en el campo tomando como referencia el manto de ripio que produciría un impedimento al paso de las raíces. Por último, el agotamiento inicial de humedad de suelo (% de ADT) y la humedad del suelo disponible inicialmente, al inicio

de la siembra del cultivo que fue medida a campo y estimada por gravimetría (Ecuación 3.1), y se expresa en milímetros por metro de profundidad del suelo.

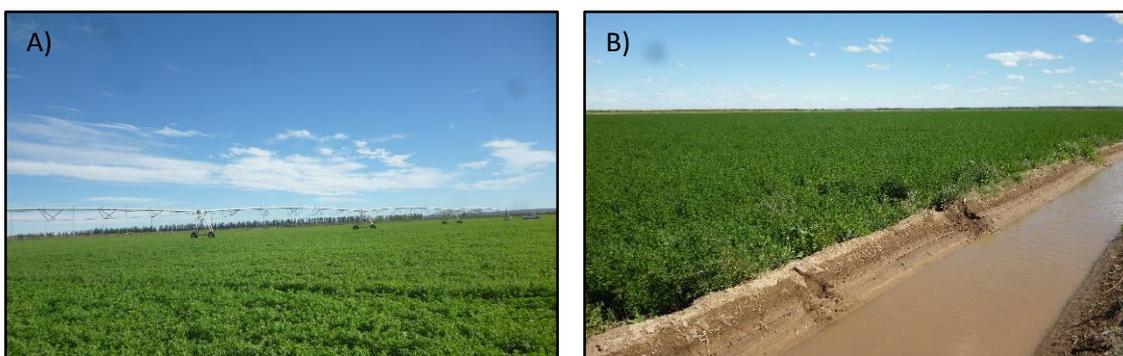
**Tabla 3.4.** Parámetros de suelo determinados a partir de información relevada a campo y utilizada como ingreso en el módulo de suelo de CROPWAT.

Tipo de suelo	<i>arenoso</i>	<i>franco arenoso</i>
Humedad de suelo disponible total (mm.metro <sup>-1</sup> )	82	120
Taza máxima de infiltración de la precipitación (mm.día <sup>-1</sup> )	300	250
Profundidad radicular máxima (cm)	150	140
Agotamiento inicial de humedad de suelo (% de ADT)	8	10
Humedad de suelo inicialmente disponible (mm.metro <sup>-1</sup> )	75,4	108

### **Información de riego**

El lote de alfalfa con riego presurizado evaluado, contaba con un equipo de riego por pivote central (Figura 3.6 A). Este equipo posee una longitud de 455 m con 8 tramos más un voladizo. Cada tramo tiene emisores Senninger de tipo I-Wobs, los cuales están distanciados a 2,95 m. La presión de entrada al equipo es de 46 PSI, mientras que la del final es de 21,6 PSI (datos extraídos de la carta original del equipo). Este equipo cubre una superficie total de 68 ha.

Los lotes de cultivo de alfalfa y maíz con sistema de riego gravitacional (Figura 3.6 B) evaluados pertenecen al mismo establecimiento, donde se utilizó sistema de riego gravitacional por melgas, tradicional, con drenaje. Las melgas tienen 23 m de ancho y 166 m de largo en el caso de la alfalfa y de 17 m de ancho por 102 m de largo. Se utilizó una eficiencia de aplicación teórica según Chambouleyron (1983), que corresponde al 30 % en el caso del riego gravitacional, y al 85 % en el caso del riego por pivote central. El momento de riego y la frecuencia de aplicación considerados fueron informados por cada productor (Tabla 3.5, Tabla 3.6, Tabla 3.7).



**Figura 3.6.** Sistemas de riego A) Lote de cultivo de alfalfa bajo riego con pivote central B) Lote de alfalfa con riego gravitacional.

**Tabla 3.5.** Programación de riego para el cultivo de alfalfa bajo riego gravitacional.

Lámina (mm)	Intervalo (días)
60	60
60	120
60	135
60	150
60	165
60	180
60	195
60	210
60	225

**Tabla 3.6.** Programación de riego para el cultivo de alfalfa bajo riego por pivote central.

Lámina (mm)	Intervalo (días)	Lámina (mm)	Intervalo (días)
1	24	120	24
12	24	124	24
24	24	128	24
28	24	132	24
32	24	136	24
36	24	140	24
40	24	144	24
44	24	148	24
48	24	152	24
52	24	156	24
56	24	160	24
60	24	164	24
64	24	168	24
68	24	172	24
72	24	176	24
76	24	180	24
80	24	184	24
84	24	188	24
88	24	192	24
92	24	196	24
96	24	200	24
100	24	204	24
104	24	210	24
108	24	220	24
112	24	230	24
116	24		

**Tabla 3.7.** Programación de riego para el cultivo de maíz bajo riego gravitacional.

Lámina (mm)	Intervalo (días)
60	35
60	56
60	70
60	84
60	98

### 3.2.2.2. Estimación de componentes del balance de agua

#### *Evapotranspiración de referencia*

Se estimó la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) a partir de datos climáticos históricos de la zona. Se aplicó la metodología propuesta por FAO (Allen *et al.*, 2006), mediante el uso del programa  $ET_0$  calculator (Allen *et al.*, 1998; Raes, 2012). Para ellos se utilizó la serie de datos de una estación meteorológica ubicada en Sección I (37° 51' 43.95" S - 67° 39' 57,45" O) del SAM, con una elevación de 344 m.s.n.m., abarcando los años de 1971 a 2009, perteneciente al Ente Provincial del Río Colorado. De esta forma se obtuvieron los valores históricos para compararlos con los datos de las campañas bajo análisis (2013-2016)

La  $ET_0$  expresa el poder de evaporación de la atmósfera, en un lugar y tiempo específico del año y no tiene en cuenta las características del cultivo y los factores del suelo (Allen *et al.*, 1998). Representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar, sin restricciones de agua, y corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas (Allen *et al.*, 2006). Los únicos factores que afectan  $ET_0$  son los parámetros climáticos.

Para la determinación de la  $ET_0$  se utilizó la ecuación FAO Penman-Monteith (Ecuación 3.2) con los datos climáticos de la serie antes mencionada como entradas para el programa  $ET_0$  calculator. El mismo requiere datos de temperatura del aire máxima, mínima y media, humedad atmosférica relativa máxima, mínima y media, radiación y velocidad del viento, por defecto estima datos de radiación extraterrestre, solar y neta y horas de luz.

(3.2)

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_N - G) + \gamma \frac{900}{T+273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \mu_2)}$$

$ET_0$ : Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$R_N$ : Radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$G$ : Flujo de calor en el suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$T$ : Temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\mu_2$ : Velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )

$e_s$ : Presión de vapor de saturación (kPa)

$e_a$ : Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ : Déficit de presión de vapor del aire (kPa)

$\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\gamma$ : Constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

Dado el mejor comportamiento y consistencia del método FAO Penman-Monteith en el ámbito global, este es el único que se recomienda como método estándar de cálculo de  $ET_0$  con parámetros climáticos. Esto se debe a que existe una elevada probabilidad de que este método prediga correctamente los valores de  $ET_0$  en una amplia gama geográfica y climática, y cuenta con previsiones para su uso en situaciones de falta de datos (Allen *et al.*, 2006). Por ello, es frecuente el uso de valores medios mensuales de los parámetros climáticos para la determinación de  $ET_0$ .

### ***Coefficiente de los cultivos***

Se define al  $K_c$  como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) y la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) (Ecuación 3.3).

(3.3)

$$K_c = ET_c - ET_0$$

Los factores más importantes que afectan el valor de  $K_c$  son el tipo de cultivo (características de estomas, hojas, altura, propiedades aerodinámicas, espaciamiento de plantación); clima (velocidad del viento y humedad relativa); evaporación del suelo (nivel de cobertura); etapas de crecimiento del cultivo durante el desarrollo (inicial, de desarrollo, mediados de temporada y final de temporada). El valor de  $K_c$  será mayor en condiciones de aridez, en los casos en que el cultivo agrícola posea una mayor área foliar y una mayor rugosidad que el cultivo de referencia. Con este método se determinaron los  $K_c$  de los principales cultivos de la zona, maíz y alfalfa en el trabajo presentado por Fontanella y Aumassanne (2015).

### ***Evapotranspiración del cultivo***

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina  $ET_c$ . Para su cálculo, se considera que no existen limitaciones en el desarrollo del cultivo debido a estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad. El valor de  $ET_c$  es calculado a través del enfoque del coeficiente del cultivo, donde los efectos de las condiciones del tiempo atmosférico son incorporados en  $ET_0$  y las características del cultivo son incorporadas en el coeficiente  $K_c$  (Ecuación 3. 4).

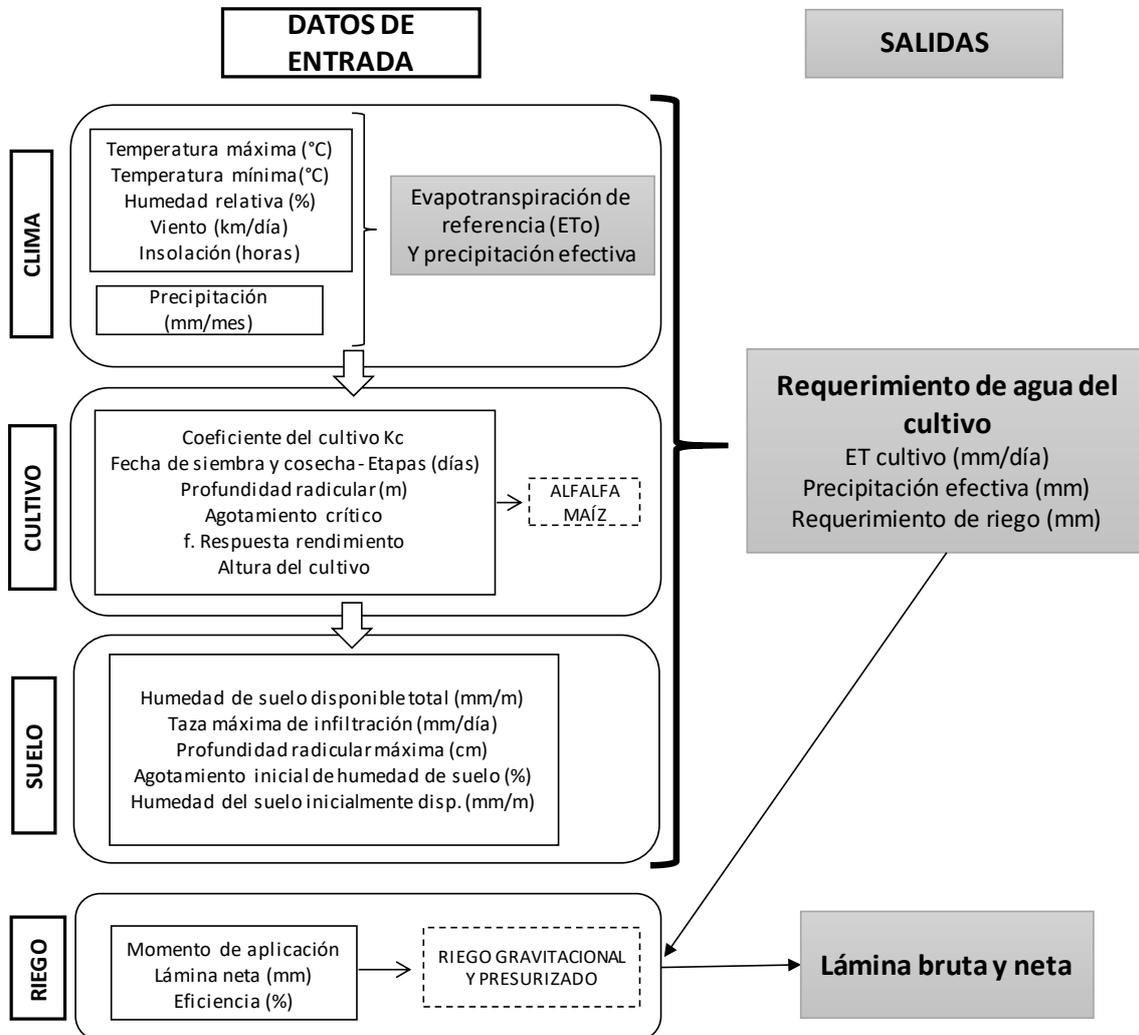
(3.4)

$$ET_c = ET_0 * K_c$$

### **3.2.2.3. Modelo CROPWAT**

El modelo CROPWAT calcula las necesidades de agua de los cultivos usando información climática, edáfica y fenológica, y está basado en las metodologías descritas en los boletines 24, 33 y 56 de la serie FAO Riego y Drenaje (George *et al.*, 2001; Molua y Lambi, 2006; Doria y Madramootoo, 2009). Este modelo estima las reducciones en el rendimiento del cultivo cuando se explota en condiciones diferentes a las óptimas, a partir de los datos de clima, cultivo, suelo y riego. Todas las versiones operan bajo el concepto de  $ET_0$  calculado mediante el método de Penman-Monteith modificado por la FAO.

A partir de información recolectada a campo de los cultivos, suelo y riego, y los valores de Kc obtenidos de la serie histórica, derivada de ET<sub>0</sub> Calculator (Allen *et al.*, 1998; Raes, 2012), se corrió el modelo CROPWAT para maíz y alfalfa (Figura 3.7). De esta manera mediante CROPWAT se puede determinar la ET<sub>c</sub>, la Peff y los RR (Figura 3.7). Además, se obtuvo la lámina bruta y neta.



**Figura 3.7.** Diagrama resumido de CROPWAT 8.0. En rectángulos redondeados los módulos de entrada al modelo y con rectángulos en color gris los parámetros calculados (salidas).

### Requerimientos de agua del cultivo

El requerimiento de agua del cultivo (RAC) se estimó a partir de datos climáticos de las campañas bajo análisis (temperatura, velocidad del viento, etc.) y las características de los cultivos. En primer lugar, se calculó la evapotranspiración de referencia del cultivo (ET<sub>0</sub>) en (mm.día<sup>-1</sup>) por el método de Penman-Monteith; luego se calculó la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) en (mm.día<sup>-1</sup>). A partir de todos estos parámetros se calculó el RAC (m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>) (Ecuación 3.5), donde:

$$(3.5)$$

$$RAC = \sum ETc \text{ [acumulada en el período de crecimiento]}$$

Cuando la precipitación no cumple con el RAC, la diferencia es aportada por el agua de riego (Ecuación 3.6). Cuando el requerimiento de agua de riego (RR) se suministra, las condiciones de crecimiento son óptimas (siempre que otros factores como la disponibilidad de nutrientes sean óptimos también). Si el requerimiento de riego no se cumple o sólo se cumple parcialmente, es probable que el rendimiento sea inferior al óptimo. La reducción de la producción depende de los volúmenes y los plazos de la escasez de agua.

(3.6)

$$RR = RAC - \text{precipitación efectiva}$$

La precipitación efectiva (Pef), se refiere a la parte de la precipitación que puede ser efectivamente utilizada por las plantas, después que se han descontado las pérdidas por escorrentía superficial y percolación profunda (Smith, 1993; Allen *et al.*, 2006).

A partir de la información climática, de suelo, y de cultivos relevada, se plantearon distintos escenarios a evaluar, que resultan de la combinación de condiciones de los planteos productivos reales de la zona evaluados durante las tres campañas (Tabla 3.8).

Se identificó que la mayoría de los suelos muestreados corresponden a la clase textural arenosa y/o franco arenosa, principalmente en los primeros centímetros del perfil por lo que se seleccionaron dichas clases, como clases modales de ingreso al modelo de cultivo.

**Tabla 3.8.** Escenarios modelados a partir de la combinación de cultivos: alfalfa y maíz, sistemas de riego: gravitacional (G), pivote central (P) y suelos: arenosa (A), franco arenosa (F).

Cultivo	Riego	Suelo	Campañas		
			2013-2014	2014-2015	2015-2016
ALFALFA	G	A	1	2	3
		F	4	5	6
	P	A	7	8	9
		F	10	11	12
MAÍZ	G	A	13	14	15
		F	16	17	18

#### 3.2.2.4. Cálculo de huella hídrica

Para la determinación de la huella hídrica, se utilizó la metodología presentada por Hoekstra *et al.* (2009), como se mencionó en la introducción, para representar el agua que consume cada cultivo. En ella se considera que la HH total, es decir los litros de agua consumidos por unidad de producto, está compuesta por la HH verde, la HH azul y HH gris. Esta última no ha sido estimada debido a la falta de disponibilidad de datos y solo se han calculado las huellas verde y azul.

La evapotranspiración de agua verde (ET verde) se calcula como el mínimo de la ETc y la Pef, con un intervalo de tiempo de diez días y luego se suma durante el período de crecimiento. La evapotranspiración del agua azul (ET azul) se calcula como la diferencia entre la ETc y la Pef sobre una base de diez días. Cuando la lluvia efectiva es mayor que la ETc de la cosecha total la ET azul es igual a cero. Luego se suma la ET azul durante todo el período de crecimiento.

La ETc estimada en milímetros, se convierte en  $m^3 \cdot ha^{-1}$  aplicando un factor de 10 veces para obtener las RAC verde y azul ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ). El componente verde de la HH de un proceso de cultivo (HH verde  $m^3 \cdot ton^{-1}$ ) se calcula como el componente verde en el uso de agua de los cultivos (RAC verde,  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) dividido por el rendimiento de los cultivos (Y) ( $ton \cdot ha^{-1}$ ) (Ecuación 3.7). El componente azul (HH azul  $m^3 \cdot ton^{-1}$ ) se calcula de forma similar (Ecuación 3.8):

$$HH \text{ verde} = \frac{RAC \text{ verde}}{Y} \quad (3.7)$$

$$HH \text{ azul} = \frac{RAC \text{ azul}}{Y} \quad (3.8)$$

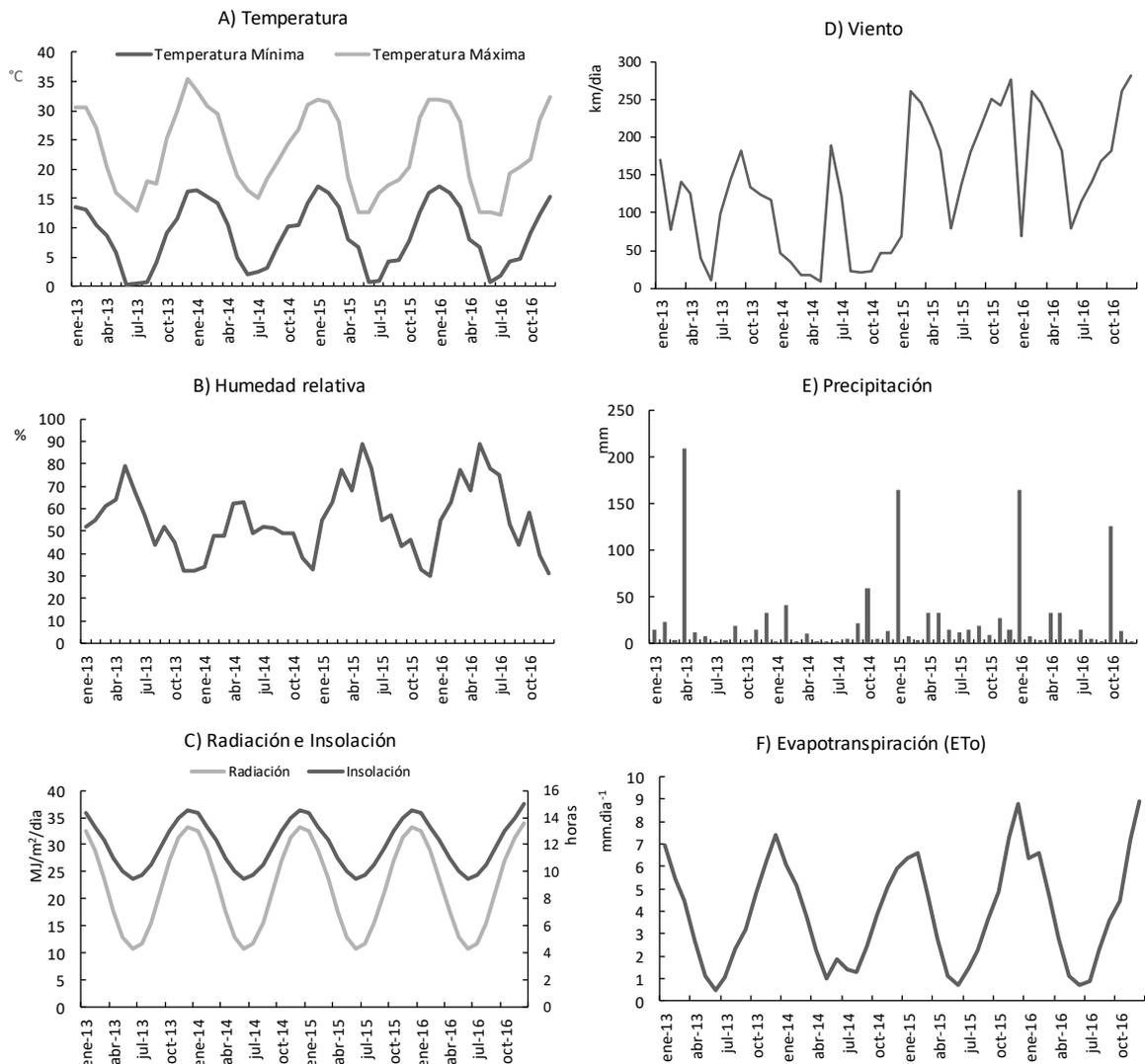
Esta metodología permitirá evaluar las eficiencias en la producción siguiendo el manejo del productor.

La metodología utilizada para el cálculo del uso consuntivo de los cultivos, los requerimientos de riego de alfalfa y maíz se detallan anteriormente en el apartado 3.2.2.1.

### 3.3. RESULTADOS

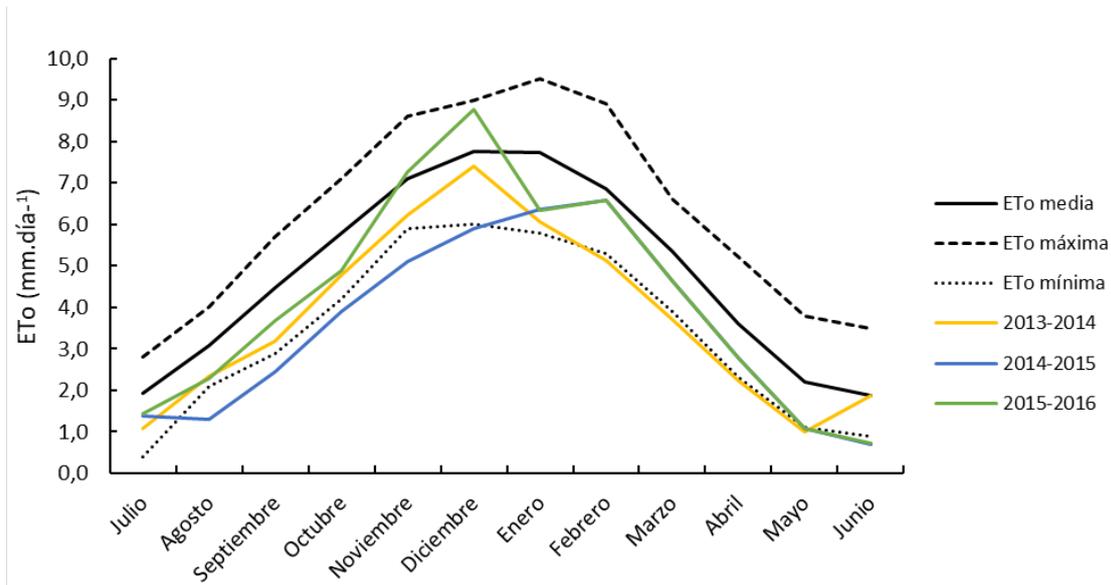
#### 3.3.1. Evapotranspiración de los cultivos

En el período bajo estudio la  $ET_0$  varió entre 0,5 y 8,9  $mm \cdot día^{-1}$  (Figura 3.8), donde los mayores valores corresponden a días más cálidos y una atmósfera más seca. Los meses de primavera-verano presentaron la máxima demanda evaporativa, coincidiendo con el período de riego de los cultivos. El mes de enero resulta con el valor máximo de  $ET_0$  y los meses de junio y julio con los mínimos (Figura 3.8).



**Figura 3.8.** Variables de entrada al modelo CROPWAT en el módulo Clima para el período enero de 2013 a diciembre de 2015.

La  $ET_0$  total estimada fue de 1398,7 mm para el año 2013, 1209,9 mm para el año 2014, 1530,1 mm para el año 2015 y 1440,9 mm para el año 2016 (Figura 3.9). Los años 2015 y 2016 registraron valores de  $ET_0$  entre el mínimo y promedio de la serie histórica calculada para la zona. En general, el año 2014 presentó valores por debajo de los mínimos mensuales de la serie histórica.

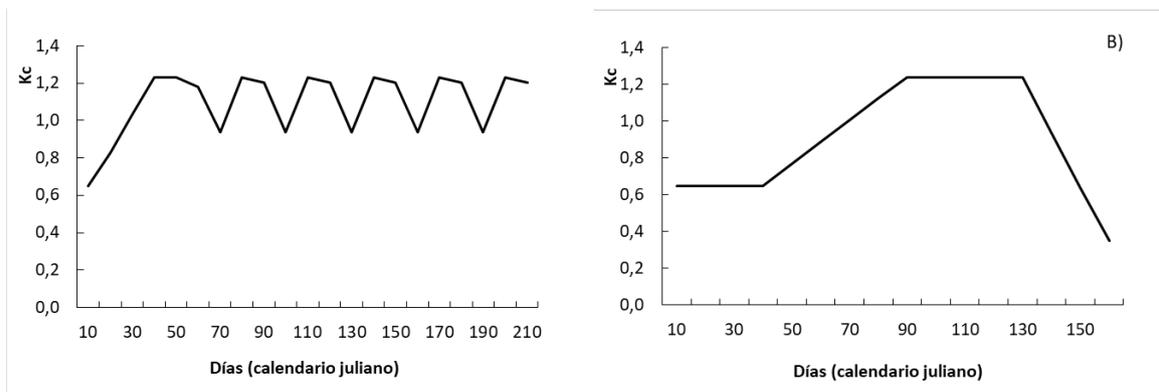


**Figura 3.9.** ET<sub>0</sub> mensual (mm.día<sup>-1</sup>) promedio, mínima y máxima históricos para el período 1971-2009, estimada mediante ET<sub>0</sub> calculator y ET<sub>0</sub> mensual (mm.día<sup>-1</sup>) del período 2013-2016 estimada con CROPWAT 8.0.

Durante el período de crecimiento de los cultivos la variación del K<sub>c</sub> expresa los cambios en las etapas del cultivo y en el grado de cobertura del suelo, los cuales afectan el cociente entre E<sub>Tc</sub> y E<sub>T0</sub>. A partir de cada curva se puede derivar el valor del coeficiente K<sub>c</sub>, y en consecuencia el valor de E<sub>Tc</sub>, para cualquier período de la temporada de crecimiento.

En el cultivo de alfalfa para corte (Figura 3.10 A) el ciclo de corte 1 es de mayor duración que los ciclos siguientes, debido a las menores temperaturas del aire, y del suelo durante ese período, las cuales reducen la tasa de crecimiento. En el cultivo de alfalfa los valores de K<sub>c</sub> varían de modo similar a los de los cultivos extensivos con la salvedad de que el período de la fase inicial hasta recolección se repite de dos a seis veces en el año (ciclos de corte). En la Figura 3.10 puede observarse las variaciones de los valores de K<sub>c</sub> de la alfalfa para todo el período vegetativo en condiciones de baja humedad relativa (seco) y vientos ligeros a moderados.

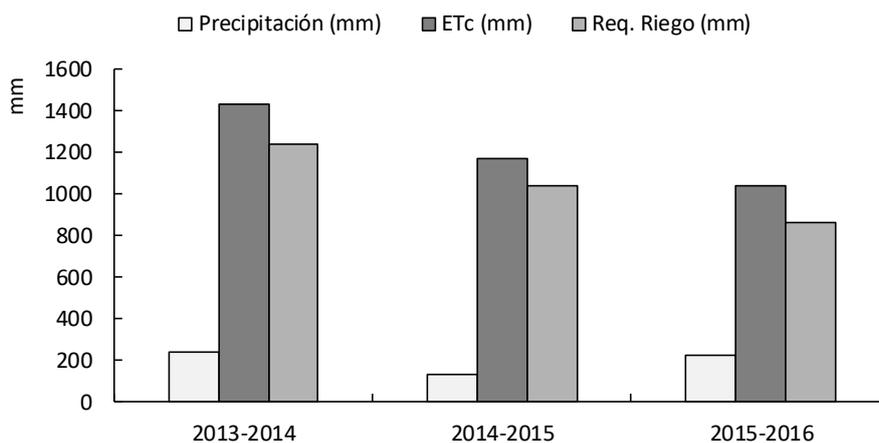
Después de la siembra de los cultivos anuales o poco después de la aparición de las hojas nuevas, en el caso de los cultivos perennes, el valor de K<sub>c</sub> es pequeño, menor a 0,4. El valor de K<sub>c</sub> comienza a aumentar a partir de este valor inicial. A partir del rápido desarrollo de la planta, alcanza su valor máximo, K<sub>c</sub> medio, al momento del máximo desarrollo de la planta. Durante la etapa de final de temporada, a medida que las hojas comienzan a envejecer y se produce la senescencia debido a procesos naturales o prácticas culturales, el valor de K<sub>c</sub> comienza a disminuir hasta alcanzar un valor mínimo al final de la temporada de crecimiento, K<sub>c</sub> final (Figura 3.10 B).



**Figura 3.10.** Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) de alfalfa (A) y maíz (B) para corte estimado mediante  $ET_0$  calculator a partir de datos de la serie histórica (1971-2009) de la estación meteorológica ubicada en Sección I de SAM.

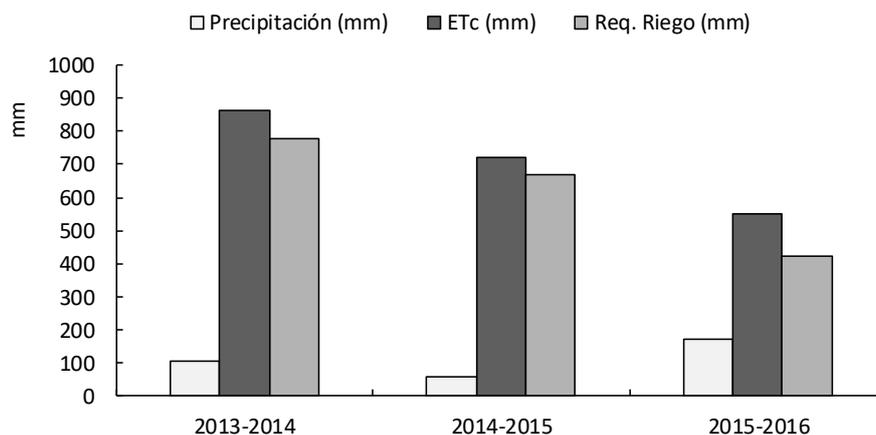
### 3.3.2. Requerimientos de riego

La  $ET_c$  de alfalfa en las tres campañas evaluadas, varía entre 1427 y 1040 mm/período. Debido a que la precipitación efectiva es escasa y no alcanza a cubrir la demanda del cultivo, se requiere de agua de riego, que varía en las campañas analizadas entre 1235 y 857 mm, que representan entre el 86,5 y 82,4 % de la demanda total (Figura 3.11).



**Figura 3.11.** Componentes del balance de agua (mm) en el suelo para el cultivo de alfalfa desde 2013 a 2016.

En el caso del cultivo de maíz, se obtuvieron valores entre 552 a 864 mm/período, con una demanda de agua de riego que varía entre 423,6 y 777,3 mm/período, que significa entre el 76 y el 89,9 %, respectivamente. Las láminas totales requeridas para los cultivos de alfalfa (Figura 3.11) y maíz (Figura 3.12) varían dependiendo de la demanda atmosférica y de las precipitaciones de cada campaña).



**Figura 3.12.** Componentes del balance de agua (mm) en el suelo para el cultivo de maíz desde 2013 a 2016.

A partir de los resultados obtenidos de ETC, precipitación efectiva y requerimiento de riego, se calculó las RAC verde y azul ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) para alfalfa y maíz en las tres campañas analizadas (Tabla 3.9).

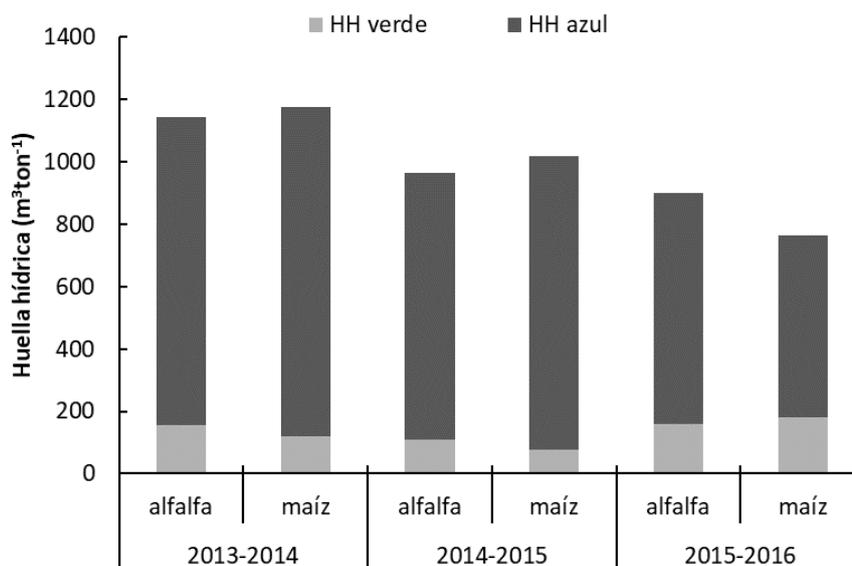
**Tabla 3.9.** Necesidad de agua de los cultivos verde (RAC verde) y azul (RAC azul) para alfalfa y maíz durante las tres campañas evaluadas.

Cultivos	Campañas	NAC verde	NAC azul
		$(\text{m}^3/\text{ha})$	
Alfalfa	2013-2014	1961	12.356
	2014-2015	1330	10.364
	2015-2016	1861	8573
Maíz	2013-2014	881	7772
	2014-2015	554	6676
	2015-2016	1317	4235

La HH promedio del cultivo de alfalfa es de  $1003,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$  y del cultivo de maíz es de  $986,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ , el valor de cada campaña puede observarse en la Figura 3.13. Los valores medios mundiales de HH verde para maíz, en agricultura de regadío para el período 1996-2005 fue de  $595 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$  y la HH azul de  $294 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$  (Mekonnen y Hoekstra, 2011), con un total de  $889 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ . Los altos valores alcanzados en el caso del maíz podrían deberse a los bajos rendimientos obtenidos en los lotes seleccionados, y que representan el promedio de producción con ese manejo. Cabe recordar que se respetaron las condiciones de manejo y producción de los productores de la zona. Además, en la zona las características climáticas desérticas, de bajas precipitaciones y alta ETC, explican los altos valores de HH azul y bajos valores de HH verde.

En el SAM la HH azul promedio de la alfalfa representa el 85,6 % y el 86,1 % en maíz y la HH verde el 14,4 y 14,9 %, respectivamente. Para ambos cultivos la HH azul es mayor que la

verde debido a que la producción se realiza bajo riego integral, entendiendo este, con aportes de RR por encima del 70 %.



**Figura 3.13.** Huella hídrica ( $m^3 \cdot ton^{-1}$ ) estimada del cultivo de maíz y alfalfa para las tres campañas evaluadas.

Las HH calculadas para cada cultivo difieren entre las campañas evaluadas debido al comportamiento de las distintas variables que incluyen en la demanda evaporativa (temperatura, humedad relativa, precipitación y viento) y en los rendimientos alcanzados a nivel de lote.

En el SAM la dotación de riego es de  $1,0 \text{ l} \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$ . De acuerdo a la superficie en producción de los cultivos bajo estudio (Tabla 3.10) el caudal potencial disponible varía entre 41,2 y 42,3  $\text{hm}^3$  dependiendo de la campaña analizada.

**Tabla 3.10.** Superficie bajo riego cosechada en la provincia de La Pampa para las tres campañas evaluadas, rendimiento promedio de materia seca ( $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) por campaña para alfalfa y maíz y huella hídrica de alfalfa y maíz en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple de 25 de Mayo, La Pampa.

Cultivo	Campaña	Superficie (ha)	Rendimiento ( $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ )	HH total ( $\text{hm}^3$ )
Alfalfa	2013-2014	1100	12,5	15,7
	2014-2015	1270	12,1	14,8
	2015-2016	1300	11,6	13,6
Maíz	2013-2014	520	7,4	4,5
	2014-2015	320	7,1	2,3
	2015-2016	370	7,3	2,1

Se estableció la HH total para los cultivos de alfalfa y maíz por campaña es de 20,2; 17,2 y 15,6 hm<sup>3</sup> esto representa el 48; 41,6 y 36,1 % del total de agua potencial disponible en el sistema de riego.

### 3.3.3. Eficiencia de uso del agua

Los resultados alcanzados permiten conocer la cantidad de agua demandada por los cultivos en los ciclos evaluados, y la eficiencia en la programación de riego, que corresponde con el manejo de los productores en la zona. Para un mismo cultivo, la alfalfa, en el caso de riego gravitacional, la lámina bruta total aplicada es superior a la del riego por pivote central (Tabla 3.11). La aplicación del riego mediante pivote central, permite la aplicación de agua con más frecuencia, con menos lámina por riego, lo que implicaría menos pérdidas por drenaje y percolación profunda. La eficiencia en el uso del agua en los lotes de alfalfa con riego gravitacional varía entre 45 % y 74 %, dependiendo de las campañas y suelos analizados (Figura 3.11).

**Tabla 3.11.** Programa de riego obtenido de CROPWAT para el cultivo de alfalfa bajo riego gravitacional.

ALFALFA CON RIEGO GRAVITACIONAL	Campañas						
	2013-2014		2014-2015		2015-2016		
	Suelos	A	F	A	F	A	F
Lámina bruta total (mm)		1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lámina neta total (mm)		540	540	540	540	540	540
Uso potencial de agua del cultivo (mm)		1425,5	1425,5	1167,0	1167,0	1036,4	1036,4
Uso real de agua del cultivo (mm)		647,3	674,9	651,9	676,2	683,9	744,1
Eficiencia programación de riego (%)		82,8	89,2	94,6	100,0	89,4	89,4

En los lotes con riego por pivote la eficiencia de uso del agua varía entre 72 y 90 % (Tabla 3.12). En ambos sistemas de riego, debido a que la demanda real del cultivo de alfalfa es inferior a la potencial, se estaría condicionando el rendimiento potencial del cultivo.

**Tabla 3.12.** Programa de riego obtenido de CROPWAT para el cultivo de alfalfa bajo riego por pivote central.

ALFALFA CON RIEGO PIVOTE CENTRAL	Campañas						
	2013-2014		2014-2015		2015-2016		
	Suelos	A	F	A	F	A	F
Lámina bruta total (mm)		1440	1440	1440	1440	1440	1440
Lámina neta total (mm)		1152	1152	1152	1152	1152	1152
Uso potencial de agua del cultivo (mm)		1420,5	1420,5	1167,2	1167,2	1036,4	1036,4
Uso real de agua del cultivo (mm)		1284,6	1287,6	1149,6	1166,9	1036,2	1036,4
Eficiencia programación de riego (%)		97,0	95,8	89,8	91,6	74,9	75,5

La eficiencia de riego en los lotes de maíz gravitacional varía entre 42 y 53 % (Tabla 3.13). Se observa que la lámina bruta total excede el uso potencial del cultivo, esto es debido al sistema de riego utilizado que, mediante la aplicación de láminas grandes, con grandes intervalos de tiempo, sumando a la baja retención del suelo, hace que el agua se pierda por drenaje profundo. El 100 % de eficiencia de programación se debe a un déficit hídrico, que en este caso podría corresponder a las condiciones mencionadas anteriormente, ocasionando que el uso real del agua sea menor a la demanda.

**Tabla 3.13.** Programación de riego obtenida de CROPWAT para el cultivo de maíz bajo riego gravitacional.

MAÍZ CON RIEGO GRAVITACIONAL	Campañas					
	2013-2014		2014-2015		2015-2016	
Suelos	A	F	A	F	A	F
Lámina bruta total (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Lámina neta total (mm)	300	300	300	300	300	300
Uso potencial de agua del cultivo (mm)	863,1	863,1	720,5	720,1	550,3	550,3
Uso real de agua del cultivo (mm)	492,7	532,6	462,8	493,3	418,5	466,7
Eficiencia programación de riego (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	66,7	66,7

### 3.4. DISCUSIÓN

Las características meteorológicas de zonas desérticas como alta temperatura, alta radiación y baja humedad relativa son determinantes en el cálculo de la ETo. La respuesta de la ETo a los cambios de humedad relativa y temperatura del aire ha sido evaluada por Moratiel *et al.* (2010) y Bhartiya y Ghare (2014). Estos autores obtuvieron modelos matemáticos que muestran que la ETo depende fuertemente de la humedad relativa, principalmente; con lo que se puede mostrar que cuando disminuye ésta se incrementa la ETo; asimismo, otros autores concluyen que al coincidir una baja en la humedad relativa con un incremento en la velocidad del viento, favorece al incremento de ETo (Liu *et al.*, 2013), condiciones que se presentan en la zona bajo estudio.

El riego permite modificar las condiciones productivas naturales, generando estabilidad en los sistemas productivos, en las cadenas de los esquemas ganaderos, y permitiendo la integración de la actividad de secano con el sistema agrícola. La práctica del riego en la cuenca del río Colorado es relativamente nueva, comparada con prácticas similares en otras regiones del país, tal como la región de Cuyo (Morábito *et al.*, 2007) o la cuenca del río Dulce en Santiago del Estero (Cornacchione, 2015).

En la zona agrícola bajo riego de 25 de Mayo (La Pampa) predomina el cultivo de alfalfa y en segundo lugar el maíz. Los altos valores de ETc comparados con los de otras zonas indican una alta demanda ambiental, debido a la alta temperatura, baja humedad relativa, días diáfanos y vientos moderados. Estas características determinan altos potenciales de rendimientos posibles de obtener bajo estas condiciones. Estudios desarrollados en la zona, indican que estos cultivos pueden alcanzar rendimientos potenciales de 19 tn.ha<sup>-1</sup> en el caso de la alfalfa (Zamora *et al.*, 2016) y 13 tn.ha<sup>-1</sup> en el caso del maíz (Beget *et al.*, 2016). Estos rendimientos demuestran que además de satisfacerse la demanda hídrica de los cultivos, el agua utilizada para riego es

adecuada para alcanzar mejores resultados en el rendimiento. Para expresar este potencial se requiere de un adecuado suministro de agua que asegure su desarrollo y crecimiento.

Por otro lado, en cuanto al manejo actual del productor pudo observarse que se aplican láminas excesivas de riego en los lotes de riego gravitacional lo que resulta en una baja eficiencia a escala de lote, generando en algunos casos enlagueamiento. También la alfalfa requiere el aporte hídrico de forma fraccionada, ya que sus necesidades varían a lo largo del ciclo productivo, aunque es más demandante que el cultivo de maíz. Si el aporte del agua está por encima de sus necesidades, la alfalfa disminuye la eficiencia de utilización del agua disponible. Por lo tanto, la planificación del riego, aplicando riegos acordes a la demanda del cultivo, resultaría en un aumento en la eficiencia de irrigación, debido a una menor pérdida por drenaje.

### **3.5. CONCLUSIONES**

La agricultura bajo riego que se desarrolla en la cuenca del río Colorado, presenta un interesante potencial de expansión, es una de las zonas del país que presenta condiciones agroecológicas favorables y disponibilidad del recurso hídrico. A partir de esto se posibilitaría generar importantes beneficios de producción a partir de inversiones en riego, tanto en la implementación de nuevas áreas productivas bajo riego, como en áreas productivas existentes en secano, donde tales inversiones generarían condiciones adecuadas para el incremento de la producción agrícola en condiciones sostenibles.

Los resultados expuestos son una primera aproximación para la estimación de la huella hídrica de los principales cultivos de la cuenca media del río Colorado. Es el primer trabajo con datos actuales, de las últimas campañas, y mediciones a campo, que permitirá ajustar los valores de HH de las demás producciones de la región.

A partir de los resultados obtenidos se podría promover modos de producción más eficientes en cuanto al uso del agua (sistemas de riego o tipos de cultivos) y el rendimiento de los cultivos, teniendo en cuenta el potencial de la zona, mediante la aplicación de prácticas y tecnologías que permitan aumentar la eficiencia en el uso del agua. Se debe planificar el territorio con énfasis en la sostenibilidad local, en un contexto global a nivel de cuenca. De esta forma, las investigaciones sobre HH colaboran en el análisis y el diseño de las políticas del agua.

Además, se deberían ampliar las estimaciones con los demás cultivos que se desarrollan actualmente en toda la cuenca del río Colorado y validar estos resultados con la utilización de otras metodologías.

Los resultados obtenidos constituyen información de base para la determinación de la demanda hídrica mensual y anual en esta zona bajo riego. Asimismo, contribuye al ajuste de políticas hídricas actuales y futuras a fin de mejorar la distribución y optimizar el uso del recurso.

### **3.6. BIBLIOGRAFÍA**

**Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes D., Smith, M.** 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y

- Drenaje Nº 56, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, Roma, 298 p.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M.** 1998. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Arteaga Ramírez, R., Montiel, V. A., Vázquez Peña, M. A.** 2011. Programa Cropwat para planeación y manejo del recurso hídrico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 2: 179-195 p.
- Beget, M.E., Di Bella, C., Aumassanne, C., Fontanella, D., Sartor, P., Lambert, M.J.** 2016. Evaluación de la eficiencia del uso de agua de riego en un cultivo de maíz. Primera Reunión Científica del Programa Nacional Recursos Naturales, Gestión Ambiental y Ecorregiones del INTA (PNNAT). INTA Ediciones. 104 p. ISBN: 978-987-521-737-9
- Bhartiya, K. M., Ghare, A. D.** 2014. Relative humidity based model for estimation of reference evapotranspiration for western plateau and hills region in India. Water Resources Management 28: 3355-3364 p.
- Blake y Hartge.** 1986. Bulk density. In: A Klute (ed.) Methods of soil analysis, Part 1. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison. Agronomy 9: 363-375 p.
- Bocchiola, D., Nana, E., Soncini, A.** 2013 Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy, Agr. Water Manage 116: 50-61 p.
- Buol, S., Hole, F., Mc Cracken, R.** 1973. Soil genesis and classification. 306 p. The Iowa University Press, Ames, Iowa, USA. 360 p.
- Cano, E., Casagrande, G., Conti, H., Salazar Lea Plaza, J., Peña Zubiate, C., Maldonado Pinedo, D., Martínez, H., Hevia, R., Scoppa, C., Fernández, B., Montes, M., Musto, J., Pittaluga, A.** 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa. ISAG, Buenos Aires. 493 p.
- Cao, X. C., Wu, P. T., Wang, Y. B., Zhao, X. N.** 2014. Assessing blue and green water utilisation in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use. Hydrology and Earth System Sciences 18: 3165-3178 p.
- Chambouleyron, J.L.** 1983. El riego en Argentina, actualidad y perspectivas. Área de Riego y drenaje – Instituto Nacional de Ciencia y técnica Hídricas. CRA, Mendoza. 24 p.
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del río Colorado).** 2013. Pronóstico de Escurrimientos. Disponible en: <http://www.coirco.gov.ar/download/hidrologia/Pron%C3%B3stico%20Escurrimiento%202013-2014%20-%2025.10.2013.pdf>
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado).** 2014. Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado–Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. Disponible en: [www.coirco.com.ar](http://www.coirco.com.ar).
- Cornacchione, M. V.** 2015. Alfalfa en Santiago del Estero. Cuánta superficie hay y dónde está? Informe 1. Convenio de Cooperación técnica INTA-Ministerio de Producción, Recursos Naturales, Forestación y Tierras de Santiago del Estero. Disponible en: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_alfalfa\\_en\\_santiago\\_del\\_estero\\_informe\\_1.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_alfalfa_en_santiago_del_estero_informe_1.pdf)
- Díaz, G. E.** 2013. Informe técnico: Cuenca del río Colorado. Uso de las Aguas el río Colorado. 83 p.

- Doorenbos, J., Pruitt, W. O.** 1975. Guidelines for prediction of crop water requirements. Serie de Riego y Drenaje, FAO-24. Roma. 144 p.
- Doorenbos, J., Pruitt, W. O.** 1977. Crop water requirements. In: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. Rome: FAO, 144 p.
- Doria R, O., Madramootoo, C. A.** 2009. Estimation of irrigation requirements for some crops in southern Quebec using CROPWAT. Irrigation and Drainage. Published online in Wiley InterScience: Disponible en: [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com).
- FAO** (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación). 2002. Deficit irrigation practices. FAO Water Report No. 22, Rome.
- FAO** (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación). 2012. CROPWAT “decisión support system” (en línea). Roma, Italia. Disponible en [http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html)
- Fernández P., Luque, J., Paoloni, J.** 1971. Análisis de la infiltración y su aplicación para los diseños de riego en el valle inferior de Río Colorado. RIA, Serie3, 8: 1-29 p.
- Flores Gallardo, H., Ojeda Bustamante, W., Flores Magdaleno, H., Sifuentes Ibarra, E., Mejía Saénz, E.** 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. Agrociencia 47: 347-359 p.
- Fontanella, D. R., Aumassanne, C. M.** 2015. Evapotranspiración de maíz, alfalfa y vid bajo riego, en la cuenca media del río Colorado. VII Jornadas de Riego y Fertirriego. Necesidades de modernización e innovación en la gestión del agua frente a nuevos desafíos. Mendoza, Argentina.
- Gavande, S. A.** 1972. Física de Suelos. Principios y Aplicaciones. Ed. Limusa Wiley. 199–232 p.
- George B., Shende, S., Raghuvanshi, N.** 2001. Development and testing of an irrigation scheduling model. Agricultural Water Management 46: 121-136 p.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M. M., Mekonnen, M. M.** 2009. Water footprint manual: State of the art 2009. Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands.
- Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q.** 2002. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. In: Value of Water Research Report Series No. 11. UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Interconsul S. A., Ade S. A., Franklin Consultora S. A.** 1982. Estudio de revisión y actualización del sistema de aprovechamiento múltiple del Río Colorado en Colonia 25 de Mayo - La Pampa. Informe Final. Sumario Plan de Desarrollo. Consejo Federal de Inversiones.
- Liu, S. M., Xu, Z. W., Zhu, Z. L., Jia, Z. Z., Zhu, M. J.** 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. J. Hydrol. 487: 24-38 p.
- Lovarelli, D., Bacenetti, J., Fiala, M.** 2016. Water footprint of crop productions: a review. Science of the Total Environment 548-549: 236-251 p.
- Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y.** 2011. Green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Hydrology and Earth System Sciences 15: 1577-1600 p.
- Molua, E., Lambi, C.** 2006. Assessing the impact of climate on crop water use and crop water productivity: The CROPWAT analysis of three districts in Cameroon. CEEPA, University of Pretoria. 44 p.
- Morábito, J. A., Mirábile, C., Salatino, S.** 2007. Eficiencia de riego superficial, actual y potencial en el área de regadío del Río Mendoza (Argentina). Ingeniería del Agua 14 (3): 199-213 p.

- Morábito, J., Salatino, S., Hernández, R.** 2015. Requerimientos hídricos e incremento de la productividad de los cultivos bajo riego ante escenarios de cambio climático en el noreste de Argentina. V Congreso Nación- IV Congreso Iberoamericano de Riego y Drenaje. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ingeniería Agrícola. Desde el 1º al 4 de Septiembre, Lima, Perú.
- Moratiel, R., Durán, J. M., Snyder, R. L.** 2010. Responses of reference evapotranspiration to changes in atmospheric humidity and air temperature in Spain. *Climate Research* 44 (1): 27-40 p.
- Palacios-Vélez, E., Exebio-García, A.** 1989. Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Raes, D.** 2012. The ETo Calculator, Reference Manual Version 3.2. Publication from Food and Agriculture Organization of the United Nations, Land and Water Division. Rome, Italy.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. y Fereres, C. E.** 2009. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Journal of Agronomy*. 438-447 p.
- Richards, L. A.** 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66(2):105-110 p.
- Rodríguez Casado, R., Garrido, A., Llamas M. R., Varela-Ortega, C.** 2008. La huella hidrológica de la agricultura española. Número 2. Papeles de Agua Virtual. Ed. Fundación Marcelino Botín.
- Sánchez, R. M.** 2013. Estimación de los requerimientos hídricos de los principales cultivos en el Valle Bonaerense del río Colorado. Informe Técnico N° 40. INTA. 31 p.
- Sartor, P. D., Aumassanne, C. M., Zamora, C. D., Masseroni, M. L., Fontanella, D. R., Álvarez, C., Beget, M. E., Di Bella, C. M.** 2018. Análisis de las constantes hídricas en suelos bajo riego de 25 de Mayo, La Pampa. V Congreso Pampeano del Agua. Santa Rosa, La Pampa
- Shayya, W. H., Bralts, V. F.** 1991. Guide to SCS Microcomputer Irrigation Scheduling Package, SCS-Scheduler Version 2.0. 50 p. Michigan, USA: Department of Agricultural Engineering, Michigan State University.
- Smith, M. R., Allen, R. G., Monteith, J. L., Pereira, L. S., Segeren, A.** 1991. Rep. on the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO, Land and Water Devel. Div., Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Smith, M. R.** 1992. FAO Irrigation and Drainage Paper 46. Rome, Italy.
- Smith, M. R.** 1993. CROPWAT. Programa de ordenador para planificar el riego. Estudio FAO Riego y Drenaje 49. Roma, Italia. 133 p.
- Smith, D. M., Allen, S. J.** 1996. Measurement of sap flow in plant stems. *J. Exp. Bot.* 47 (12): 1833-1844 p.
- Soil Survey Division Staff.** 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Soil Taxonomy.** 2014. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Stancalie, G., Marica, A., Toullos, L.** 2010. Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration. *Physics and Chemistry of the Earth* 35: 25-30 p.
- Zamora, C.D.; Sartor, P.; Fontanella, D.; Aumassanne, C.; Fontana, L.; Ruiz, M. A.** 2016. Evaluación de la producción de materia seca en variedades de alfalfa (*Medicago sativa*)

de diferentes grados de reposo invernal, en el área bajo riego de La Pampa. 39º  
Congreso de la Asociación Argentina de Producción Animal – RAPA 36 (1): 332 p.

# **CAPÍTULO 4**

---

## **ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DE USOS Y COBERTURAS DE LA TIERRA: EFECTO SOBRE EL BALANCE DE AGUA**

## 4.1. INTRODUCCIÓN

### 4.1.1. La construcción de escenarios en el proceso de ordenamiento territorial

Desde el ordenamiento territorial (OT), la cuenca hidrográfica se reconoce como una unidad integral, considerando al agua como principal eje de desarrollo y calidad de vida. Esta unidad territorial base se define integrando factores biofísicos, sociales y económicos (Paruelo *et al.*, 2014). Por lo tanto, la dimensión ambiental es parte intrínseca del OT y su manejo adecuado y protección garantizan un desarrollo económico sostenido y con equidad social. El ordenamiento ambiental del territorio tiene como objetivo principal alcanzar la máxima armonía posible en las interrelaciones de la sociedad con su medio ambiente, tomando en cuenta las características topográficas, geomorfológicas y meteorológicas de las diferentes regiones ambientales. El OT con este enfoque se basa en el conocimiento de las potencialidades y limitaciones tanto físicas, naturales (biofísicas) como socioeconómicas, para revertir los procesos de degradación de los recursos naturales y la problemática socioambiental identificada (MAGFOR, 2000).

En ordenamiento territorial un “escenario” se refiere a posibles historias y/o supuestos sobre un sistema que determinan los cambios en el paisaje (Gavier Pizarro *et al.*, 2014). El patrón espacial de usos de la tierra y su funcionamiento resultante de esos cambios se denomina “futuro” (Steinitz y MacDowell, 2001). El método de construcción de escenarios es un proceso en el cual se evalúan cambios (uso del suelo, condiciones climáticas, de manejo, etc.) a futuro considerando diversos factores multidimensionales (sociales, económicos y ambientales) que pueden incidir sobre la toma de decisiones (Mahmoud *et al.*, 2009). En otras palabras, un escenario es una descripción coherente, consistente y factible de un futuro estado del mundo (IPCC, 2008) y muestra diferentes tendencias de cambio y futuros posibles. De este modo, le permite a los tomadores de decisión anticipar las posibles reacciones de los sistemas bajo estudio a los diferentes futuros posibles, anticipar horizontes temporales más allá del futuro inmediato y contribuir a la toma de decisiones de manejo (Schwartz, 1991; Samson y Knopf, 1996; Cole, 2001; Peterson *et al.*, 2003). Idealmente, los escenarios deben incluir una descripción de la situación en el presente, un conjunto de posibles futuros y una descripción de las vías alternativas de acontecimientos que conectan el presente con las imágenes del futuro (Schwartz, 1991; Schoonenboom, 1995). Estos “futuros” alternativos no son solo descripciones cualitativas, sino también representaciones espacialmente explícitas de los patrones del uso del suelo a través de mapas, simulaciones digitales, incluso dibujos o fotografías mostrando cómo será el paisaje en el futuro (Swetnam *et al.*, 1998; Countryman y Murrow, 2000).

Este proceso de compilación y elaboración de información para la construcción de escenarios puede dividirse en dos partes: una primera parte focalizada en el ejercicio de construcción de un conjunto de escenarios futuros, y una segunda parte en la cual a partir de los escenarios se desarrollan planes de manejo u ordenamiento y se articulan los medios para generar el futuro deseado (aplicación o manejo) (Gavier Pizarro *et al.*, 2014). Este conjunto de escenarios funciona entonces como un puente entre estas dos partes del proceso, que representan dos líneas de actividades humanas: el proponer y responder preguntas científicas acerca de cómo va a ser el futuro (construcción de escenarios) y el planeamiento en el mundo

real de ese futuro (ordenamiento territorial). A partir de esta aplicación se puede volver a los escenarios y hacer modificaciones.

La visualización o anticipación del futuro se hace mediante predicciones o pronósticos basados en condiciones del presente y en la proyección de tendencias de cambio o evolución de un sistema observado en el pasado reciente (Gavier Pizarro *et al.*, 2014). De esta forma, y basado en las tendencias recientes, se obtiene el estado más probable del sistema (Vega *et al.*, 2009). Sin embargo, esta aproximación no considera la incertidumbre del sistema y, por lo tanto, con un infinito número de futuros posibles y el gran número de factores involucrados en determinar el uso de la tierra y la configuración territorial, es muy difícil que el análisis sea exitoso en visualizar un futuro “esperable” o “más probable” que facilite la toma de decisiones de manejo u ordenamiento territorial (Xiang y Clarke, 2003). El futuro no es la continuación estática del pasado, y esto es la base de la construcción de escenarios (Mahmoud *et al.*, 2009). Se pueden determinar las posibles trayectorias del sistema en el futuro incorporando las principales incertidumbres asociadas a los factores claves del sistema. Los escenarios pueden explicitar tendencias o predicciones, pero además deben agregar especulaciones plausibles a fin de que los tomadores de decisión y usuarios no sean sorprendidos por situaciones o evoluciones improbables del sistema (Nassauer y Corry, 2004). De esta forma, permite mejorar nuestra capacidad de responder rápidamente a un amplio rango de acontecimientos o futuros posibles. Los tomadores de decisión o planificadores del uso del suelo podrán usar los resultados para implementar las medidas anticipatorias de los impactos observados en los diferentes escenarios (e.g, problemas sociales o ambientales), o para direccionar el sistema hacia el escenario de menor impacto o más aceptable para los objetivos de las comunidades y actores involucradas (Mahmoud *et al.*, 2009).

Idealmente, el resultado final de una construcción de escenarios focalizados en el cambio del uso del suelo y la planificación territorial debería tener cinco componentes según Gavier Pizarro *et al.* (2014): 1) las alternativas o el rango de elecciones potenciales de planes de usos del suelo, políticas o regulaciones, 2) las consecuencias, los efectos acumulativos (físicos, políticos, sociales, ecológicos) que cada alternativa o escenario tendría sobre el área de estudio, 3) las causas o las relaciones causales entre alternativas y consecuencias, 4) período de tiempo, el tiempo esperable transcurrido entre las alternativas y sus consecuencias, y 5) la huella geográfica, es decir, los cambios producidos por las distintas alternativas sobre las características geográficas de un área (fundamentalmente el uso de la tierra) y sus consecuencias.

#### **4.1.2. Escenarios de cambio climático**

En la actualidad, los modelos climáticos globales (MCGs) son herramientas disponibles para la generación de información acerca de las proyecciones climáticas futuras, escenarios, en la escala de decenios a un siglo en respuesta a acciones antrópicas o cambios naturales en los forzamientos externos del sistema climático (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015). Estos son complejos sistemas de programas informáticos que representan numéricamente los procesos físicos (y en menor medida químicos y biológicos) de la atmósfera, océanos, criósfera y la superficie terrestre y en forma muy simplificada de la biosfera. Los MCGs son capaces de simular las características globales del clima y de sus cambios en el pasado

reciente y por lo tanto son creíbles como herramienta para el desarrollo de escenarios climáticos globales futuros. Los escenarios se construyen con diferentes hipótesis sobre las futuras concentraciones de gases de efecto invernadero. Una de las mayores limitaciones de los MCGs es que no siempre hacen una representación adecuada del clima a nivel regional.

En Argentina una de las zonas que aparece como más vulnerable al cambio climático es la de los oasis del oeste, en particular la región de Cuyo y el norte de Patagonia (Boninsegna y Villalba, 2006). En la región comprendida entre los paralelos de 32° a 36° S, los modelos desarrollados en el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) perteneciente al CONICET y la Universidad de Buenos Aires, pronostican para el período 2020-2030 y en base al escenario A2 (IPCC, 2000), un aumento medio de la temperatura de 1,5 a 1,25°C y una disminución media de la precipitación de 100 mm (Boninsegna, 2014). Este modelo también predice para el mismo período, una elevación media de la isoterma 0°C entre 150 y 130 m en comparación con la elevación actual. Para esta región Núñez (2006) indica que la isoterma de 0°C se ha elevado en los últimos años, lo que resulta coherente con la disminución en la extensión y en la pérdida de masa de los glaciares por un aumento de la temperatura del aire, para el mismo período. El hidrograma de los ríos cuyanos se modificará por cambios en la temperatura media y por cambios en la cantidad de nieve en la cuenca. Existen evidencias de que, a mayor temperatura, el pico del caudal se adelanta y que los caudales de primavera se ven incrementados con respecto al año de menor temperatura media. Por el contrario, los caudales estivales son más bajos. Esta misma situación se plantea para las estimaciones futuras, en donde el modelo predice un aumento medio de la temperatura de 1,5° C para las cuencas del San Juan, Mendoza y Tunuyán y 1,25°C para el Diamante y el Atuel (Boninsegna y Llop, 2015). Dichas cuencas pertenecen al Sistema Río Colorado, por lo que se prevé que las subcuencas del Grande y Barrancas tengan el mismo comportamiento. Las consecuencias de este fenómeno tienen una gran importancia en la planificación del riego, del manejo de las represas y centrales hidroeléctricas y de la provisión de agua para el consumo humano.

Por otra parte, en los oasis de riego los cambios en los patrones climáticos proyectados afectarán el desarrollo y los procesos fisiológicos de los cultivos. Según Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) se espera un impacto diferencial en las demandas hídricas de los cultivos por efecto del cambio climático.

#### **4.1.3. Escenarios futuros de expansión agrícola**

Los cambios en la cobertura y uso del suelo han sido reconocidos desde hace más de dos décadas como causa importante de cambios en el ambiente global (Chen y Yang, 2008), con implicaciones diversas a prácticamente todas las escalas (García y Mas, 2008; Rosete *et al.*, 2009). A nivel regional provocan cambios en la dinámica de los recursos hídricos, alteraciones en los regímenes de temperatura y precipitación, favoreciendo con ello el calentamiento global, la disminución en el secuestro de dióxido de carbono y la pérdida de hábitats y biodiversidad. Localmente, inducen el deterioro y degradación de suelos, producen cambios en el microclima y modificaciones en los balances hídricos a nivel de cuenca (Masis Campos y Vargas Picado, 2014; Paruelo *et al.*, 2014). Por ello, es sumamente importante estudiar la vegetación y el uso del suelo de las cuencas debido a que éstos afectan la dinámica hídrica de los ecosistemas. Los cambios en la cobertura del suelo no ocurren de manera aleatoria. Estos resultan de una

compleja trama de factores que incluyen determinantes biofísicos (e.g. el clima y los recursos edáficos) y aquellos relacionados con las dimensiones económicas, sociales, culturales, políticas y tecnológicas.

Según modelos globales, la expansión de la agricultura continuará en los próximos 50 años, debido fundamentalmente al incremento proyectado de un 50 % de la población mundial y con ello la demanda de alimentos y biocombustibles (Tilman *et al.*, 2001; Rudel *et al.*, 2009; Prins *et al.*, 2011). La velocidad de los cambios globales y sus efectos casi inmediatos sobre el uso de la tierra a escala local y regional hacen necesario poder anticipar los posibles cambios y sus efectos para desarrollar planes eficientes de manejo y conservación de los recursos naturales.

Las actividades productivas que la sociedad despliega sobre el territorio rural plantean desafíos de múltiples dimensiones que incluyen

(1) posibles conflictos entre actores que comparten el uso de un recurso natural común (tierra, agua) y encuentran incentivos individuales que no necesariamente maximizan los beneficios del conjunto;

(2) usuarios que privilegian beneficios de corto plazo sobre los que puedan obtener ellos mismos o futuras generaciones a largo plazo;

(3) usuarios que con sus actividades afectan bienes y servicios que el territorio ofrece al resto de la sociedad y van más allá del propio proceso productivo en el que están involucrados (e.g. generación de externalidades negativas) (Ruhl *et al.*, 2007).

Estos conflictos son de naturaleza dinámica y mutan constantemente en respuesta a cuestiones sociales, económicas, culturales, tecnológicas o climáticas, entre otras. Respecto al uso de la tierra, se pueden distinguir dos tipos genéricos de conflictos de cuenca, a saber: conflictos generados entre diferentes sistemas de uso antrópico por superposición de usos o relacionados a los efectos o externalidades de ciertos usos sobre otros; y conflictos generados entre sistemas de uso antrópico y los requerimientos ecológicos o ambientales de cierta área o sección de la cuenca (identificados, valorados y resguardados por la institucionalidad ambiental y actores de la sociedad civil). En ese sentido, conflicto de uso es sinónimo de conflicto ambiental (Paruelo *et al.*, 2014).

Los cambios en el uso del territorio generan consecuencias directas e indirectas sobre el sistema social, económico, cultural y político. Estas consecuencias incluyen modificaciones en el tipo de producción, los volúmenes producidos, el destino y precio de los productos, la distribución y tenencia de la tierra, entre otras variables. Estas consecuencias se pueden verificar y se trasladan a distintas escalas (MAGyP 2012). El OT debería contribuir a mejorar las condiciones de vida, proteger y conservar los recursos naturales y el ambiente (los servicios ecosistémicos y los sistemas productivos, a los que proveen, regulan y sostienen), promover un modelo de desarrollo territorial equilibrado y sostenible, así como situar y reglamentar las actividades socioeconómicas que se desarrollan en un determinado territorio.

Dentro de los usos de la tierra que se desarrollan en la cuenca del río Colorado, la agricultura bajo riego es el planteo productivo que mayor demanda de agua genera, es por ello que, en esta tesis, se hizo especial énfasis en el balance de agua para los principales cultivos, alfalfa y maíz, presentados en el capítulo 3. Posteriormente, se analizó también su huella hídrica azul y verde y la huella hídrica del Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado para el total de superficie en producción a diciembre de 2015, etapa final de evaluación de esta investigación. El riego es de tipo integral y las precipitaciones se caracterizan por ser escasas

(capítulo 2), y prácticamente no influyen en el caudal del río. La viabilidad de estos oasis de riego depende exclusivamente del agua que se origina por la acumulación de nieve y los aportes de glaciares cordilleranos. Paralelamente, como consecuencia del crecimiento de la población y la competencia con otros usos, se prevé que se incremente la demanda de agua, y las perspectivas de escasez hídricas serán mayores, acentuando la necesidad de realizar un uso más eficiente y sostenible del agua.

Bajo un escenario de expansión de actividad agrícola en la cuenca del río Colorado para esta tesis se plantearon los siguientes interrogantes ¿Qué impacto tendría sobre el balance de agua regional si el patrón agrícola de forrajes estuviese compuesto exclusivamente por maíz y alfalfa y se desarrollara toda el área bajo riego de La Pampa? ¿Alcanzaría el agua de dotación de riego en La Pampa si se desarrollara toda el área bajo riego de la cuenca media del río Colorado? ¿Con qué otros usos de la tierra competiría la expansión de la agricultura? Para responder tales cuestionamientos se evaluaron tres posibles escenarios de expansión y variabilidad climática.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Evaluar el efecto de escenarios climáticos y de uso del suelo sobre el balance de agua en la cuenca del río Colorado.

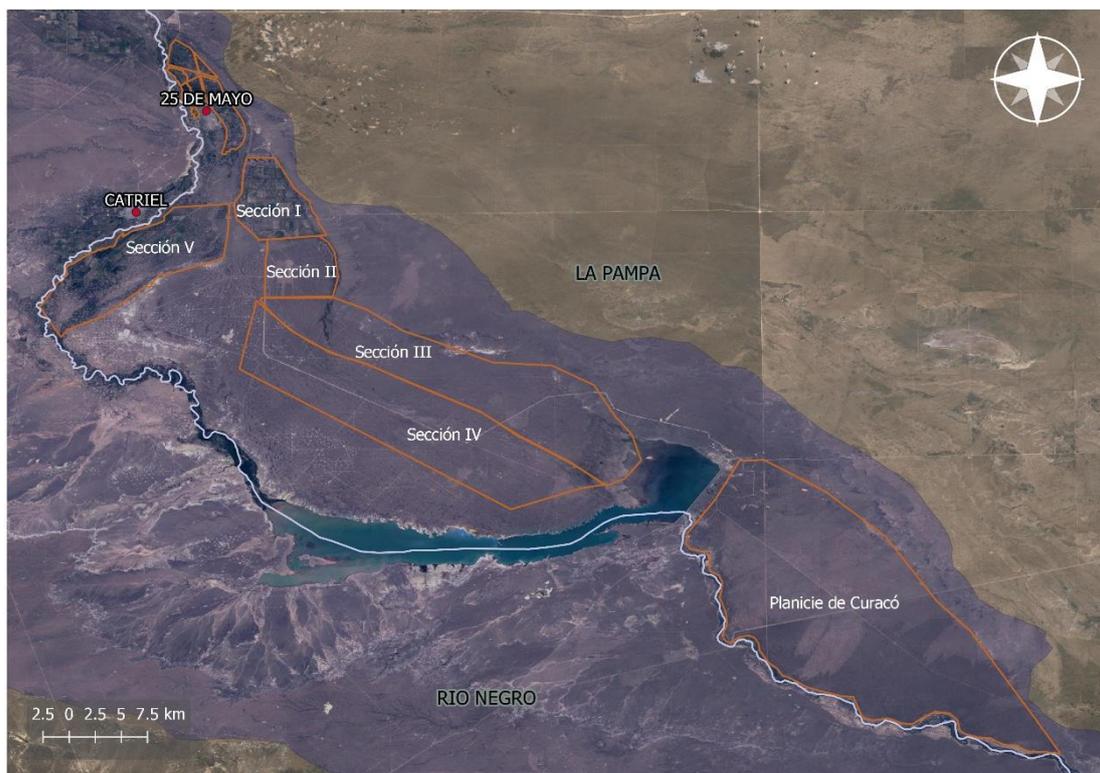
### **Objetivos específicos**

- A) Plantear escenarios climáticos y evaluar las necesidades hídricas de los cultivos bajo escenarios de expansión agrícola.
- B) Analizar el efecto de dichos escenarios sobre la oferta hídrica en la cuenca del río Colorado.

## **4.2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.2.1. Área de estudio**

Para proyectar la expansión de la agricultura bajo riego se seleccionó el área de la cuenca media del río Colorado. Específicamente, el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado, al igual que en el capítulo 3 y se agrega el área de la Planicie Curacó (Figura 4.1) por la disponibilidad de tierras, infraestructura de riego y drenaje instalada, y energía eléctrica disponible para el potencial desarrollo del área según comunicación personal con Presidente del Ente Provincial del Río Colorado, el Plan Nacional del Agua (disponible en <https://www.mininterior.gov.ar/plan/programa-areas-riesgo.php>) y el Estudio de Ampliación del Riego en Argentina (FAO, 2015).



**Figura 4.1.** Cuenca media del río Colorado. Ubicación Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado, secciones I, II, III, IV y V en naranja.

Cabe recordar que el objetivo declarado en el Programa Único de Distribución de Caudales para la cuenca del río Colorado (Capítulo 1) es el de lograr “una distribución razonable y equitativa de sus aguas para beneficio común”. Para ello, por medio del Tratado las Partes<sup>1</sup> se definieron los usos del agua y establecieron sus caudales y prioridades para el uso. El proceso de selección de alternativas propuestas por el MIT se inspiró en alcanzar los objetivos de: (i) uso eficiente; (ii) prioridad del uso para abastecer poblaciones y riego; y (iii) contribuir con la integración territorial. A partir de ello, actualmente los usos autorizados en la cuenca son: (i) consumo humano: la cuenca provee de agua a las cinco provincias que la componen, y por el “Acueducto del Río Colorado” abastece a más del 50 % de la población de La Pampa (extra-cuenca); (ii) riego: hacia el 2015 la superficie de riego en la cuenca era de 122.850 ha, sobre un total potencial de 318.100 ha (Tabla 4.1); (iii) generación eléctrica: existen varias represas en la cuenca, como el Embalse Casa de Piedra, el Salto Andersen, el Divisadero, entre otros; y (iv) actividad minera e hidrocarburos: los emprendimientos se localizan mayormente desde Bardas Blancas (Mendoza) hasta aguas abajo del Embalse Casa de Piedra, en La Pampa (Greco *et. al.*, 2010; Cirone, 2014).

<sup>1</sup> Disponible en: <http://www.coirco.gov.ar/download/institucionales/institucionales-coirco/Reglamento%20y%20Estatuto%20Coirco.pdf>

**Tabla 4.1.** Cupos de agua asignados, superficie proyectada para riego<sup>2</sup> y usos del agua por tipo en el año 2015. Fuente: COIRCO, 2015.

Provincia	Cupos de agua (hm <sup>3</sup> )	Superficie (ha)	Urbano (hm <sup>3</sup> )	Riego (hm <sup>3</sup> )	Minero Petrolero (hm <sup>3</sup> )
Buenos Aires	1767	145.900	2,5	1080	0
La Pampa	633	85.100	12,5	253	1,8
Mendoza	764	1000	1,2	1	5,8
Neuquén	50	1000	3,2	67	4,2
Río Negro	625	85.100	4,9	314	1,4
Total	3839	318.100	24,4 (1 %)	1715 (98 %)	13,2 (1 %)

#### 4.2.2. Generación de escenarios

Con el objetivo de estimar y cuantificar los impactos de la producción futura y su demanda de agua en la cuenca bajo estudio se plantearon tres escenarios considerando la expansión de la actividad agrícola bajo riego en la cuenca media del río Colorado, el cambio climático y el derrame del río (Tabla 4.2).

1) Expansión de la agricultura bajo riego bajo condiciones climáticas medias y derrame promedio de toda la serie del río Colorado.

2) Expansión de la agricultura bajo riego en un contexto de cambio climático y derrame promedio del río Colorado de los últimos 15 años.

3) Expansión de la agricultura bajo riego en un contexto de cambio climático y derrame del río de un año seco.

**Tabla 4.2.** Escenarios planteados basados en la expansión agrícola bajo riego, las demandas de agua de los cultivos y la oferta de agua del río Colorado.

<sup>2</sup> Programa Único de Distribución de Caudales para la cuenca del río Colorado (1976).

	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
<b>EXPANSIÓN AGRÍCOLA</b>	<p>Expansión de la agricultura bajo riego en las mismas proporciones actuales de los principales cultivos: 40 % alfalfa -11% maíz. El área de expansión corresponde al Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado (SAM) y a la Planicie Curacó (PC) en la provincia de La Pampa.</p> <p>En el SAM tiene 20.705 ha (Secciones I, II, V) y 36.000 has en PC, que en total representan 56.705 ha potenciales de expansión en la cuenca media.</p>	<p>Expansión de la agricultura bajo riego ídem Escenario 1.</p>	<p>Expansión de la agricultura bajo riego ídem Escenario 1.</p>
<b>DEMANDA</b>	<p>Escenario climático promedio (precipitación, temperatura mínima, máxima, velocidad del viento, humedad relativa e insolación) promedios de la serie histórica 1971-2007 de la estación meteorológica de 25 de Mayo, EPRC. Anexo B, Tabla 4.1.</p>	<p>Escenario de cambio climático con temperatura mínima (Anexo B, Tabla 4.2), temperatura máxima (Anexo B, Tabla 4.3) y precipitación (Anexo B, Tabla 4.4) derivadas de los MCGs. El resto de las variables meteorológicas de entrada que se utilizan para el modelo de cultivo se tomaron de los datos medios de la serie histórica de la estación meteorológica del EPRC (Anexo B, Tabla 4.1).</p>	<p>Escenario climático ídem escenario 2.</p>
<b>OFERTA</b>	<p>Escenario de caudal promedio = <math>144 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 4577 \text{ hm}^3</math> (COIRCO, 2015).</p>	<p>Escenario de caudal promedio del período (2000-2015)= <math>4559 \text{ hm}^3</math> (COIRCO, 2015)</p>	<p>Escenario de caudal de un año seco = <math>2354 \text{ hm}^3</math> (COIRCO, 2015).</p>

A continuación, se describen cada uno de los escenarios presentados en la Tabla 4.2.

#### 4.2.2.1. Expansión agrícola:

La expansión agrícola comprende un total de 56.705 ha que corresponderían a las secciones I, II y V del Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado (SAM) y Planicie Curacó (PC) en la provincia de La Pampa. Se plantea en dos etapas de desarrollo, la primera consta de 20.705 ha que incluye a secciones I, II y V del SAM, con un 80 % de la superficie destinada al cultivo de alfalfa y 20 % destinado al cultivo de maíz, y en la segunda etapa se suman 36.000 ha correspondientes a PC.

#### 4.2.2.2. Demanda hídrica

Para el escenario 1 se evaluaron los requerimientos de riego de los cultivos a partir de las variables climáticas promedio de la serie temporal obtenidas de la estación meteorológica de la zona como se planteó en la Tabla 4.2, la misma que ha sido citada en el capítulo 3. Los datos utilizados se presentan en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3.** Variables climáticas medias mensuales del período 1971-2007 de la estación meteorológica de ubicada en sección I del SAM para el escenario 1.

	Temp mínima (°C)	Temp máxima (°C)	Humedad relativa (%)	Viento (km/día)	Insolación (horas)	Precipitación (mm)
<b>Enero</b>	13,5	30,6	52	173	14,3	24
<b>Febrero</b>	13,1	30,5	55	159	13,3	25,1
<b>Marzo</b>	10,4	27	61	143	12,3	32,5
<b>Abril</b>	5,9	22,3	63	124	11	25,6
<b>Mayo</b>	3,1	17,7	68	116	10	13,3
<b>Junio</b>	0,6	14,1	67	124	9,5	19,3
<b>Julio</b>	-0,4	14,1	68	122	9,7	13,6
<b>Agosto</b>	1,1	16,7	62	152	10,5	14,4
<b>Septiembre</b>	3,7	19,6	56	173	11,8	22,9
<b>Octubre</b>	7,3	23,1	54	173	13	22,4
<b>Noviembre</b>	10,1	26,9	51	181	14	24,8
<b>Diciembre</b>	13,2	29,8	51	179	14,5	29,2

Para los Escenarios 2 y 3 (Tabla 4.2) se evaluaron MCGs en base al Tercer Comunicado de la República Argentina a la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Para ello se consultó la base de datos climáticos del Centro de Investigaciones del Mar y de la Atmósfera de la 3ra. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, el CONICET y la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (<http://3cn.cima.fcen.uba.ar/>), para un futuro cercano 2015-2039. Se seleccionaron 5 MCGs (Tabla 4.4) bajo 2 escenarios de cambio climático,

con 2 RCP (Trayectorias de concentración representativas) 4.5 y 8.5. El primero corresponde a emisiones de GEI moderadas y el segundo supone que las emisiones continuarán creciendo con las tendencias actuales hasta fin de siglo (IPCC, 2000).

**Tabla 4.4.** Modelos climáticos globales utilizados en esta investigación, institución de origen y resolución espacial. Fuente: Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2015.

<b>Modelo MCG</b>	<b>Institución</b>	<b>Resolución espacial (lat x lon)</b>	<b>Disponible en Argentina</b>
CMCC-CM (2009)	Centro Euro- Mediterráneo per I Cambiamenti Climatici, Italia	0,75° X 0°,75	Región Centro y Húmeda
CNRM-CM5 (2010)	Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas Francia	1,41° X 1,41°	Región Centro
CSIRO Mk3.6.0 (2009)	CSIRO, Australia	1,875° X 1,875°	Región Centro y Patagónica
GFDL-ESM2G (2011)	NOAA-GFDL, Estados Unidos	2° X 2,5°	Región Patagónica
MRI-CGCM3 (2011)	Instituto meteorológico, Japón	1,1°X1,2°	Todo el país

A partir de sistema de información geográfica y mediante la ubicación de la zona de estudio, desde la base de datos climática se extrajeron los valores medios mensuales de las variables: de temperatura mínima, máxima y precipitación, para la celda modal ubicada 37,75 S – 67,25 O correspondiente a la zona del área bajo riego de 25 de Mayo (La Pampa).

Los datos de medios mensuales de temperatura máxima, mínima y precipitación obtenidos para cada modelo y escenario, para el período 2015-2039 se presentan en las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7 respectivamente.

**Tabla 4.5.** Temperatura máxima (°C) mensual promedio para el período 2015-2039 obtenidas con los modelos de cambio global evaluados para los escenarios 2 y 3.

	CMCC- CM_rcp45	CMCC- CM_rcp85	CNRM- CM5_rcp4 5	CNRM- CM5_rcp8 5	CSIRO- Mk3-6- 0_rcp45	CSIRO- Mk3-6- 0_rcp85	GFDL- ESM2G_r cp45	GFDL- ESM2G_rc p85	MRI- CGCM3_r cp45	MRI- CGCM3_r cp85
Enero	31,2	31,3	33,2	33,4	31,7	31,4	29,2	29,3	31,1	31,4
Febrero	30,1	29,9	31,0	31,4	30,4	30,2	28,9	27,8	29,4	28,5
Marzo	25,8	26,1	27,3	28,1	26,5	26,4	23,4	23,2	25,0	24,5
Abril	20,8	20,1	21,2	21,8	20,0	20,2	17,2	17,6	18,8	18,6
Mayo	14,9	15,4	17,7	18,7	16,2	16,1	12,1	12,2	14,2	14,3
Junio	11,4	11,2	13,7	14,8	11,3	11,7	9,8	9,8	10,1	10,2
Julio	12,6	12,6	13,0	12,4	11,5	11,1	9,9	9,8	9,1	9,3
Agosto	14,3	14,5	15,5	15,6	14,4	14,7	12,0	12,3	11,8	11,9
Septiembre	18,6	18,3	19,5	19,7	18,5	18,5	15,8	16,2	16,1	15,7
Octubre	22,5	22,9	23,6	24,0	24,2	24,4	20,0	20,3	21,4	21,3
Noviembre	26,9	26,8	27,7	27,8	28,8	28,6	24,9	25,7	26,0	25,7
Diciembre	29,9	30,4	31,7	31,5	31,2	30,4	29,7	29,6	30,5	30,6

**Tabla 4.6.** Temperatura mínima (°C) mensual promedio para el período 2015-2039 obtenidas con los modelos de cambio global evaluados para los escenarios 2 y 3.

	CMCC- CM_rcp45	CMCC- CM_rcp85	CNRM- CM5_rcp4 5	CNRM- CM5_rcp8 5	CSIRO- Mk3-6- 0_rcp45	CSIRO- Mk3-6- 0_rcp85	GFDL- ESM2G_r cp45	GFDL- ESM2G_rc p85	MRI- CGCM3_r cp45	MRI- CGCM3_r cp85
Enero	18,4	18,2	17,8	17,7	16,8	17,0	19,2	19,2	17,4	17,5
Febrero	17,2	17,2	15,7	16,0	16,1	15,9	18,3	19,0	16,6	15,9
Marzo	14,3	13,3	12,9	13,1	13,6	14,2	14,6	14,9	14,1	13,9
Abril	9,2	10,0	7,9	7,5	9,4	9,5	10,1	10,3	10,2	10,4
Mayo	6,2	6,2	5,8	6,2	6,8	7,1	6,8	6,6	7,6	7,5
Junio	2,8	3,0	2,6	3,1	3,8	3,3	4,9	4,9	4,3	4,4
Julio	3,5	3,7	1,8	1,4	2,7	3,2	4,9	4,8	3,5	3,8
Agosto	4,3	4,1	3,2	3,3	4,9	4,7	6,4	6,1	5,2	5,3
Septiembre	7,0	7,0	6,0	6,4	7,0	6,7	8,7	8,5	8,0	7,8
Octubre	10,5	10,5	9,5	9,8	10,4	10,3	12,5	12,1	11,5	11,7
Noviembre	13,9	14,4	12,4	13,1	14,3	14,1	16,7	15,7	13,8	13,6
Diciembre	17,3	16,9	15,7	15,9	16,0	16,3	20,0	19,5	16,6	17,0

**Tabla 4.7.** Precipitación (mm) mensual promedio para el período 2015-2039 obtenidas con los modelos de cambio global evaluados para los escenarios 2 y 3.

	CMCC- CM_rcp45	CMCC- CM_rcp85	CNRM- CM5_rcp4 5	CNRM- CM5_rcp8 5	CSIRO- Mk3-6- 0_rcp45	CSIRO- Mk3-6- 0_rcp85	GFDL- ESM2G_r cp45	GFDL- ESM2G_rc p85	MRI- CGCM3_r cp45	MRI- CGCM3_r cp85
Enero	14,2	17,3	23,5	20,6	36,5	32,0	11,6	14,3	32,1	46,6
Febrero	4,1	7,4	17,6	16,1	17,0	11,7	12,3	11,2	24,5	19,2
Marzo	6,7	6,9	30,0	23,4	22,2	28,2	18,5	20,9	25,7	20,2
Abril	6,2	9,1	19,3	8,9	12,5	17,0	4,6	7,8	9,7	9,1
Mayo	9,6	6,8	7,0	5,8	4,2	4,0	3,4	2,9	3,6	3,9
Junio	4,1	4,2	6,2	8,0	6,4	5,6	4,6	4,8	14,3	12,0
Julio	4,6	3,8	4,7	5,8	3,4	2,7	4,0	3,8	2,7	3,8
Agosto	2,2	1,5	3,1	2,5	4,3	4,0	2,7	3,0	4,0	3,9
Septiembre	8,8	11,8	17,0	22,7	19,5	14,8	6,2	7,5	13,3	11,9
Octubre	17,5	13,1	42,0	38,2	9,2	11,0	18,1	20,9	23,2	19,1
Noviembre	6,1	5,0	19,1	19,1	15,7	14,3	12,3	14,9	14,4	16,4
Diciembre	7,9	7,0	21,4	30,3	18,1	15,5	24,7	23,9	14,5	14,4

Luego se calculó la tendencia de la serie de cada una de las variables para cada modelo (Tabla 4.8).

**Tabla 4.8.** Ecuaciones de líneas de tendencia de cada variable para el período 2015-2039 y modelo evaluado para los escenarios 2 y 3.

Modelos	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Precipitación (mm)
CMCC-CM_rcp45	$y = 0,0035x + 9,8612$ $R^2 = 0,0029$	$y = -0,0008x + 21,665$ $R^2 = 9E-05$	$y = 3E-05x + 6,3795$ $R^2 = 7E-05$
CMCC-CM_rcp85	$y = 0,0002x + 10,337$ $R^2 = 1E-05$	$y = 0,0037x + 21,036$ $R^2 = 0,002$	$y = -0,0002x + 16,412$ $R^2 = 0,0027$
CNRM-CM5_rcp45	$y = 0,0021x + 9,1649$ $R^2 = 0,001$	$y = 0,002x + 22,923$ $R^2 = 0,0006$	$y = 0,0002x + 8,8825$ $R^2 = 0,0007$
CNRM-CM5_rcp85	$y = 0,001x + 9,111$ $R^2 = 0,0003$	$y = 1E-05x + 22,855$ $R^2 = 2E-08$	$y = -0,0003x + 32,855$ $R^2 = 0,0025$
CSIRO-Mk3-6-0_rcp45	$y = 0,0015x + 9,9642$ $R^2 = 0,0007$	$y = 0,0012x + 21,86$ $R^2 = 0,0002$	$y = -4E-05x + 15,863$ $R^2 = 5E-05$
CSIRO-Mk3-6-0_rcp85	$y = 0,0017x + 9,8999$ $R^2 = 0,0008$	$y = 0,0024x + 21,58$ $R^2 = 0,0008$	$y = -0,0003x + 27,041$ $R^2 = 0,0031$
GFDL-ESM2G_rcp45	$y = 0,0013x + 11,727$ $R^2 = 0,0004$	$y = 0,0003x + 19,31$ $R^2 = 1E-05$	$y = -0,0006x + 40,134$ $R^2 = 0,0195$
GFDL-ESM2G_rcp85	$y = 0,0006x + 11,723$ $R^2 = 7E-05$	$y = 0,0024x + 19,109$ $R^2 = 0,0008$	$y = -0,0002x + 22,728$ $R^2 = 0,0027$
MRI-CGCM3_rcp45	$y = 0,0016x + 10,491$ $R^2 = 0,0008$	$y = 0,0015x + 20,067$ $R^2 = 0,0003$	$y = 0,0005x - 9,4543$ $R^2 = 0,0087$
MRI-CGCM3_rcp85	$y = 0,0012x + 10,557$ $R^2 = 0,0005$	$y = 0,0003x + 20,121$ $R^2 = 9E-06$	$y = -5E-05x + 17,466$ $R^2 = 6E-05$

La información climática de los escenarios 1 y 2 detallada anteriormente, sumada a la información de base de los cultivos, suelo y riego que se presentó del capítulo 3, se utilizó como input del modelo de cultivos CROPWAT.

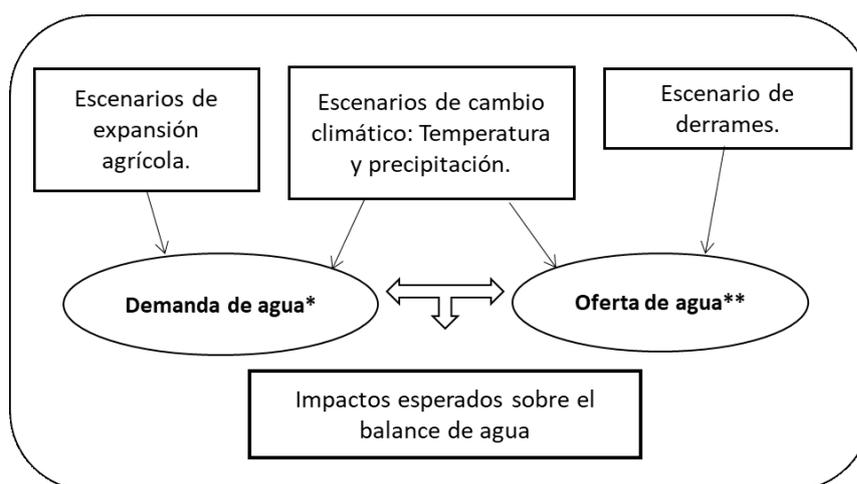
Las evaluaciones de requerimientos de riego se realizaron mediante modelo CROPWAT, para los escenarios 1, 2 y 3. En el caso de los escenarios 2 y 3 se corrió CROPWAT considerando todos los modelos de cambio climático. Se seleccionó un suelo arenoso (características descriptas en el capítulo 3.) y se aplicó el método FAO/AGLW para el cálculo de la precipitación efectiva. En cuanto a la programación de riego, se planteó regar a agotamiento crítico, reponiendo el perfil del suelo a capacidad de campo en cada riego. En cuanto a los sistemas de riego a desarrollar se proyecta en todos los casos sistemas de riego presurizados, con una eficiencia de aplicación del 90 %.

Para el cálculo final de las demandas de riego en el caso de los escenarios 2 y 3 se seleccionó el modelo de cambio climático que mayor demanda de agua para riego obtuvo para ambos cultivos. Luego se calculó la demanda de agua total para la expansión en el SAM y el SAM y PC para los tres escenarios.

### 4.2.2.3. Oferta hídrica

En cuanto a los escenarios de oferta hídrica (Tabla 4.2), se consideró el derrame superficial promedio del río Colorado de toda la serie medido en la estación Buta Ranquil (Neuquén) en el escenario 1; el promedio de la misma estación para período 2000 a 2015 en el escenario 2 y el de un año seco de la serie histórica de la misma estación en el escenario 3. En este sentido se seleccionaron los tres escenarios porque al año 2015, se habían registrado 5 ciclos donde el derrame fue menor al promedio de la serie (capítulo 2), registrando un déficit acumulado de 10.200 hm<sup>3</sup>, además de la tendencia negativa de la serie histórica de derrame para la estación antes mencionada.

Como se ha presentado anteriormente se combinaron escenarios de expansión, de cambio climático y de oferta de agua (Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Diagrama simplificado de la metodología planteada en este capítulo. Un asterisco (\*) hace referencia al capítulo 2 y dos asteriscos (\*\*) al capítulo 3.

## 4.3. RESULTADOS

### 4.3.1. Escenario 1

Bajo condiciones climáticas promedio en la cuenca media del río Colorado la evapotranspiración del cultivo de alfalfa fue de 1346 mm y de 895 mm para el maíz (Tabla 4.9). Para cubrir dichas demandas de agua se requiere del riego, que con una eficiencia de aplicación del 90 %, se necesitarían 14.377 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> en el caso del cultivo de alfalfa y 8640 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> para maíz. En consecuencia, para el desarrollo de este escenario, que corresponde a 20.705 ha del SAM, se demandarían 277,5 hm<sup>3</sup> de agua del río Colorado (Tabla 4.9) que representa el 43,8 % del cupo asignado a la provincia de La Pampa en el Acuerdo (Tabla 4.1). De esta manera se necesitarían 24,5 hm<sup>3</sup> adicionales a los consumidos por el riego en dicha provincia en el año 2015 (Tabla 4.1).

**Tabla 4.9.** Parámetros estimados de evapotranspiración del cultivo (ETc), precipitación efectiva (Pe) y requerimientos de riego (Re) por campaña para los cultivos de alfalfa y maíz.

Cultivo	ETc (mm)	Pe (mm)	RR (mm)
Alfalfa	1346,4	39,3	1307,2
Maíz	895,4	31,2	864,0

Considerando las mismas condiciones climáticas, pero ampliando el área de expansión a la PC, llegando a un total de 56.705 ha, se necesitarían 759,9 hm<sup>3</sup> de agua del río Colorado (Tabla 4.10). Esto representa un 20 % más del cupo total que tiene asignado la provincia de La Pampa según el Acuerdo (Tabla 4.1). En este último escenario de expansión la actividad agrícola bajo riego estaría compitiendo por el agua con otros sectores y usos: urbano, industrial y recreativo.

**Tabla 4.10.** Demanda de agua para riego por cultivos y demandas para expansión del Sistema de Aprovechamiento Múltiple (SAM) y demandas bajo expansión del Sistema de Aprovechamiento Múltiple y Planicie Curacó (SAM+PC).

Cultivo	Demanda riego (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Demanda de riego expansión SAM (hm <sup>3</sup> )	Demanda riego expansión SAM+PC (hm <sup>3</sup> )
Alfalfa	14.377	238,14	652,19
Maíz	9504	39,35	107,78

#### 4.3.2. Escenario 2

Los MCGs muestran cambios en el clima para un futuro cercano en la cuenca media del río Colorado e indican aumentos en la temperatura mínima y máxima y disminución de la precipitación. A partir de los valores obtenidos de las variables de temperatura mínima, máxima y precipitación, se obtuvo la evapotranspiración de los cultivos (ETc), la precipitación efectiva (Pe) y los requerimientos de riego (RR) bajo los modelos analizados, para los cultivos de alfalfa y maíz (Tabla 4.11 y 4.12).

Como se observa en la Tabla 4.5 la ETc de alfalfa estimada varía entre 1220,4 y 1338,9 mm, con una Pe que cubre apenas entre el 0,02 al 1,8 % de las necesidades de agua que demanda el cultivo. Por esta razón el cálculo de los requerimientos de riego y la planificación del momento de riego y lámina aplicada es sumamente importante, por los volúmenes de agua que se requieren en estos sistemas.

**Tabla 4.11.** Parámetros estimados a partir de CROPWAT: Evapotranspiración del cultivo de alfalfa (ETc) Precipitación efectiva (Pe), requerimiento de riego (RR) a partir de los variables simuladas por los modelos climáticos globales para el futuro cercano (2015-2039).

Modelo	ETc (mm)	Pe (mm)	RR (mm)
CMCC-CM 4.5	1279,2	0,2	1279,0
CMCC-CM 8.5	1284,4	0,4	1284,0
CNRM-CM5 4.5	1326,0	23,9	1302,8
CNRM-CM5 8.5	1338,9	20,5	1319,0
CSIRO-Mk3.6.0 4.5	1297,5	16,5	1281,0
CSIRO-Mk3.6.0 8.5	1294,4	16,6	1277,8
GFDL-ESM2G 4.5	1227,3	6,4	1221,0
GFDL-ESM2G 8.5	1220,4	7,9	1212,6
MRI-CGMCM3 4.5	1262,0	20,9	1241,2
MRI-CGMCM3 8.5	1255,5	22,4	1233,2

En el caso del cultivo de maíz, la ETc estimada varía entre 855 y 931,2 mm con una Pe que cubre entre 0,01 y 2,46 % de las demandas del cultivo (Tabla 4.12). El maíz es menos demandante de agua respecto al cultivo de alfalfa, la máxima ETc estimada para el maíz es de 931,2 mm marcando una diferencia de 406,8 mm respecto al cultivo de alfalfa.

**Tabla 4.12.** Parámetros estimados a partir de CROPWAT: Evapotranspiración del cultivo de maíz (ETc) Precipitación efectiva (Pe), requerimiento de riego (RR) a partir de los variables simuladas por los modelos climáticos globales para el futuro cercano (2015-2039).

Modelo	ETc (mm)	Pe (mm)	RR (mm)
CMCC-CM 4.5	896,9	0,1	896,8
CMCC-CM 8.5	896,9	0,4	896,5
CNRM-CM5 4.5	925,5	16,8	908,5
CNRM-CM5 8.5	931,2	16,	915,0
CSIRO-Mk3.6.0 4.5	908,7	16,3	892,3
CSIRO-Mk3.6.0 8.5	905,9	16	889,7
GFDL-ESM2G 4.5	867,5	6	861,4
GFDL-ESM2G 8.5	855,5	6,9	848,5
MRI-CGMCM3 4.5	889,7	19,4	870,1
MRI-CGMCM3 8.5	886,1	21,8	864,3

Considerando las máximas demandas de los cultivos de alfalfa y maíz (Tabla 4.13), para el desarrollo de este escenario de expansión agrícola y cambio climático, se necesitarían 278,22 hm<sup>3</sup> de agua del río Colorado para cubrir las demandas de los cultivos en la expansión del SAM (Tabla 4.14). Este valor representa el 43.95 % del cupo de agua destinado por el Acuerdo a la provincia de La Pampa, y 25,22 hm<sup>3</sup> por encima del consumo del riego en la provincia para el año 2015.

Bajo las mismas condiciones climáticas, pero ampliando el área a PC, se necesitarían 772,33 hm<sup>3</sup>, que representa un 22 % más de agua respecto al cupo total de La Pampa, y 519,3

hm<sup>3</sup> más respecto al consumo de agua para riego en el año 2015 (Tabla 4.14). En este segundo escenario de expansión, si se desarrollaran las 56.705 ha con un 80 % de alfalfa y 20 % de maíz, el cupo de agua asignado (633 hm<sup>3</sup>) a la provincia de La Pampa no alcanzaría para cubrir los requerimientos de riego y además entraría en competencia con el resto de los usos: urbano, minería e hidrocarburos. La demanda total de este escenario representa un 16,9 % del total del derrame (4559 hm<sup>3</sup>) del río Colorado.

**Tabla 4.13.** Parámetros estimados de evapotranspiración del cultivo (ETc), precipitación efectiva (Pe) y requerimientos de riego (Re) por campaña para los cultivos de alfalfa y maíz.

Cultivo	ETc (mm)	Pe (mm)	RR (mm)
Alfalfa	1338,9	20,5	1319
Maíz	931,2	16,0	915

**Tabla 4.14.** Demanda de agua de riego por cultivos y demandas bajo expansión del Sistema de Aprovechamiento Múltiple (SAM) y demandas bajo expansión del Sistema de Aprovechamiento Múltiple y Planicie Curacó (SAM+PC).

Cultivo	Demanda riego (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Demanda de riego expansión SAM (hm <sup>3</sup> )	Demanda de riego expansión SAM+PC (hm <sup>3</sup> )
Alfalfa	14.509	240,33	658,18
Maíz	10.065	37,89	114,15

### 4.3.3. Escenario 3

Bajo este escenario, las demandas de agua de los cultivos para la expansión planteada son iguales a las presentadas en el escenario 2, aunque la oferta de agua asumida aquí es menor, un 51 % menos equivalente a 2205 hm<sup>3</sup>. En este caso se generaría una fuerte competencia por el uso del agua ya que se necesitaría el 11,8 % del derrame del río Colorado sólo para abastecer de agua para riego la expansión del SAM y 32,7 % del derrame en caso de expansión del SAM y PC. Además, se debe abastecer de agua a toda la cuenca para sus diversos usos: urbano, minería e hidrocarburos y recreativo, y abastecer de agua para riego a la cuenca baja del río Colorado, principalmente en la provincia de Buenos Aires. Actualmente es el sector y provincia que mayor demanda de agua presentan (1080 hm<sup>3</sup>). Ambas demandas para la agricultura bajo riego, la proyectada bajo este escenario (772,3 hm<sup>3</sup>) y la demandada por la provincia de Bs As, tomando como referencia el año 2015, suman 1852,33 que representa el 78,6 % del derrame asumido bajo este escenario. De esta manera este escenario sería inviable, ya que la oferta de agua es una limitante para el desarrollo y sustentabilidad de las actividades y centros poblados de la cuenca.

#### 4.4. DISCUSIÓN

En este contexto, la construcción de escenarios ofrece herramientas de gran utilidad para planificar alternativas de desarrollo futuras compatibilizando la producción y la conservación, resultando en territorios ambiental y socialmente sostenibles. Gavier Pizarro *et al.* (2014)

El proceso metodológico de construcción de escenarios descrito en este capítulo es una versión sencilla del proceso, en vistas al OT. La construcción de escenarios no es OT *per se*, sino que es un método más que provee elementos, pautas y recomendaciones, para ser utilizadas como ayuda y soporte en un proceso más amplio que es el OT. En este sentido, el análisis de escenarios concuerda con la filosofía de los procesos de ordenamiento, donde la planificación debe ser un proceso *top down – bottom up* (de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba), es decir, un proceso de retroalimentación entre los planificadores del uso del territorio y el público involucrado o afectado (Gavier Pizarro *et al.*, 2014). En esta investigación queda pendiente la retroalimentación con actores y público en general, siendo el pilar más importante para el OT.

En cuanto a los escenarios de cambio climático, parte de los errores de los MCGs en la representación de los climas regionales provienen de su baja resolución horizontal (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015). Esta podría ser la causa de la subestimación de las precipitaciones, o de las diferencias encontradas con la estación meteorológica de referencia en este estudio.

El modelo CROPWAT es muy limitado para la modelación de escenarios, debido a que solo calcula balances hídricos y disponibilidad de agua de los cultivos. Aunque sirve como referencia para el objetivo del presente estudio, no permite incluir otros parámetros como GEI para proyectar rendimientos en escenarios de cambio climático. Según Morábito *et al.* (2015) bajo escenarios de cambio climático se producirían incrementos en los requerimientos de riego e incrementos en la producción, en coincidencia con lo expuesto, Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) afirman que los cultivos perennes incrementarán las demandas hídricas. Por las limitaciones del modelo utilizado en esta investigación, no se pudo verificar el incremento en la producción dado que el CROPWAT se basa en el balance de agua en el suelo y no en el rendimiento de los cultivos.

Ante la evaluación de estos escenarios aquí planteada, la mayor demanda de agua y la competencia por el uso por parte de los distintos sectores surge como uno de los principales conflictos ambientales en la cuenca del río Colorado. Por un lado, por la competencia por uso del suelo entre los oasis de riego y la actividad petrolera y por otro lado por la competencia por el uso del agua entre el consumo de los asentamientos urbanos, la actividad agrícola y la industria (minería e hidrocarburos). Por ello, este es un territorio de alta fragilidad, principalmente ante escenarios de bajo caudal.

#### 4.5. CONCLUSIONES

Los cambios en los patrones actuales de la temperatura tendrían efectos en la demanda hídrica de los cultivos, en el manejo de los cultivos y en la planeación de los recursos hídricos de los oasis de riego. Potencialmente, el incremento de la temperatura ambiental, por efecto del cambio climático, aumentaría las demandas hídricas por incremento de la ETC.

En la cuenca media del río Colorado se encuentran tierras con potencial para el futuro desarrollo de la actividad agrícola bajo riego, dado que se cuenta con tierras disponibles, infraestructura de riego y drenaje, energía eléctrica y agua, con un desarrollo actual de apenas un 10 % de la superficie con aptitud.

Este análisis permitió identificar las futuras demandas de agua en las áreas potenciales para el desarrollo de actividades agrícolas bajo riego, teniendo en cuenta el cambio climático proyectado, las demandas de agua potenciales de los cultivos y la disponibilidad de agua futura en el río Colorado.

Utilizar la información generada de manera adecuada, colaborará en la toma de conciencia por parte del productor para mejorar la eficiencia de aplicación dentro de su establecimiento, mejorar la toma de decisiones de los administradores del recurso y a elaborar políticas adecuadas para el uso cada vez más eficiente y sustentable del agua.

Además, mediante el análisis del desarrollo de futuras áreas bajo riego se identificaron posibles conflictos de la cuenca, basado en la demanda de agua. Esta tesis permitió conocer de forma cualitativa las zonas que deben ser atendidas rápidamente, debido a que se ocasionarían impactos negativos ambientales y externalidades. La cuenca del río Colorado es particularmente vulnerable al cambio climático por su dependencia de la disponibilidad de agua, principalmente para riego y la competencia actividades, como urbanas e hidrocarburíferas.

A partir de la comparación de los escenarios construidos, se determinó que frente a la necesidad de desarrollo de la agricultura bajo riego en la cuenca media del río Colorado donde el riego es de tipo integral, es necesario discutir la redistribución de caudales planificados y pautados en el Acuerdo. Un aspecto a tener en cuenta para este punto es la redistribución de caudales por provincia teniendo en cuenta las ofertas hídricas de cada provincia que compone la cuenca.

#### **4.6. BIBLIOGRAFÍA**

- Boninsegna, J., Villalba, R.** 2006. Los Escenarios de Cambio Climático y el impacto en los Caudales. Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan. Segundo informe a la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 19 p.
- Boninsegna, J. A.** 2014. Impacto del cambio climático en los oasis del oeste argentino. Ciencia e investigación. Tomo 64 (1): 45-58 p.
- Boninsegna, J., Llop, A.** 2015. Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos. La economía del cambio climático en la Argentina. CEPAL - Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 161.67 p.
- Chen, L. Y., Yang, H. C.** 2008. Scenario simulation and forecast of land use/cover in northern China. Chinese Science Bulletin, 53 (9): 1401-1412 p.
- Cirone, M.** 2014. La Gestión de la cuenca del río Colorado: Análisis de los aspectos más destacables del COIRCO. Congreso Internacional de Códigos y Desafíos para enfrenar la crisis del agua. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. 169-178 p. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/43500>

- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado).** 2015. Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. Disponible en: [www.coirco.com.ar](http://www.coirco.com.ar)
- Cole, S.** 2001. Dare to dream: Bringing futures into planning. *Journal of the American Planning Association* 67: 372-383 p.
- Countryman, D. W., Murrow, J. C.** 2000. Economic analysis of contour tree buffer strips using present net value. *Journal of Soil and Water Conservation* 55: 152-160 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).** 2015. Estudio del potencial de ampliación del riego en Argentina. UTF/ARG/017/ARG Desarrollo Institucional para la Inversión. 121 p. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5183s.pdf>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).** 2000. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC. Resumen para responsables de políticas. Escenarios de emisiones. 20 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).** 2008. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, Pachauri, RK y Reisinger, A. (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland.
- García, M. T., Mas, J. F.** 2008. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas* 67: 7-19 p.
- Gavier Pizarro, G., Calamari, N., Piquer Rodriguez, M., Kuemmerle, T.** 2014. El método de construcción de escenarios aplicado al ordenamiento territorial en Ordenamiento Territorial Rural: Conceptos, métodos y experiencias. Editores: Puelo, J. M., Jobbágy, E. G., Laterra, P., Dieguez, H., García Collazo, M.A., Panizza, A. Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Agricultura, Ganadería Y Pesca y Organización De Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Buenos Aires, Argentina. 575 p.
- Greco, J., Daranzoff, M., Kruse M.** 2010. La Comisión Técnica Fiscalizadora y el Control de la Actividad Petrolera en la Cuenca del Río Colorado. En Dalmaso, G., Camiletti, C. y Hernández R. (coord.) Tercer Congreso Pampeano del Agua, 1º ed., Santa Rosa, 145-153 p.
- MAGFOR (Ministerio agropecuario y forestal).** 2000. Manejo Integrado de cuencas Hidrográficas en la Región de las Segovia. Managua, NI. 199p. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2300e/A2300e.pdf>
- MAGyP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca).** 2012. Bases para el ordenamiento del territorio rural argentino. Buenos Aires, Argentina. Disponible en: [https://ced.agro.uba.ar/ubatic/sites/default/files/files/libro\\_ordenamiento\\_territorial\\_baja.pdf](https://ced.agro.uba.ar/ubatic/sites/default/files/files/libro_ordenamiento_territorial_baja.pdf)
- Mahmoud, M., Y. Liu, H. Hartmann, S. Stewart, T. Wagener, D. Semmens, R. Stewart, H. Gupta, D. Dominguez, F. Dominguez, D. Hulse, R. Letcher, B. Rashleigh, C. Smith, R. Street, J. Ticehurst, M. Twery, F. Van Delden, H. Waldick, D. White, L. Winter.** 2009. A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software* 24: 798-808 p.
- Masís Campos, R., Vargas Picado, H.** 2014. Incremento de áreas impermeables por cambios de usos de la tierra en la microcuenca del río Burío. *Rev. Reflexiones* 93 (1): 33-46 p.

- Morábito, J., Salatino, S., Hernández, R.** 2015. Requerimientos hídricos e incremento de la productividad de los cultivos bajo riego ante escenarios de cambio climático en el noreste de Argentina. V Congreso Nacional – IV Congreso Iberoamericano de Riego y Drenaje. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ingeniería Agrícola. Departamento de Recursos Hídricos. Lima, Perú.
- Nassauer, I., Corry, R.** 2004. Using normative scenarios in landscape ecology. *Landscape Ecology* 19: 343-356 p.
- Nuñez, M.** 2006. Desarrollo de escenarios climáticos en alta resolución para Patagonia y zona cordillerana. Período 2020/2030. Proyecto Desarrollo de Escenarios Climáticos y Estudios de Vulnerabilidad. Informe Nro 3. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 22 p.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., Montero-Martínez, M. J.** 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45 (1): 1-11 p.
- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Lateral, P.** 2014. Bases conceptuales del ordenamiento Territorial Rural. Capítulo 1. En Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Lateral, P., Dieguez, H., García Collazo, M. A., Panizza, A. (eds). *Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias*. Universidad Nacional de Buenos Aires. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Organización de Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Peterson, G. D., Cumming, G. S., Carpenter, S. R.** 2003. Scenario planning: a tool for conservation in an uncertain world. *Conservation Biology* 17: 358-366 p.
- Prins, A. G., Eickhout, B., Banse, M., Meijl, H., Rienks, W., Woltjer, G.** 2011. Global impacts of european agricultural and biofuel policies. *Ecology and Society* 16: 49 p.
- Rosete, F. A., Pérez, J. L., Bocco, G.** 2009. Contribución al análisis del cambio de uso del suelo y vegetación (1978-2000) en la Península de Baja California, México. *Investigación Ambiental*: 1: 70-82 p.
- Rudel, T. K., Defries, R., Asner, G. P., Laurance, W. F.** 2009. Changing drivers of deforestation and new opportunities for conservation. *Conservation Biology* 23: 1396-1405.
- Ruhl, J. B., Kraft, S. E., Lant, C. L.** 2007. *The Law and Policy of Ecosystem Services* Washington (DC) Island Press.
- Samson, F. B., Knopf, F. L.** 1996. Putting 'ecosystem' into natural resource management. *Journal of Soil and Water Conservation* 51: 288-292 p.
- Schoonenboom, I. J.** 1995. Overview and state of the art of scenario studies for the rural environment. In Schoute, J. F. T.; Finke, P. A.; Veeneklaas, F. R. and Wolfert, H.
- Schwartz, P.** 1991. *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. Doubleday, New York. USA.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.** 2015. Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. "Cambio Climático en Argentina; Tendencias y Proyecciones" (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera). Buenos Aires, Argentina.
- Steinitz, C., MacDowell, S.** 2001. Alternative Futures for Monroe County, Pennsylvania. En: Dale V. y Haeuber R.A. eds.: *Applying Ecological Principles to Land Management*. Springer-Verlag, New York, USA.

- Swetnam, R. C., Ragou, P., Firbank, L. G., Hinsley, S. A., Ballamy, P. E.** 1998. Applying ecological models to altered landscapes: scenario-testing with GIS. *Landscape and Urban Planning* 41: 3-18 p.
- Tilman, D., J., Fargione, B., Wolff, C., D'Antonio, A., Dobson, R., Howarth, D., Schindler, W.H., Schlesinger, D. Simberloff., Swackhamer, D.** 2001. Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science* 292: 281-284 p.
- Vega, E., Baldi, G. Jobbágy, E. G., Paruelo, J. M** 2009. Land use change patterns in the Río de la Plata grasslands: the influence of phytogeographic and political boundaries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.134: 287-292 p.
- Xiang, W., Clarke, K. C.** 2003. The use of scenarios in land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design* 30: 885-909 p.

# **CAPÍTULO 5**

---

## **DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES FINALES y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

## 5.1. DISCUSIÓN GENERAL

El territorio de la cuenca del río Colorado es marcadamente heterogéneo en términos ambientales, en su oferta hídrica y de servicios ecosistémicos, ya que está compuesto por distintas ecorregiones naturales. La importancia de este estudio de tesis radicó en que la cuenca es considerada como unidad territorial con el agua como eje vertebral. La necesidad de estudiarla como una unidad surge de la relación de la disponibilidad hídrica entre las distintas regiones, la coexistencia de distintos usos de una misma fuente hídrica y los cambios en los usos y coberturas de la tierra. Como se planteó en esta investigación, y en coincidencia con De Jong (2004) el estudio de la cuenca puede realizarse a diferentes escalas, siendo posible analizar la totalidad de la misma o sus subcuencas.

En la cuenca alta del río Colorado se acumula la nieve durante el otoño e invierno y se abastece de agua a toda la cuenca. En la cuenca media, las precipitaciones son escasas, entre 300 y 400 mm anuales y todos los usos (urbano, agrícola con riego, industrial) se abastecen del agua del río Colorado. En la cuenca baja, las precipitaciones son superiores a 400 mm, y el riego es de tipo suplementario.

A partir del uso de información provista por sensores remotos, se cuenta con nuevas fuentes continuas de información que han posibilitado el estudio temporal y espacial de las componentes del balance de agua (e.g. Paruelo *et al.*, 2014). La principal fuente de agua en la cuenca del río Colorado proviene de la cobertura de nieve que se almacena en la cuenca alta. La misma ha sido estudiada en esta investigación a partir de información satelital, gracias a las propiedades físicas de la nieve que permiten su monitoreo desde el espacio (Dozier, 1989; Riggs *et al.*, 2006; entre otros). Existen varios estudios asociados a la nieve en la región cuyana y patagónica de Argentina que han utilizado el producto MOD10A2 (López *et al.*, 2008; Cogliati *et al.*, 2013a-b, 2014a-b, 2015a-b-c; Cara *et al.*, 2016; Groch *et al.*, 2017), el mismo que se utilizó en esta investigación. Sin embargo, los resultados alcanzados para el área bajo estudio son inéditos, y el modelo presentado en esta investigación constituye una herramienta sencilla y práctica para el seguimiento espacial y temporal de la cobertura de nieve en tiempo real. Si bien no se ha tenido en cuenta el espesor de nieve ni la densidad, estimó de manera adecuada la cobertura de nieve en las subcuencas del río Grande ( $R^2=0,79$ ) y Barrancas ( $R^2=0,56$ ). A partir de estos estudios, y de la investigación realizada se reconoce que es necesario incorporar estaciones de muestreo para cuantificar información del equivalente en agua, la profundidad y la densidad de la nieve para hacer estimaciones adecuadas de la escorrentía en la cuenca, e integrarla con los datos de sensores remotos para su validación. En esta investigación se ha demostrado que existe relación entre escorrentía y área cubierta de nieve estimada mediante información satelital.

Conocer la cobertura de nieve y el caudal, en varias secciones de las subcuencas constituye un paso importante para reducir las incertidumbres inherentes asociadas con la tendencia de estas variables y abre la posibilidad de formular estrategias de manejo adaptadas "top down", en coincidencia con Masiokas *et al.*, (2013). Durante los últimos 6 años el caudal del río Colorado ha registrado valores por debajo de su promedio ( $146 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ ), que representa  $10.939 \text{ hm}^3$  de déficit, en coincidencia con lo presentado por COIRCO (2015). También se encontró relación, inversa en este caso, entre el caudal y el contenido de sales (Aumassanne y Fontanella, 2015). De esta manera, las bajas en el caudal influyen directamente sobre la calidad del agua, principalmente para el agua de riego. La misma aumentó su salinidad promedio

histórico de  $896 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  a  $1156 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . En este sentido, aunque en la actualidad la cantidad de sales es mayor, no ha superado los límites establecidos por el comité de cuenca en la porción media del río Colorado, donde se ha centrado esta tesis. Esto indica que el agua sigue siendo apta para riego, aunque podría afectar a cultivos sensibles como los frutales de pepita y de carozo, el trébol forrajero, entre otros (Allison *et al.*, 1954; García, 2012). Además, se debería considerar láminas de riego para el lavado de los perfiles de suelo en caso de presentarse salinización de los mismos.

En la cuenca media del río Colorado han ocurrido los mayores cambios en el uso y la cobertura de la tierra en el período analizado. Estos cambios están asociados a la actividad petrolera, donde se elimina la vegetación natural y a la agricultura bajo riego, donde en esta última se reemplaza por cultivos anuales o perennes bajo riego. Dichos cambios generan una disminución de la cobertura vegetal respecto a la situación de monte precedente, lo que incrementa el riesgo de erosión y el volumen de escurrimiento superficial como lo indica Vázquez Amábile (2018). En la zona agrícola bajo riego de 25 de Mayo (La Pampa), se encuentra el mayor desarrollo agrícola de la cuenca media, donde predomina el cultivo de alfalfa y en segundo lugar el maíz. Los mismos alcanzan rendimientos potenciales de  $19 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Zamora *et al.*, 2016) y  $13 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Beget *et al.*, 2016), respectivamente. Como las precipitaciones cubren apenas el 15 % de los requerimientos hídricos de los cultivos, el riego es de tipo integral. Los rendimientos señalados demuestran que, además de satisfacerse la demanda hídrica de los cultivos, el agua utilizada para riego es adecuada por su calidad. Además, que la zona presenta condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de estas especies. La dotación de agua para riego y su calidad en la cuenca media del río Colorado se enfrentan a nuevos desafíos como son la disminución del caudal, el aumento de la salinidad y los posibles cambios en los sedimentos que componen el agua. El manejo actual del riego por parte de los productores no se ajusta a una planificación basada en un balance de agua del suelo de los lotes. De esta forma no se cubren de manera total las demandas de los cultivos. El manejo deficiente del riego en oasis que, ya sea por excesos en las láminas de agua aplicadas o por sistemas de drenajes deficientes, provoca la salinización y/o sodificación del suelo (Prieto Garra *et al.*, 2015).

La cuenca media del río Colorado tiene perspectivas para el crecimiento del sector productivo (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública, 2013), ya que la misma cuenta con características agroclimáticas que permiten el desarrollo de diversos cultivos, agua con aptitud para riego y servicios de infraestructura de riego y drenaje, tecnología en sistemas de riego, y tierras disponibles que le confieren diferencias con otras áreas de Argentina. Es por eso que se plantearon escenarios de expansión de la actividad agrícola bajo riego considerando escenarios climáticos a partir de modelos de circulación global. Como resultado, se pudo conocer que el agua será limitante a la expansión de la agricultura bajo riego, con un planteo de maíz y alfalfa, en todo el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado. La oferta hídrica de la cuenca está sujeta a la variabilidad anual e interanual (Boninsegna y Llop, 2015) y a la disminución de caudal durante las últimas décadas. Además, el crecimiento de las áreas bajo riego se encuentra condicionado por la expansión y ocupación del territorio con otros usos no agropecuarios, generando además nuevas demandas de agua, provenientes principalmente de la industria petrolera fuertemente influida por factores económicos y financieros.

A pesar de que los cultivos modelados demandan grandes volúmenes de agua, habría que pensar en puntos estratégicos para disminuir el consumo futuro de agua por parte de la

actividad agrícola bajo riego: i) mejorar la eficiencia global de los sistemas bajo riego y ii) analizar otros cultivos más eficientes y/o distintos planteos productivos. En cuanto al primer punto se debe lograr una buena eficiencia de conducción y aplicación para lo cual se debe seguir desarrollando obras de infraestructura para minimizar las pérdidas de agua por las filtraciones de los canales secundarios, infiltración y evaporación (Morábito *et al.*, 2007). Asimismo, es necesario el cambio de los sistemas de riego gravitacional a presurizados, principalmente en la cuenca baja donde la superficie bajo riego es la mayor de toda la cuenca, aumentando de esta forma la eficiencia de aplicación. El segundo punto planteado hace referencia a la búsqueda de una producción con menos demandas o una producción diferencial, con valor agregado en origen, siendo además estas producciones más eficientes en el uso del agua. En este sentido, se destacan las producciones frutihortícolas actuales y futuras de la región. Además, son necesarias en la cuenca políticas de desarrollo comunes e integrales tal como lo plantea Michelinini (2010) y Sili y Espasa (2015), por ejemplo, que favorezcan la conexión entre regantes de la cuenca baja y de la cuenca alta, la interacción entre los núcleos urbanos y las áreas de regadío, entre otras.

## **5.2. CONCLUSIONES FINALES, APORTES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

La oferta hídrica de la cuenca tiene condicionantes climáticos y geográficos, como resultado de esto, su régimen hídrico está sometido a variaciones anuales e interanuales. Las actividades realizadas en esta tesis permitieron obtener una caracterización hidrológica a nivel de cuenca, mediante la evaluación de las principales componentes del balance de agua regional, como es el caso de la cobertura de nieve, la evapotranspiración, la precipitación y el derrame.

En cuencas de grandes extensiones e inaccesibles para la toma de datos, especialmente durante el invierno y la primavera, como es el caso de las subcuencas bajo estudio, la información derivada de sensores remotos es una importante herramienta para el seguimiento de la cobertura de nieve. La combinación de la altitud, pendiente y orientación del terreno con la superficie y permanencia de nieve, permitió comprender la variación espacial del área cubierta de nieve en la cuenca alta del río Colorado. Los resultados revelan la distribución regional de la nieve, los gradientes de altitud de la acumulación de nieve y las variaciones de su distribución en la superficie en el tiempo (inter e intra-anual), permitiendo identificar sectores de almacenamiento de nieve. Además, los patrones espaciales de la cobertura de nieve y sus tendencias ayudan a identificar áreas más o menos vulnerables frente a escenarios climáticos.

El estudio desarrollado en esta tesis respecto a la dinámica espacio - temporal de la cobertura nival generó la serie histórica de datos más larga para la cuenca del río Colorado. Este tema no presentaba antecedentes de investigación en la cuenca. Además, se generó una metodología de bajo costo y objetiva que permite cuantificar en tiempo real la cobertura de nieve de forma periódica, obteniendo un monitoreo continuo a partir de información proveniente de sensores remotos. Se recomienda seguir aplicando esta metodología en otras regiones con características agro-climáticas similares de manera que sirvan de validación. Sin embargo, es fundamental contar con mayor información sobre densidad, espesor y humedad de la nieve, ya sea mediante relevamientos a campo o la instalación de una red de monitoreo permanente. También es necesario correlacionar los valores estimados de cobertura de nieve con imágenes de mayor resolución temporal. A su vez, queda pendiente el estudio de la

temperatura de superficie y su relación con la cobertura de nieve en cada piso altitudinal de las subcuencas, para determinar patrones de fusión de la nieve.

Se ha demostrado que existe una muy buena relación entre escorrentía y área cubierta de nieve, y de esta manera se aporta información para la planificación y el manejo del agua en la cuenca. Además, se comprobó la relación que existe entre el caudal y el contenido de sales en el agua del río Colorado, en dos secciones, cuenca media y baja. Disponer de información de precipitación y caudal en todas las secciones de la cuenca, permitió conocer sus particularidades y comparar valores actuales e históricos para visualizar sus tendencias, lo que resulta de suma importancia para las organizaciones de usuarios y administradores del recurso, técnicos, tomadores de decisión, etc. Se sugiere realizar mediciones de caudal y calidad de los retornos de agua al cauce principal para futuras investigaciones, con la evaluación de parámetros químicos y biológicos, principalmente de las poblaciones agua arriba del embalse de Casa de Piedra, donde el río se encuentra sin regulación y donde el aprovechamiento del río tiene múltiples usos (urbano, riego, petrolero y minero).

En cuanto a la descripción obtenida de usos y coberturas del suelo se sugiere que en las zonas donde se desarrolla la actividad petrolera, se evalúe la cantidad y la calidad de sedimentos que llegan al cauce principal después de un evento de precipitación, y cuál es la "ruta" de los mismos, para poder determinar la relación entre los cambios en el uso y la cobertura del suelo y la dinámica hídrica. Es decir, el efecto de la fragmentación del hábitat sobre la calidad del medio acuático. Además, esto podría ocasionar inconvenientes técnicos e infraestructurales en los sistemas de riego (obras de canales y compuertas) y los equipos de riego presurizado, ubicados aguas abajo de donde se encuentra el mayor desarrollo de la actividad hidrocarburífera.

El uso y cobertura más investigado en esta tesis es la agricultura bajo riego en la cuenca media, donde se estimó la evapotranspiración para los cultivos de alfalfa y maíz, y sus requerimientos de riego. A su vez se estimó su huella hídrica verde y azul. A nivel de lote es necesario aumentar la eficiencia en el uso del agua y que los productores cuenten con mediciones a campo en tiempo real (sondas de humedad de suelo, caudalímetros) lo que permitiría la calibración y validación de modelos de cultivos y ajustar balances de agua para que la programación del riego de los productores sea más eficiente. Quizás la incorporación de un análisis económico de las producciones actuales y futuras, facilite el planteo y la definición de escenarios de expansión agrícola, desde otro enfoque. En complemento a los estudios de variabilidad climática, como lo presentado en esta investigación, es necesario evaluar medidas de adaptación y mitigación para los productores y sus costos. Esto deja el camino abierto a futuras investigaciones en materia de la economía relacionada a la producción en un marco de variabilidad climática.

Ante escenarios de bajo caudal, el agua sería una limitante para el desarrollo de la agricultura y potenciaría el conflicto entre los distintos sectores usuarios del agua del río Colorado. Debido a la expansión de la actividad agrícola va a existir una demanda de agua cada vez mayor en la cuenca, esta demanda encontrará un límite en la disponibilidad real de agua existente y en su calidad. En consecuencia, existirían potenciales conflictos entre actores en la cuenca del río Colorado, por ocupación del territorio y por el uso del agua. Frente a escenarios de cambio climático y de menor dotación de agua, deberían considerarse nuevas obras de regulación en la cuenca alta para disponer de una reserva de agua en períodos de bajo caudal, y así abastecer el consumo humano y la actividad bajo riego y. En términos productivos se

recomienda pensar en sistemas más diversificados, cultivos más eficientes en el uso del agua, de manera de aumentar la eficiencia global del sistema de riego. Asimismo, favorecer el desarrollo de políticas públicas que faciliten a los productores la adopción de tecnologías necesarias para ser más eficientes en el uso del agua. Es necesario profundizar el estudio de la variabilidad climática en toda la cuenca del río Colorado, para determinar con mayor detalle zonas más o menos vulnerables, con proyecciones de futuro cercano y lejano.

Se aceptan las hipótesis planteadas en esta tesis, debido a que se comprobó que, en la cuenca del río Colorado, al ser de régimen nival, cuando se reduce la cobertura de nieve, se afecta la disponibilidad y reserva de agua, tal como se detalla en el capítulo 2. La situación de bajo caudal en el río Colorado, y los aumentos de la salinidad del agua, representan la principal limitante para el desarrollo y la extensión de la agricultura bajo riego en la cuenca del río Colorado, como se plantea en el capítulo 4. Además, la expansión de agricultura bajo riego, al aumentar las demandas de agua generaría competencia con otros usos y actores de la cuenca, lo que conlleva a aumentar su eficiencia en el uso del agua.

La importancia de este estudio radicó en la utilización de información satelital combinada con información proveniente de estaciones meteorológicas e hidrológicas, a nivel de cuenca. Se presentó una propuesta metodológica cuantitativa para evaluar y determinar de manera sistemática la cobertura de nieve y la evapotranspiración media anual. Estas metodologías aplicadas resultan originales y novedosas debido a la combinación de distintas fuentes de información que permitieron estudiar componentes del balance de agua a escala de cuenca. El análisis fue abordado en un periodo de 15 años para la información satelital, lo que le otorgó a los resultados consistencia temporal, y de más de 20 años en el caso de la información proveniente de estaciones meteorológicas e hidrológicas. A escala de lote, se destaca la estimación mediante un modelo de cultivo, de la evapotranspiración de los principales cultivos, los requerimientos de riego y su huella hídrica. Posibles estudios pueden ser explorados en el futuro teniendo en cuenta las fortalezas y debilidades de lo planteado en esta investigación.

En este contexto surgen varias reflexiones a considerar en la realización de futuras investigaciones: ¿qué otras componentes del balance hidrológico se pueden investigar a escala de cuenca?; ¿Qué otra fuente de información se podría incorporar?; ¿Cuál es el nivel de adaptación de tecnologías para aumentar la eficiencia en el uso del agua a escala de lote?; ¿Cómo influyen las componentes económico y social en la expansión de la actividad agrícola en La Pampa?; ¿Existe integración entre la producción de la cuenca y el gran árido del oeste pampeano?; ¿Es posible establecer un conjunto de principios, criterios y/o pautas de ordenamiento territorial? En caso de expansión agrícola, ¿Cómo se comportaría el drenaje regional?; ¿Cómo sería el balance de sales en la región? Y en el caso de expansión agrícola y de la actividad petrolera, ¿Cómo se verían afectados los servicios ecosistémicos?; ¿Y la dinámica hídrica regional?

Esta investigación constituye un diagnóstico del sistema territorial, donde se analizó e integró la información física, productiva y ambiental de la cuenca. Esta tesis aporta importantes conocimientos desde la integración de fuentes de información, en el estudio de las componentes del balance de agua en la cuenca del río Colorado y sienta las bases para futuras planificaciones respecto al uso del agua en la cuenca, con vistas al ordenamiento territorial.

### 5.3. BIBLIOGRAFÍA

- Allison, L. E., Bernestein, L., Bower, C. A., Brown, J. W., Fireman, M., Hatcher, J. T., Hayward, W. H. E., Pearson, G. A., Reeve, R. C., Richards, L. A., Wilcox, L. V.** 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Secretaria de Agricultura y Ganadería, INIA, México.
- Aumassanne, C. M., Fontanella, D. R.** 2015. Calidad del agua para riego en la cuenca del río Colorado. *VII Jornadas de Riego y Fertirriego*. Necesidades de modernización e innovación en la gestión del agua frente a nuevos desafíos. Mendoza, Argentina.
- Beget, M.E.; Di Bella, C.; Aumassanne, C.; Fontanella, D.; Sartor, P.; Lambert, M. J.** 2016. Evaluación de la eficiencia del uso de agua de riego en un cultivo de maíz. Primera Reunión Científica del Programa Nacional Recursos Naturales, Gestión Ambiental y Ecorregiones del INTA (PNNAT). INTA Ediciones. ISBN: 978-987-521-737-9.
- Boninsegna, J., Llop, A.** 2015. Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos. La economía del cambio climático en la Argentina. CEPAL - Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 161.
- Cara, L., Masiokas, M., Viale, M., Villalba, R.** 2016. Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS. *Meteorológica* 41: 21-36 p.
- Cogliati, M. G., Finessi, F. G., Groch, D.** 2013a. Estimación de la cubierta de nieve en el norte de la provincia del Neuquén. En: VII Congreso Argentina de Tecnología Espacial, organizado por la Asociación Argentina de Tecnología Espacial, el Consejo Profesional de Ingeniería Aeronáutica y Espacial y la Universidad Nacional de Cuyo. Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina.
- Cogliati, M. G, Groch, D., Finessi, F. G.** 2013b. Estimación de la cubierta de nieve en el norte de la provincia del Neuquén. *Boletín Geográfico* 35: 47-58 p. Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue. ISSN 0326-1735; e-ISSN 2313-903X.
- Cogliati, M. G, Finessi, F. G., Groch, D.** 2014a. Estudio del área cubierta de nieve en la Cordillera del Viento utilizando información satelital. En *Actas 4to. Encuentro Internacional de Geografía del Cono Sur*. Laboratorio de Geografía Física y Ambiental, Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad Nacional del Litoral. 57-67 p. ISBN 978-987-692-035-3.
- Cogliati, M. G., Groch, D., Finessi, F. G.** 2014b. Utilización de productos Terra-Modis para el cálculo de la superficie nival en la Cordillera del Viento (Neuquén, Argentina). En el 10mo. Encuentro del International Center For Earth Sciences E-ICES 10. Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires, Argentina.
- Cogliati, M. G., Finessi, F. G., Groch, D.** 2015a. Variación de la cubierta de nieve en la cuenca alta del río Neuquén (Neuquén, Argentina) a partir de productos MOD10A2. En *Jornadas Argentinas de Geotecnologías 2015*, en el marco de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER). Ciudad de San Luis, Argentina.
- Cogliati, M. G., Finessi, F. G., Groch, D., Ostertag, G. E., Salcedo, A. P.** 2015b. Estudio de la asociación entre la cobertura de nieve en el norte de Neuquén (Argentina) y variables hidrológicas. En el VIII Congreso Argentina de Tecnología Espacial, organizado por la

Asociación Argentina de Tecnología Espacial, con el auspicio del Consejo Profesional de Ingeniería Aeronáutica y Espacial. Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

- Cogliati, M. G., Groch, D., Finessi, F. G.** 2015c. Utilización de productos MOD10A1 para el estudio de la variabilidad de cobertura de nieve en la cordillera del viento (Neuquén, Argentina). En el VIII Congreso Argentina de Tecnología Espacial, organizado por la Asociación Argentina de Tecnología Espacial, con el auspicio del Consejo Profesional de Ingeniería Aeronáutica y Espacial. Ciudad de Buenos Aires, Argentina.
- COIRCO** (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). 2015. Perl, J. E., Andrés, F. O. Presentación: Manejo Integral de la cuenca del río Colorado. Oferta y demanda hídrica en períodos de sequía. En: Jornada de Actualización "Cuenca del río Colorado: Situación Actual, Proyectos en Ejecución, Planificación". Villa Casa de Piedra, La Pampa. Disponible en: [www.coirco.com.ar](http://www.coirco.com.ar)
- De Jong, G. M.** 2004. La planificación regional y el trabajo interdisciplinario: su especificidad en la planificación y el manejo de cuencas hidrográficas". V Jornadas patagónicas de Geografía. Río Gallegos, Santa Cruz, Argentina.
- Dozier, J.** 1989. Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. Remote Sensing of Environment 28: 9-22 p.
- García, A. O.** 2012. Criterios modernos para evaluación de la calidad de agua para riego. Disponible en: [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/6E4999FFE5F6B8F005257A920059B3B6/\\$FILE/Art%205.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/6E4999FFE5F6B8F005257A920059B3B6/$FILE/Art%205.pdf)
- Groch, D., Finessi, F.G., Cogliati, M.G.** 2017. Variabilidad de la cobertura de nieve utilizando productos MOD10A2 en la Cuenca Alta del Río Neuquén para el período 2000-2014. En: Ulberich, A.; Cisneros Basualdo, N. & Miranda del Fresno, M.C. (2017). I Jornadas Internacionales de Ambiente y III Jornadas Nacionales de Ambiente 2016. Libro de resúmenes extendidos. 132-134 p. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. 1ra. edición. 26-28 de octubre de 2016. Tandil (Buenos Aires, Argentina). 502 p.
- López, P., Sirguy, P., Arnaud, Y., Pouyaud, B., Chevallier, P.** 2008. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000-2006). Global and Planetary Change 61: 103-116 p.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Montaña, E., Betman, E., Christie, D., Le Quesne, C., Mauget, S.** 2013. Recent and historic Andean snowpack and streamflow variations and vulnerability to water shortages in Central-Western Argentina. Climate Vulnerability 5: 213- 227 p.
- Michelini, J. J.** 2010. Instituciones, capital social y territorio. La Pampa y el dilema del desaroolo de la cuenca del Colorado. Buenos Aires, Editorial Biblos. 524 p. ISBN 978-950-786-853-5.
- Morábito J., Mirábile, C., Salatino, S.** 2007. Eficiencia de riego superficial, actual y potencial en el área de regadío del río Mendoza (Argentina). Revista Ingeniería del Agua de la Universidad de Córdoba, España, Vol. 14, No 3. 199-213 p. ISSN: 1134-2196.
- Paruelo, J., Di Bella, C. M., Milkovic, M.** 2014. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 400 p. ISBN: 9505046243.
- Prieto Garra, D., Sánchez, R., Martínez, R. S.** 2015. Las áreas de riego y la degradación de los suelos. En: Casas, R. R., Albarracín, G. F. (Eds). El deterioro del suelo y del ambiente en

- Argentina. Tomo I. Parte 3: El agua en la producción agropecuaria. Editorial FECIC. 319-350 p.
- Riggs G. A., Hall D. K., Salomonson V. V.** 2006. MODIS Snow Products User Guide to Collection 5. The MODIS Snow and Sea Ice Global Mapping Project. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD. 1-80. [http://modis-snowce.gsfc.nasa.gov/uploads/sug\\_c5.pdf](http://modis-snowce.gsfc.nasa.gov/uploads/sug_c5.pdf).
- Sili, M., Espasa, L.** 2015. Habitar la región del río Colorado. Situación actual y desafío futuro. En Sili, M., Kozel, A., Bustos Cara, R. La región del Colorado: historia, cultura y paisaje en la frontera. Fundación ArgenINTA. Buenos Aires, Argentina. 213 p.
- Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública.** 2013 Diagnóstico Integrado y escenarios de futuro de la región y la cuenca del río Colorado. Programa de fortalecimiento institucional. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado. Disponible en: <http://consorciohidraulico.com.ar/userfiles/RC1-pla.pdf>.
- Vázquez Amábile, G.** 2018. Gestión ambiental: desafíos para una producción sostenible. Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola. Buenos Aires. 160 p. ISBN 978-987-1513-30-7.
- Zamora, C. D., Sartor, P., Fontanella, D., Aumassanne, C., Fontana, L., Ruiz, M. A.** 2016. Evaluación de la producción de materia seca en variedades de alfalfa (*Medicago sativa*) de diferentes grados de reposo invernal, en el área bajo riego de La Pampa. 39º Congreso de la Asociación Argentina de Producción Animal – RAPA 36 (1) 332 p.

## TRABAJOS DERIVADOS DE ESTA INVESTIGACIÓN

### *Capítulos de libros:*

"Potencialidades de las nuevas tecnologías en el agro pampeano". Compiladores: Zinda Roberto, Mauricio Farrell, Lorena Carreño. ISBN: 9789875219496. Ediciones INTA. 170 p.

- **Aumassanne, C. M.**; Beget, M. E.; Oricchio, P. y Di Bella, C. M. Estudio de la cobertura de nieve en la cuenca del Río Colorado mediante información satelital.
- **Aumassanne, C. M.**; Sartor, P. D.; Beget, M. E.; Fontanella, D. R.; Di Bella, C. M. y Lambert, M. J. Metodología de muestreo para el seguimiento de pasturas y cultivos mediante fotografía digital.
- Sartor, P. D.; **Aumassanne, C. M.**; Fontanella, D. R.; Masseroni, M. L.; Zamora, C. D.; Pérez, M. M.; Álvarez, C. O.; Beget, M. E. y Di Bella, C. M. Variabilidad edáfica y su implicancia en la producción del cultivo de alfalfa bajo riego.

### *Artículos en revistas con referato:*

#### Publicados

- **Aumassanne, C. M.**; Beget, M. E.; Gaspari, F. J.; Di Bella, C. M.; Oricchio, P.; Sartor, D. 2018. Morfometría de la cuenca alta del río Colorado. Boletín Geográfico de la Universidad Nacional del Comahue 40 (1): 13-29.
- Masseroni, M. L., **Aumassanne, C. M.**, Sartor, P. D., Zamora, C. D., Fontanella, D. R. 2018. Calidad de agua para riego: Situación histórica y actual del río Colorado. Boletín Geográfico de la Universidad Nacional del Comahue 40 (2):44-53.

#### Aceptado para su publicación

- **Aumassanne, C. M.**; Beget, M. E.; Di Bella, C. M.; Oricchio, P.; Gaspari, F. J. Cobertura de nieve en las cuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría". Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA). <http://ria.inta.gob.ar/>. Fecha de envío 19/06/2018. Fecha de aceptación: 21/01/2019.

### *Congresos, Jornadas y reuniones científicas:*

1. Camacho, F., Latorre, C., Pérez, M., Di Bella, C., Beget, M. E., Fontanella, D. F., **Aumassanne, C.**, Sartor, P., Lambert, M.J., Baret, F., Lacaze, R. Characterization of vegetation parameters over the Río Colorado basin in La Pampa (Argentina) with ground data and multi-scale satellite imagery. *4th International Symposium Recent Advances in quantitative Remote Sensing*. 22-26 de septiembre 2014. Torrente, España.
2. Beget, M. E., Contreras, S., **Aumassanne, C.**, Fontanella, D., Sartor, P., Di Bella, C. Estimación de la evapotranspiración anual en la cuenca del río Colorado a partir

- de sensores remotos. *Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología*, 1º al 3 de octubre de 2014. Libro de resúmenes ISBN 9876880829. Piriápolis-Uruguay:
3. Lambert, M.J., Beget, M.E., **Aumassanne, C.**, Fontanella, D., Sartor, P., Di Bella, C.M. Modelización del uso del agua por un cultivo de maíz bajo riego a partir de Aquacrop. *Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología*, 1º al 3 de octubre de 2014. Libro de resúmenes ISBN 9876880829. Piriápolis-Uruguay.
  4. **Aumassanne, C** y Fontanella, D. Variaciones en la conductividad eléctrica el agua para riego en la cuenca del río Colorado. *XXV Congreso Nacional del Agua*. 15 al 19 de junio de 2015. Anales de resúmenes del XXV CONAGUA ISBN 978-987-24407-4-0. Paraná, Entre Ríos.
  5. **Aumassanne, C.**, Beget, M.E., Oricchio, P., Di Bella, C. Seguimiento satelital de la cobertura de nieve en la cuenca del río Colorado, Argentina. *XXV Congreso Nacional del Agua*, 15 al 19 de junio de 2015. Anales de resúmenes del XXV CONAGUA ISBN 978-987-24407-4-0. Paraná, Entre Ríos.
  6. **Aumassanne, C.** y Fontanella, D. Calidad del agua para riego en la cuenca del río Colorado. *VII Jornadas de Riego y Fertilización*. Necesidades de modernización e innovación en la gestión del agua frente a nuevos desafíos. Agosto de 2015. Libro de resúmenes ISBN 978-987-33-8291-8. Mendoza, Argentina.
  7. Fontanella, D. y **Aumassanne, C.** Evaluación del desempeño de pivotes centrales en el área bajo riego de Colonia 25 de Mayo, La Pampa. *VII Jornadas de Riego y Fertilización*. Necesidades de modernización e innovación en la gestión del agua frente a nuevos desafíos. Agosto de 2015. Libro de resúmenes ISBN 978-987-33-8291-8. Mendoza, Argentina.
  8. Fontanella, D. y **Aumassanne, C.** Evapotranspiración de maíz, alfalfa y vid bajo riego, en la cuenca media del río Colorado. *VII Jornadas de Riego y Fertilización*. Necesidades de modernización e innovación en la gestión del agua frente a nuevos desafíos. Agosto de 2015. Libro de resúmenes ISBN 978-987-33-8291-8. Mendoza, Argentina.
  9. **Aumassanne, C. M.**, Gaspari, F. J., Oricchio, P., Beget, M. E., Di Bella, C. M. Caracterización de la cuenca del río Colorado a partir de un modelo digital de elevación. *XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo "Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo"*. Desde el 27 de junio al 1 de Julio de 2016. Universidad Nacional de Río Cuarto. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Libro de resúmenes y mesas redondas ISBN 978-987-688-170-8. Río Cuarto, Argentina.
  10. **Aumassanne, C.M.**, Gaspari, F. J., Beget, M. E., Sartor, P., Di Bella, C.M. Cambios en el uso y la cobertura del suelo en la cuenca del río Colorado. *1ª Reunión Científica del Programa Nacional Recursos Naturales de INTA, Gestión Ambiental y Ecorregiones*. Aportes a la agroecología desde la gestión ambiental, la

- biodiversidad, el estudio del clima y el ordenamiento territorial". 30, 31 de agosto y 1° de septiembre 2016. Libro de resúmenes ISBN 978-987-521-737-9. Buenos Aires, Argentina.
11. **Aumassanne, C.M.**, Oricchio, P., Beget, M.E., Di Bella, C.M., Straschnoy, J. Variación temporal de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado. *1ª Reunión Científica del Programa Nacional Recursos Naturales de INTA, Gestión Ambiental y Ecorregiones*. Aportes a la agroecología desde la gestión ambiental, la biodiversidad, el estudio del clima y el ordenamiento territorial". 30, 31 de agosto y 1° de septiembre 2016. Libro de resúmenes ISBN 978-987-521-737-9. Buenos Aires, Argentina.
  12. Beget, M.E., Di Bella, C., **Aumassanne, C.**, Fontanella, D., Sartor, P., Contreras, S. Estimación de la evapotranspiración basada en la hipótesis de equilibrio hidrológico y teledetección. *1ª Reunión Científica del Programa Nacional Recursos Naturales de INTA, Gestión Ambiental y Ecorregiones*. Aportes a la agroecología desde la gestión ambiental, la biodiversidad, el estudio del clima y el ordenamiento territorial". 30, 31 de agosto y 1° de septiembre 2016. Libro de resúmenes ISBN 978-987-521-737-9. Buenos Aires, Argentina.
  13. Beget, M.E., Di Bella, C., **Aumassanne, C.**, Fontanella, D., Sartor, P., Oricchio, P., Contreras, S. Fuentes de datos pluviométricos: evaluación de la precisión para la cuenca del río Colorado. *1ª Reunión Científica del Programa Nacional Recursos Naturales de INTA, Gestión Ambiental y Ecorregiones*. Aportes a la agroecología desde la gestión ambiental, la biodiversidad, el estudio del clima y el ordenamiento territorial". 30, 31 de agosto y 1° de septiembre 2016. Libro de resúmenes ISBN 978-987-521-737-9. Buenos Aires, Argentina.
  14. **Aumassanne, C. M.**, Sartor, P.D., Beget, M.E., Fontanella, D.R., Di Bella, C.M., Oricchio, P., Lambert, M.J. Metodología de muestreo del crecimiento de pasturas y cultivos mediante fotografía digital. *1ª Reunión Científica del Programa Nacional Recursos Naturales de INTA, Gestión Ambiental y Ecorregiones*. Aportes a la agroecología desde la gestión ambiental, la biodiversidad, el estudio del clima y el ordenamiento territorial". 30, 31 de agosto y 1° de septiembre 2016. Libro de resúmenes ISBN 978-987-521-737-9. Buenos Aires, Argentina
  15. **Aumassanne, C. M.**, Fontanella, D. R., Beget, M. E., Di Bella, C. M. Variación temporal de la evapotranspiración de referencia en el área bajo riego de 25 de Mayo, La Pampa. *XVI Reunión Argentina y VII Latinoamericana de Agrometeorología*. 20 al 23 de septiembre de 2016, Puerto Madryn, Chubut.
  16. **Aumassanne, C.**, Masseroni, M. L., Fontanella, D. R., Perez, M. M., Sartor, P. D., Zamora, C. D. Calidad de agua para riego del río Colorado (Argentina). Situación histórica y actual. *3er Encuentro de Investigadores en formación en recursos hídricos*, organizado por el Instituto Nacional del Agua. 6 y 7 de octubre de 2016. Resúmenes de trabajos ISBN 978-978-45194-6-7, Ezeiza, Buenos Aires.

17. **Aumassanne, C. M.**, Beget, M. E., Sartor, D. P., Fontanella, D. R., Di Bella, C. M., Oricchio, P., Gaspari, F. J. Aportes al estudio de la disponibilidad y uso del agua en la cuenca del río Colorado, Argentina. *3er Encuentro de Investigadores en formación en recursos hídricos*, organizado por el Instituto Nacional del Agua. 6 y 7 de octubre de 2016. Resúmenes de trabajos ISBN 978-978-45194-6-7, Ezeiza, Buenos Aires.
18. **Aumassanne, C. M.**, Beget, M. E., Sartor, P. D., Fontanella, D. R., Di Bella, C. M., Oricchio, P., Gaspari, F. J., Masseroni, M. L. Investigaciones sobre la disponibilidad y uso del agua en la cuenca del río Colorado, Argentina. V Congreso Pampeano del Agua. 21 y 22 de marzo de 2018 en Santa Rosa, La Pampa.
19. Masseroni, M. L., **Aumassanne, C. M.**, Sartor, P. D., Zamora, C. D. Calidad del agua para riego en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado. V Congreso Pampeano del Agua. 21 y 22 de marzo de 2018 en Santa Rosa, La Pampa.
20. Sartor, P. D., **Aumassanne, C. M.**, Zamora, C. D., Masseroni, M. L., Fontanella, D. R., Álvarez, C., Beget, M. E., Di Bella, C. M. Análisis de constantes hídricas en suelos bajo riego de 25 de Mayo, La Pampa. V Congreso Pampeano del Agua. 21 y 22 de marzo de 2018 en Santa Rosa, La Pampa.
21. **Aumassanne, C. M.**; Fontanella, D. R.; Beget, M. E.; Di Bella, C. M.; Sartor, D. P. 2018. Estimación de huella hídrica para lotes de alfalfa y maíz en el Sistema de Aprovechamiento Múltiple de 25 de Mayo, La Pampa". 4<sup>to</sup> Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, organizado por el Instituto Nacional del Agua y auspiciado por la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación. Ezeiza, Argentina.

