

# MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

## 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

Jose Boninseña  
Armando Llop



NACIONES UNIDAS



# MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

## 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

Jose Boninsegna  
Armando Llop



NACIONES UNIDAS



Este documento fue preparado por José Boninsegna y Armando Llop, consultores de la Unidad de Políticas para el Desarrollo Sostenible de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). El documento se realizó en 2009, en el marco del estudio nacional de la economía del cambio climático en la Argentina, bajo la coordinación de Osvaldo Girardín a nivel nacional. Además, este documento es parte de los estudios sectoriales preparados en el marco del Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (ERECC) en América del Sur —iniciativa encabezada por la CEPAL y coordinada por Joseluis Samaniego, Carlos de Miguel, Mauricio Pereira y Karina Martínez. El ERECC contó con el apoyo y colaboración financiera de los Gobiernos de Alemania, Dinamarca, España y el Reino Unido, así como de la Unión Europea y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Las denominaciones empleadas en los mapas de esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contienen no implican, de parte de la Secretaría de las Naciones Unidas, juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

---

Publicación de las Naciones Unidas

ISSN 1564-4189

LC/L.4089

Copyright © Naciones Unidas, noviembre de 2015. Todos los derechos reservados

Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile

S.15-01013

---

Los Estados miembros y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a las Naciones Unidas de tal reproducción.

# Índice

---

<b>Resumen</b> .....	7
<b>Introducción</b> .....	9
<b>I. Impactos esperados y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan</b> .....	11
<i>José Boninsegna</i> .....	11
A. Características hidrológicas de Mendoza y San Juan.....	11
B. Los condicionantes climáticos .....	12
1. La precipitación y su variabilidad .....	12
2. La relación precipitación nivea – caudal.....	12
3. Los glaciares como reserva hídrica .....	13
4. Las variaciones de la temperatura .....	13
5. La variabilidad de los caudales .....	15
C. Los condicionantes geográficos .....	15
D. Fuentes de información .....	15
1. Datos hidrológicos disponibles .....	15
2. Datos climáticos.....	16
3. Geografía de las cuencas.....	16
4. Modelos de circulación y escenarios.....	16
E. Metodología para el estudio de los caudales futuros.....	17
F. Resultados de la estimación de caudales futuros.....	18
1. Los puntos de la grilla.....	18
2. La estimación de los caudales .....	22
G. Metodología para la estimación de las superficies de almacenaje .....	23
H. Resultados de la estimación de superficies de almacenaje.....	24
1. La isoterma de 0° .....	24
2. Las modificaciones del hidrograma .....	26
I. Conclusiones .....	27

<b>II. Evaluación de los impactos esperados y vulnerabilidad al cambio climático en la oferta y demanda de agua en la provincia de Mendoza</b> .....	29	
<i>Armando Llop</i> .....	29	
A. Un breve anticipo metodológico .....	29	
B. Los componentes del modelo.....	30	
1. La oferta de agua.....	30	
2. La demanda de agua.....	34	
C. Cuenca norte de Mendoza - río Mendoza y Tunután inferior .....	38	
1. Agua potable .....	38	
2. El sector riego .....	39	
3. Demanda industrial en la cuenca norte de Mendoza.....	44	
4. Demanda de agua del sector público y ambiental .....	45	
D. Cuenca centro de Mendoza - el Valle de Uco.....	46	
1. Agua potable .....	46	
2. El sector riego .....	46	
3. Uso industrial.....	48	
4. El modelo utilizado .....	48	
E. Cuenca sur de Mendoza - ríos Diamante y Atuel.....	49	
1. Agua potable .....	49	
2. El sector riego .....	49	
3. Uso industrial, público y ambiental en la cuenca sur.....	51	
4. El modelo utilizado y los resultados bajo escenarios alternativos .....	52	
F. Cuenca del río San Juan.....	52	
1. Agua potable .....	53	
2. El sector riego .....	53	
3. Uso industrial público y ambiental en la cuenca del río San Juan .....	55	
4. El modelo utilizado y los resultados bajo escenarios alternativos .....	55	
G. Análisis de los resultados.....	58	
H. Conclusiones.....	59	
1. La cuenca norte de Mendoza.....	59	
2. La cuenca centro de Mendoza.....	60	
3. La cuenca sur de Mendoza - ríos Diamante y Atuel .....	61	
4. La cuenca del río San Juan.....	61	
I. Estimación de los costos sociales totales del efecto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico en Mendoza y San Juan .....	62	
<b>Bibliografía</b> .....	65	
<b>Serie Medio Ambiente y Desarrollo:números publicados</b> .....	67	
<b>Cuadros</b>		
Cuadro 1	Lista de las estaciones de aforo, con su ubicación y altura, período con registros, módulo medio anual y superficie estimada de la cuenca.....	15
Cuadro 2	Caudales estimados para los escenarios A2 y B2 de acuerdo a la precipitación estimada por el modelo, desde el 6to año al 5to año de la próxima década .....	21
Cuadro 3	Altura de la línea de 0°C para cada cuenca en verano, invierno y media anual .....	25
Cuadro 4	Reducción de los derrames de los ríos de las cuencas.....	31
Cuadro 5	Superficie cultivada por cuenca para Mendoza.....	39
Cuadro 6	Célula de cultivos y requerimientos de riego (ET).....	40
Cuadro 7	Eficiencias de riego a principios de los años ochenta.....	41
Cuadro 8	La cuenca del río Mendoza en la mayor sequía del siglo XX .....	43
Cuadro 9	Uso conjunto en la cuenca norte de Mendoza .....	44
Cuadro 10	Superficie cultivada por tipo de cultivo en el Valle de Uco .....	47
Cuadro 11	Superficie cultivada por tipo de cultivo en la cuenca sur .....	50
Cuadro 12	Superficie cultivada según fuente de agua utilizada en la cuenca sur .....	51

Cuadro 13	Superficie cultivada por tipo de cultivo en la cuenca río San Juan .....	54
Cuadro 14	Aforos de derrame del río San Juan .....	54
Cuadro 15	Costo marginal social del agua obtenido para las 6 corridas básicas en las cuencas estudiadas .....	63
Cuadro 16	Costos sociales totales del efecto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico en Mendoza y San Juan .....	64

### Gráficos

Gráfico 1	Módulos de los ríos San Juan, Mendoza y Atuel para dos décadas, a principios del registro instrumental y a comienzos de este siglo .....	14
Gráfico 2	Tendencia de las series de precipitación estimadas por el modelo de acuerdo a la longitud .....	18
Gráfico 3	Relación nieve caudal para el río Diamante .....	19
Gráfico 4	Relación entre la nieve medida en Valle Hermoso y las series de precipitación estimada por el modelo .....	19
Gráfico 5	Estimación de los caudales futuros para el río Diamante, escenario A2 .....	20
Gráfico 6	Tendencias estimadas de los ríos de Cuyo por décadas, escenario A2.....	20
Gráfico 7	Comparación de los caudales pronosticados por los tres modelos con los actuales .....	22
Gráfico 8	Hidrograma actual en la estación Punta de Vacas y el proyectado para la década de 2021-2030.....	26
Gráfico 9	Composición de los costos de la oferta .....	32
Gráfico 10	Representación de la externalidad.....	32



## Resumen

---

Mendoza y San Juan son las provincias de la región de Cuyo con recursos hídricos de origen netamente cordilleranos. El hidrograma de los ríos cuyanos se está modificando debido principalmente al aumento de la temperatura. De incrementarse la tendencia observada en la temperatura esta alteración podría tener un alto impacto en el manejo y regulación de los caudales.

En este documento se muestran los resultados de dos estudios para esta región. El primero evalúa el comportamiento de las tendencias en la variabilidad de las precipitaciones, la temperatura, los caudales y el hidrograma frente a escenarios de cambio climático.

Las cuencas más afectadas serían aquellas ubicadas hacia el sur de la región porque son las más bajas, en las cuales la disminución de las superficies alcanzaría porcentajes entre el 75% y 80% para fines de este siglo, con respecto a las superficies actuales. En estas condiciones es previsible una disminución de la superficie de los glaciares, con un fuerte retroceso de los mismos y la pérdida consiguiente de la reserva de agua en ellos almacenada.

En la segunda parte del documento se cuantifica el impacto socioeconómico del cambio climático en las cuencas de Mendoza y San Juan. La reducción de los derrames de los ríos (oferta), el aumento de la demanda y los procesos de degradación del agua, determinaría el aumento del valor social marginal del agua.

Mediante modelos de simulación se trazó el valor de corte entre oferta y demanda en el tiempo. La posición y trayectoria temporal del valor social marginal del agua, revelará la magnitud de la escasez, y la velocidad con que esta se incrementa. Estos indican el costo social de la escasez y robustez de la sustentabilidad en cada caso. Se realizan distintas corridas bajo escenarios alternativos para cada cuenca, lo que permite identificar políticas óptimas.



## Introducción

---

Mendoza y San Juan son provincias altamente dependientes del recurso agua y con recursos hídricos de origen netamente cordilleranos. En estas provincias el agua potable así como la utilizada para regadío y generación de energía eléctrica se origina a partir de la nieve y de los cuerpos de hielo que se encuentran en las altas cumbres de la cordillera de los andes. En ella, la nieve se acumula como consecuencia de tormentas frontales que alcanzan la región principalmente en el invierno.

Desde el punto de vista físico, la oferta hídrica en la región cuyana tiene condicionantes climáticos y geográficos que definen la variabilidad del sistema. El capítulo I de este documento se concentra en el estudio de estos condicionantes, lo cual permite evaluar la disponibilidad hídrica, y los grados de resiliencia y de vulnerabilidad del sistema.

En el capítulo II se cuantifica el impacto socioeconómico producido por el cambio climático sobre el ciclo hidrológico en las cuencas de Mendoza y San Juan, a través de su impacto en la reducción de los derrames de los ríos. Este efecto, sumado al constante aumento de la demanda de agua y los procesos de degradación del recurso que limitan su utilización, su creciente escasez, que a su vez se refleja en el aumento de su valor. En este capítulo se cuantifica el valor social del agua como el indicador de su escasez.



# **I. Impactos esperados y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan**

---

*José Boninsegna*

## **A. Características hidrológicas de Mendoza y San Juan**

Mendoza y San Juan, con una extensión territorial de 148.827 y 92.789 km<sup>2</sup> respectivamente, son las provincias de la región de Cuyo con recursos hídricos de origen netamente cordilleranos. Se trata de una región particularmente rica en recursos naturales no renovables como el petróleo y la minería, actividades que proporcionan un 8,4% del PBI y dan cuenta del 33% de las exportaciones de la región.

Sin embargo otros recursos no menos importantes se desarrollan en el 3% del territorio y constituyen las actividades propias de las regiones de oasis en donde se concentran las explotaciones agrícolas, las actividades industriales y los emplazamientos humanos. Estas regiones son altamente dependientes del recurso agua.

En las provincias de Mendoza y San Juan, el agua potable así como la utilizada para regadío y generación de energía eléctrica se origina casi exclusivamente a partir de la nieve y de los cuerpos de hielo que se encuentran en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes. En ella, la nieve se acumula como consecuencia de tormentas frontales que alcanzan la región principalmente en el invierno.

Desde el punto de vista físico, la oferta hídrica en la región cuyana tiene condicionantes climáticos y geográficos que definen la variabilidad del sistema. El estudio de estos condicionantes permite evaluar la disponibilidad hídrica, y los grados de resiliencia y de vulnerabilidad del sistema.

## B. Los condicionantes climáticos

La cantidad de precipitaciones níveas y su acumulación, la temperatura y sus variaciones, y la influencia de algunos forzantes del sistema climático, regulan la cantidad y oportunidad de la oferta hídrica en la región cuyana.

El régimen hídrico en la región es esencialmente hidro-nival y, en consecuencia, es fuertemente dependiente de la cantidad de nieve que cae durante el invierno y que, a su vez, se acumula en las altas cuencas. Las variaciones de altura de la isoterma de 0°C permiten estimar la superficie sobre la cual se realiza el proceso de acumulación (primero) y de ablación (después) de la nieve, cuya fusión origina el agua erogada por los ríos. La fusión de la nieve acumulada produce las escorrentías con los mayores volúmenes durante los meses de primavera-verano. Este ciclo anual se encuentra conectado a las fluctuaciones de la circulación atmosférica, en particular a la variación latitudinal del Anticiclón del Pacífico Sur.

### 1. La precipitación y su variabilidad

Las nevadas que ocurren en el área presentan variaciones tanto en la cantidad de nieve como en el momento del año en que ocurren. El Departamento General de Irrigación de la provincia de Mendoza ha instalado 6 estaciones meteorológicas con medición directa de la cantidad de nieve que están en funcionamiento desde el año 2000. Los datos se publican mensualmente en un boletín de la repartición, transformados en mm de equivalente agua (Dirección de Gestión Hídrica, 2009).

Se observa que la acumulación (en promedio de los últimos 5 años) comienza en los meses de abril-mayo y se extiende hasta mediados de setiembre, cuando los procesos de fusión prevalecen.

Sin embargo, hay una gran variación anual tanto en la cantidad máxima de nieve acumulada (<100mm EAN hasta >700 mm EAN)<sup>1</sup> como en el momento de fusión (desde fines de agosto hasta principios de octubre). La precipitación en las altas cuencas es predominantemente invernal, desde abril a octubre. Durante los meses de verano, la cantidad de precipitación en la Cordillera es sumamente escasa.

### 2. La relación precipitación nívea – caudal

Masiokas et al (2006) demostraron que existe una alta relación entre la cantidad de nieve caída durante la estación invernal con los caudales emergentes del período estival. El coeficiente de correlación entre estas series explica el 89% de la variancia.

La relación entre el caudal y las nevadas no es tan ajustada en los valores extremos, particularmente cuando el año es de escasa precipitación. En estos casos, el caudal es algo mayor de lo esperado y no puede descartarse que este efecto sea el producto del aporte al caudal del derretimiento de los glaciares de la cuenca.

Las variaciones en las precipitaciones de nieve están relacionadas a fenómenos de circulación atmosférica y en particular al forzante conocido como El Niño - Oscilación del Sur (ENSO). En los años “Niño” (Boninsegna y Delgado, 2002), con anomalías de temperatura positiva en el Pacífico Ecuatorial, la precipitación suele ser mayor que la media, mientras que durante los años “Niña” que presentan temperaturas por debajo de lo normal en el Pacífico Ecuatorial, la precipitación se ubica por debajo de los valores medios. Sin embargo debe señalarse que existen otros mecanismos capaces de incrementar la precipitación de nieve, de manera que las nevadas abundantes no se producen exclusivamente durante el Niño.

---

<sup>1</sup> EAN: Equivalente agua nieve.

### **3. Los glaciares como reserva hídrica**

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, de la temperatura, y de la topografía, los glaciares aumentan su masa con los años de nevadas invernales abundantes, mientras que sus volúmenes se reducen en los años secos.

Estos cuerpos de hielo y sus fluctuaciones son un indicador a largo plazo de las variaciones climáticas ocurridas en la cuenca. Con su movimiento los glaciares dejan distintas evidencias de su paso que, fechadas usando técnicas apropiadas, constituyen un registro de las condiciones ambientales del pasado (LeQuesne et al. 2009). En la región de Cuyo, como en la mayoría de las montañas del mundo, se observa una sostenida disminución de los glaciares cuyo retroceso se manifiesta por lo menos desde principios del siglo XX. Las masas de hielo constituyen una reserva de agua, cuya importancia crece en años de escasas precipitaciones nivales. El derretimiento observado de los glaciares en toda la Cordillera, indican que las reservas de agua dulce están disminuyendo en forma acelerada (Lascano y Villalba, 2007).

Debido a esto el Parlamento Argentino y al Poder Ejecutivo promulgo la Ley Nacional de Protección de los Glaciares en el año 2010, cuyo espíritu es evitar acciones antrópicas que puedan alterar el balance de los glaciares y contribuir a su disminución. En el Artículo 1 la ley define a los glaciares como “bienes públicos” y por lo tanto pertenecen a toda la sociedad. Además la ley establece la necesidad de realizar un inventario de los cuerpos y del hielo de la Nación para conocer la situación de la reserva hídrica que los glaciares significan. Este inventario debe ser repetido cada cinco años para determinar la evolución de los mismos.

El Instituto de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) del CONICET es el encargado de coordinar la realización de este inventario. En un inventario realizado en los años 1978-1981 por el IANIGLA, el total de hielo estimado para la región cuyana alcanza a los 1564,10 km<sup>2</sup> de los cuales corresponde un 48% a hielo descubierto y un 52% a hielo cubierto por detrito (Bottero, 2003).

Sin embargo, el conocimiento de los volúmenes de hielo existente es precario debido a que aun no se cuenta con la tecnología apropiada para realizar la estimación mediante métodos de sensores remotos, que son los únicos factibles de emplear dada la magnitud y la particular topografía en donde se encuentran dichos glaciares.

### **4. Las variaciones de la temperatura**

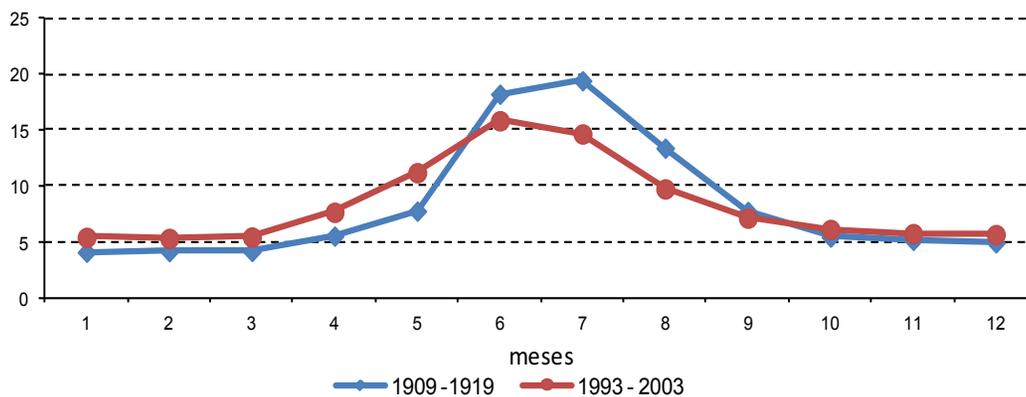
Las variaciones de la temperatura en el invierno determinan la superficie de las montañas que recibe precipitación en forma de nieve, mientras que las variaciones de la temperatura durante los meses de verano aumentan o disminuyen la superficie donde se produce la ablación de la nieve acumulada durante el invierno.

El proceso de fusión de la nieve depende de que se alcancen temperaturas superiores a los 0°C. Por ello es importante conocer cuál es la altura a la que se encuentra la isoterma de 0°C, ya que por encima de la misma no habrá fusión mientras que todo lo que este debajo de esta cota, tendrá energía suficiente para transformar la nieve en agua líquida.

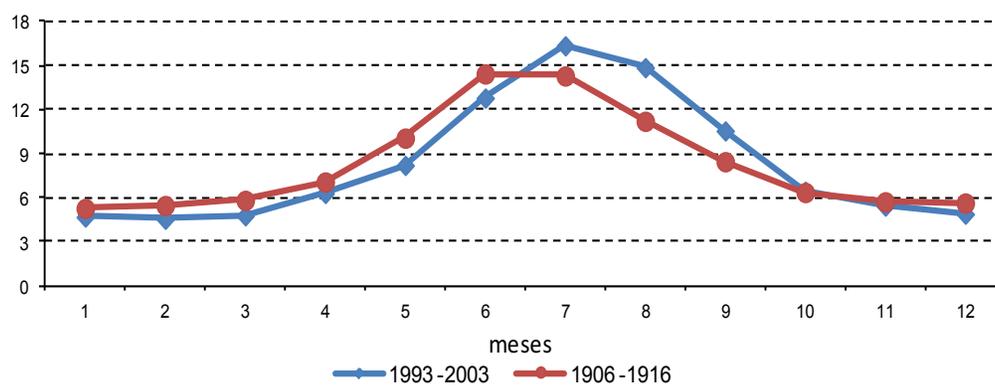
Las variaciones mes a mes de la temperatura producen variaciones interanuales en los caudales. El conocimiento del ciclo anual de los caudales o hidrograma es muy importante ya que permite establecer y regular el manejo y el uso del agua tanto para consumo, irrigación o producción de hidro-electricidad.

**Gráfico 1**  
**Módulos de los ríos San Juan, Mendoza y Atuel para dos décadas,**  
**a principios del registro instrumental y a comienzos de este siglo<sup>a</sup>**  
*(En porcentajes)*

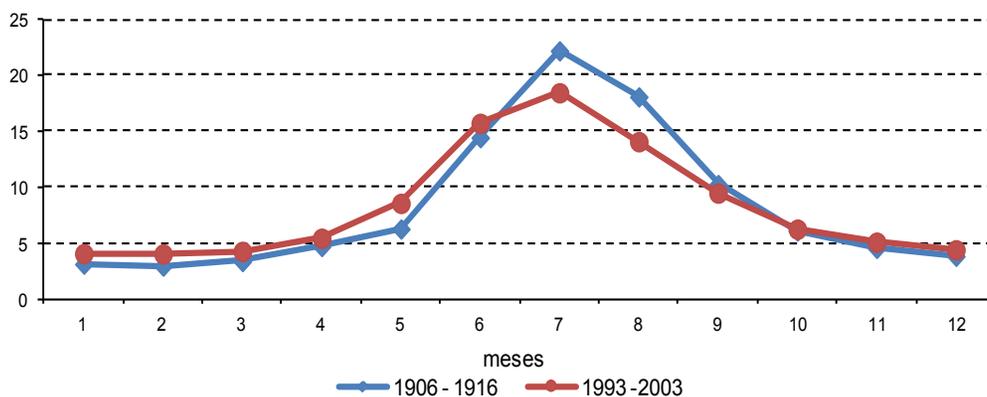
A. Río San Juan



B. Río Atuel



C. Río Mendoza



Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Se observa claramente la modificación del hidrograma medio. El mes 1 corresponde a julio, primer mes del año hidrológico.

## 5. La variabilidad de los caudales

La variabilidad de los caudales emergentes en los ríos de la Región Cuyana depende fundamentalmente de la cantidad de precipitación nival caída durante el invierno. Sin embargo, otros factores como la temperatura, la topografía de la cuenca (altura y exposición relativa) y su extensión pueden hacer variar el hidrograma. En la actualidad la tendencia al aumento de la temperatura está alterando el hidrograma de los ríos andinos ya que el proceso de fusión de la nieve comienza más temprano, incrementando el caudal en los meses de primavera, con el pico de máximo que se traslada más temprano en el ciclo hidrológico y la disminución de los caudales de verano por agotamiento de la masa de nieve de ablación.

### C. Los condicionantes geográficos

La geografía de las cuencas es otro poderoso condicionante de la oferta hídrica. La altura influye en la mayor o menor capacidad de almacenamiento de nieve y la topografía de las cuencas, en especial la orientación relativa de los valles, en la mayor o menor velocidad de fusión de la nieve, originando diferencias en los tiempos en que los ríos alcanzan su máximo caudal. En general, las cuencas de los Ríos Mendoza y San Juan, son las de mayor altura, mientras que las ubicadas hacia el sur, tienen alturas progresivamente inferiores.

### D. Fuentes de información

#### 1. Datos hidrológicos disponibles

Los ríos San Juan, Mendoza, Diamante y Atuel son los más importantes proveedores de agua para consumo humano, regadío y generación de hidroelectricidad en Cuyo. Varias estaciones de aforo, ubicadas en cada cuenca, permiten un análisis de las variaciones en los caudales y en el hidrograma anual. Las series disponibles para los ríos mencionados se presentan en el cuadro siguiente.

**Cuadro 1**  
**Lista de las estaciones de aforo, con su ubicación y altura, período con registros, módulo medio anual y superficie estimada de la cuenca**

Cuenca	Aforo	Latitud	Longitud	Altura	Período	Modulo	Superficie
San Juan	Km 47	31°32'00"S	68°53'00"W	945m	1909-2004	65,2 m <sup>3</sup> /s	25 670km <sup>2</sup>
Mendoza	Guido	32°51'00"S	69°16'00"W	1 550m	1956-2004	45,1 m <sup>3</sup> /s	8 180km <sup>2</sup>
Mendoza	Cacheuta	33°01'00"S	69°07'00"W	1 258m	1909-1990	50,0 m <sup>3</sup> /s	9 040km <sup>2</sup>
Tunuyan	Uco	33°47'00"S	69°15'00"W	1 200m	1954-2004	28,6 m <sup>3</sup> /s	2 380km <sup>2</sup>
Diamante	Jaula	34°38'53"S	69°19'13"W	1 500m	1970-2004	34,6 m <sup>3</sup> /s	2 723km <sup>2</sup>
Atuel	Angostura	35°05'57"S	68°52'26"W	1 200m	1906-2004	35,2 m <sup>3</sup> /s	3 800km <sup>2</sup>

Fuente: A partir de Subsecretaría de Recursos Hídricos (2004), "Estadística Hidrológica de la República Argentina", Secretaría de Obras Públicas de la Nación.

## 2. Datos climáticos

Desgraciadamente, los datos climáticos no son particularmente abundantes en la región. Si bien existen, o han existido, varias estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, muchas de ellas han sido discontinuadas por distintos motivos. Esta situación se observa especialmente en las estaciones que estaban ubicadas en la cordillera de los andes, en donde prácticamente no se encuentra en este momento ninguna estación oficial en operaciones, con excepción de la Estación Meteorológica de Punta de Vacas en la cuenca del río Mendoza. Este hecho obliga a utilizar fuentes de información provenientes de otras organizaciones y de países vecinos.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron como referencia las series de temperatura media mensual y de precipitación media mensual de Santiago de Chile (provisas por el Dirección Meteorológica de Chile-<http://www.meteochile.gob.cl>), las series de temperatura del Observatorio de la ciudad de Mendoza, las series de temperatura y precipitación media mensual de las localidades de Punta de Vacas, Cristo Redentor y Puente del Inca, del Servicio Meteorológico Nacional (estas dos últimas, discontinuadas).

También se han utilizado, con fines de comparación, las series de radiosondeos diarios de Quinteros (Chile), desde 1975 hasta 2004, que proveen información sobre las variaciones de la altura de isoterma de 0°C.

## 3. Geografía de las cuencas

Para estimar la superficie de las cuencas y su topografía se utilizaron imágenes satelitales. La definición de los límites de las cuencas se realizó aplicando modelo ARC HYDRO, implementado como una extensión de ARCGIS 9.0 (ESRI), sobre el Modelo Digital de Elevación SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) obtenido en el USGS (*United States Geological Survey*).

El modelo ARC HYDRO es un modelo de conectividad hidrológica superficial, especialmente diseñado para obtener zonas de acumulaciones de flujo sobre los cauces de arroyos y ríos, definidos por un modelo digital de elevación. La resolución del DEM es de 90 metros. Sobre él se aplica, para una mejor visualización, la imagen LANDSAT 7 ETM correspondientes a cada zona de estudio.

Con el software ENVI 4.0 se delimitaron las superficies que corresponden a las curvas de nivel de la altura de la isoterma de 0°, según las especificaciones de los modelos climáticos y los escenarios bajo estudio.

## 4. Modelos de circulación y escenarios

Los modelos regionales de circulación general empleado en las estimaciones son:

Nombre Experimento: PRECIS-INPE.

Origen del modelo: HadRM3P (Sistema PRECIS) - <http://precis.metoffice.com/>

Condiciones de Borde: HadAM3P

Simulaciones: Base siglo20: 1961-1990 / Escenarios A2 y B2: 2010-2100

Resolución Espacial: 50km

Latitud x Longitud: 154x106 [www.cptec.inpe.br/mudancasclimaticas](http://www.cptec.inpe.br/mudancasclimaticas).

Nombre Experimento: PRECIS-CONAMA (CONAMA, 2006 ).

Origen del modelo: HadRM3P (Sistema PRECIS) - <http://precis.metoffice.com/>

Condiciones de Borde: HadAM3P

Simulaciones: Base siglo20: 1961-1990 / Escenarios A2 y B2: 2071-2100

Resolución Espacial: 25km.

Nombre Experimento: MM5 (Nuñez y Solmman, 2006)

Origen del Modelo: Fifth-Generation PennState/NCAR Mesoscale Model

Condiciones de Borde: Global forecasting models MRF and AVN

Simulaciones: Base siglo20: 1981-1990 / Escenarios A2 y B2: 2081-2090

Resolución Espacial: 25km

## E. Metodología para el estudio de los caudales futuros

La estructura de los datos generados por el modelo y elaborados por INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–Sao Jose dos Campos, Sao Pablo, Brazil) consiste en series de precipitación media mensual, temperatura máxima, mínima y media mensual en puntos de una grilla geográfica con resolución de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  de latitud x longitud. Esta resolución equivale a aproximadamente a una grilla de 50 x 50 Km. Los datos del modelo se ordenaron para generar series temporales mensuales desde 1961 hasta diciembre de 2100. Los datos del modelo fueron corregidos por los índices de precipitación y de temperatura provistos por Webber y Willmott 1998, (Universidad de Delaware) que pueden obtenerse en la web (<http://www.lba-hydronet.sr.unh.edu/tsgrid>).

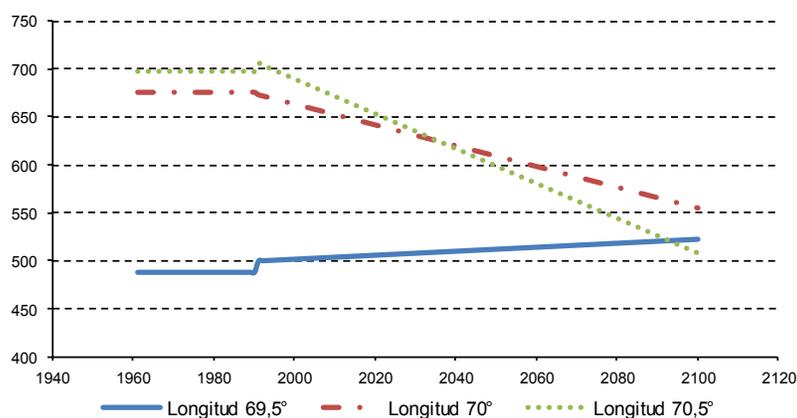
- Primeramente se superpuso en un mapa de las cuencas la grilla de longitudes-latitudes en escala  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  para elegir lo puntos de cobertura que abarcasen la cuenca objeto de estudio. Las grillas identificadas que cubren la Cordillera de los Andes en las Provincias de San Juan y Mendoza son las de Longitud  $-70,5$ ,  $-70$  y  $-69,5^\circ$  y de Latitud entre  $-28,5^\circ$  (correspondiente a las cabeceras del norte de la cuenca del Río Jachal) y los  $-35,5^\circ$  (correspondiente al sur del Río Atuel).
- En base a esta grilla se generaron las series temporales de precipitación mensual, que posteriormente se redujeron a precipitación total anual, precipitación total de verano (enero-abril) y precipitación de invierno (mayo-septiembre).
- Para cada cuenca y en base a la información instrumental disponible, se estudio la relación nieve-caudal.
- Para cada cuenca y en base a la información disponible se estudio la relación nieve-precipitación estimada por el modelo
- Para cada cuenca se estableció la relación caudal medido (período 1961-1990) y precipitación anual estimada por el modelo, para cada punto de la grilla correspondiente a la cuenca estudiada, y se generaron las ecuaciones de regresión correspondientes.
- En base a esta(s) relación(es) se estimaron los caudales pronosticados para el período 1991-2100.
- Se estimaron los promedios para las décadas de corte, considerando los datos entre el año uno de la década hasta el primero de la década siguiente y se calcularon las tendencias de las series.
- Se analizaron los porcentajes de aumento o disminución de caudales y se escalieron los valores tomando como base los caudales medidos del período 1961-1990. Estos pasos se hicieron para los dos escenarios, A2 y B2.
- Para las estimaciones realizadas con el modelo PRECIS-CONAMA se utilizo la misma metodología descrita anteriormente, con la diferencia que la corrección de los datos se realizo utilizando la grilla de datos meteorológicos de la Unidad de Datos Climáticos (*Climatic Research Unit -CRU*) de la Universidad de East Anglia con resolución 50 x 50 km (Mitchell y Jones, 2005). Las proyecciones futuras se realizaron en la única ventana temporal disponible por el modelo entre los años 2071 a 2100.
- Para el modelo MM5/CIMA la metodología fue similar, pero las proyecciones se efectuaron en la ventana temporal de 2081 a 2090.

## F. Resultados de la estimación de caudales futuros

### 1. Los puntos de la grilla

La elección de los puntos de grilla que representan a cada cuenca es importante, especialmente en el sentido de la longitud. Se comprobó que, las series de precipitación que origina el modelo en la región de la cordillera en Cuyo, tienen distintas tendencias de acuerdo a la longitud. Aquellas de los meridianos 70,5 y 70°W muestran una marcada tendencia a la disminución de la precipitación mientras que, la precipitación sobre el meridiano de los 69,5° W, tiene una tendencia positiva.

**Gráfico 2**  
Tendencia de las series de precipitación estimadas por el modelo de acuerdo a la longitud  
(En mm/año)



Fuente: Elaboración propia.

Este fenómeno es coherente con la circulación atmosférica de la región, en donde se observa precipitación de nieve durante el invierno en la alta cordillera, con tendencia a la disminución, pero precipitación durante los meses estivales en la Cordillera frontal (Cordón del Plata, Cordón de las Delicias), con tendencia a aumentar.

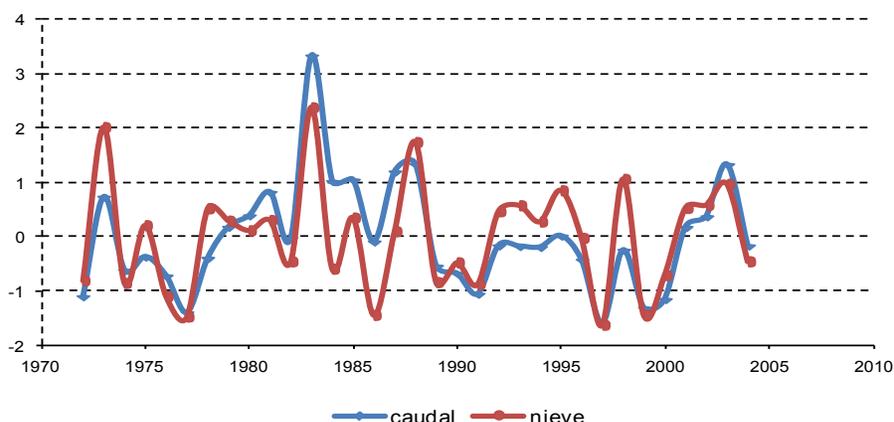
Las estaciones meteorológicas en la Cordillera cuyana, no registran precipitación líquida sino únicamente en forma de nieve y por su distribución no permiten comprobar este fenómeno mencionado.

Los datos instrumentales disponibles permiten analizar la relación entre el caudal emergente medido en la estación de aforo y la nieve acumulada en la alta cuenca.

Se estudió esta relación para cada uno de los ríos de la región, obteniéndose altos índices de correlación.

Como ejemplo ilustrativo se analiza el caso del río Diamante en donde la relación entre los caudales emergentes y la cantidad de nieve medida en la estación nivométrica de la Laguna llega al valor  $r^2=0,57$ , o sea que la relación explica casi el 60% de la varianza total.

**Gráfico 3**  
**Relación nieve caudal para el río Diamante<sup>a</sup>**  
 (En índices)

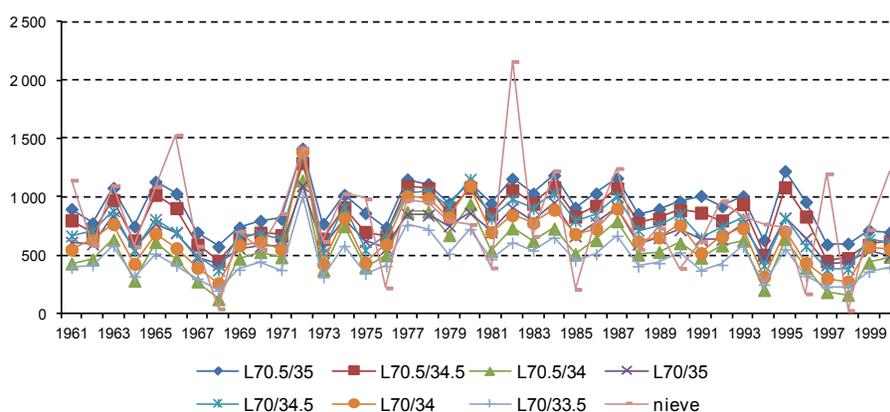


Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Los datos de caudal (m<sup>3</sup>/seg) y de nieve (mm de agua equivalente) se normalizaron a los efectos de comparar ambos registros.

Para conocer cuán bien representan a la precipitación de nieve los datos estimados por el modelo, se estableció la relación entre los datos de la nieve medida con la precipitación anual estimada por el modelo. En este caso se lo ejemplifica para la cuenca del río Atuel utilizando los datos de nieve de la estación Valle Hermoso y varios puntos de la grilla que caen sobre dicha cuenca. Se observa una buena relación aunque la variabilidad de los datos estimados es menor que la de la serie medida.

**Gráfico 4**  
**Relación entre la nieve medida en Valle Hermoso y las series de precipitación estimada por el modelo**  
 (En equivalente a mm/año)



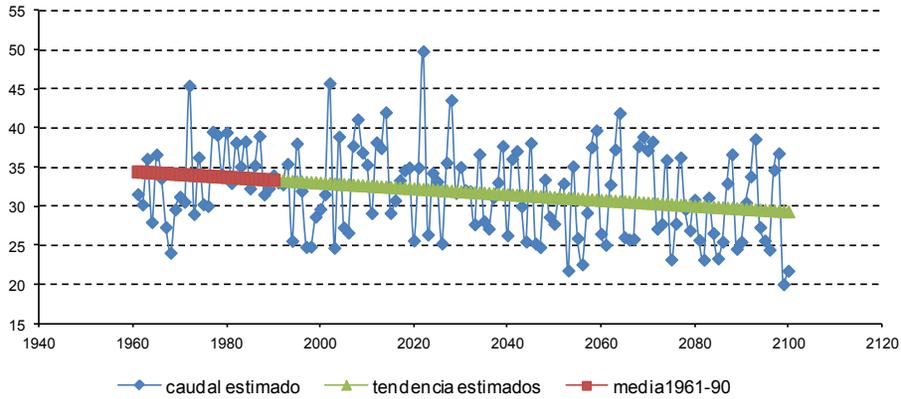
Fuente: Elaboración propia.

La correlación entre los datos del modelo y los caudales para el período base 1961-1990, resulto significativa para cada uno de los ríos, por lo que se establecieron entonces las respectivas ecuaciones de regresión que permitieron la estimación de los caudales futuro.

Para el período de la línea base (1961-1990), es posible comparar la bondad del ajuste entre el caudal estimado con la ecuación de regresión y el caudal medido. Ya que existen algunos años más de mediciones de caudales, es posible también verificar el ajuste durante esa parte del período.

Con las ecuaciones de regresión establecidas para cada río de los seis que conforman el sistema hídrico de Cuyo, se realizaron las estimaciones de los caudales futuros.

**Gráfico 5**  
**Estimación de los caudales futuros para el río Diamante, escenario A2**  
 (En m<sup>3</sup>/seg)

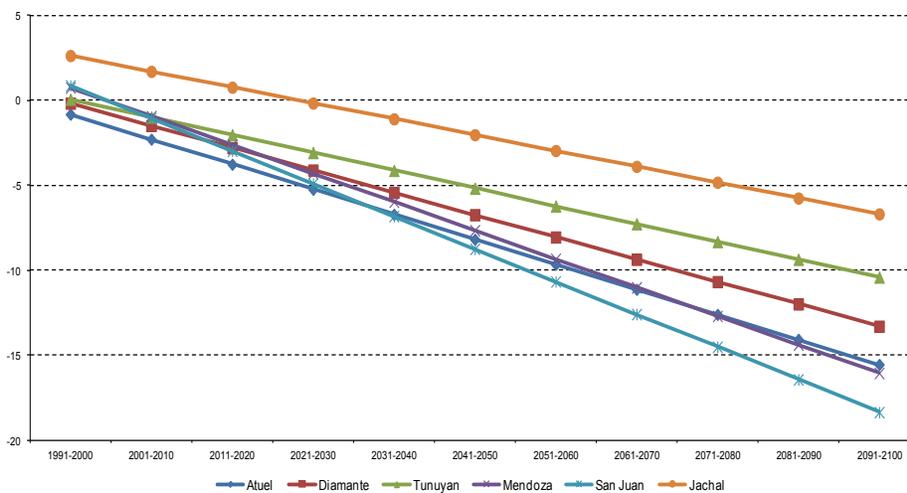


Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en el gráfico 6, la dispersión de los caudales estimados es alta, por lo cual, para cuantificar los impactos del cambio climático sobre los caudales, se eligió analizar la tendencia de la serie y no los valores anuales.

La diferencia en las pendientes de las tendencias de los ríos puede deberse a varias causas. Una de ellas es inherente a la geografía de la cuenca y en especial a la mayor o menor latitud. La otra es la posición relativa de la cuenca con respecto a la longitud. En especial el caso del río Jáchal ya que gran parte de su cuenca esta bajo el meridiano de 69,5° que, como ha sido mencionado anteriormente, tiene una tendencia a aumentar la precipitación del verano.

**Gráfico 6**  
**Tendencias estimadas de los ríos de Cuyo por décadas, escenario A2**  
 (En porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 2**  
**Caudales estimados para los escenarios A2 y B2 de acuerdo a la precipitación estimada por el modelo,**  
**desde el 6to año al 5to año de la próxima década <sup>a</sup>**

*(En m<sup>3</sup>/seg)*

A. Escenario A2

Década	1961-90	1986-95	1996-05	2006-15	2016-25	2026-35	2036-45	2046-55	2056-65	2066-75	2076-85	2086-95	2091-101
Jachal	9,43	9,60	9,53	9,47	9,40	9,34	9,27	9,21	9,14	9,08	9,01	8,95	8,88
San Juan	60,07	61,03	59,93	58,83	57,73	56,63	55,53	54,43	53,33	52,23	51,13	50,03	48,92
Mendoza	47,18	47,67	46,94	46,21	45,48	44,76	44,03	43,30	42,57	41,84	41,11	40,38	39,66
Tunuyán	29,81	29,82	29,56	29,30	29,04	28,77	28,51	28,25	27,99	27,73	27,47	27,21	26,95
Diamante	36,60	36,63	36,19	35,75	35,32	34,88	34,44	34,00	33,56	33,12	32,68	32,25	31,81
Atuel	36,50	36,36	35,87	35,38	34,89	34,41	33,92	33,43	32,94	32,45	31,96	31,47	30,98
Total	219,59	221,11	218,03	214,94	211,86	208,78	205,70	202,61	199,53	196,45	193,37	190,29	187,20

B. Escenario B2

Década	1961-90	1986-95	1996-05	2006-15	2016-25	2026-35	2036-45	2046-55	2056-65	2066-75	2076-85	2086-95	2091-101
Jachal	9,43	9,58	9,60	9,62	9,63	9,65	9,66	9,68	9,69	9,71	9,73	9,74	9,76
San Juan	60,07	61,24	60,87	60,50	60,13	59,76	59,39	59,01	58,64	58,27	57,90	57,53	57,16
Mendoza	47,18	47,83	47,57	47,32	47,06	46,80	46,54	46,29	46,03	45,77	45,51	45,26	45,00
Tunuyán	29,81	30,17	30,13	30,08	30,04	29,99	29,95	29,91	29,86	29,82	29,78	29,73	29,69
Diamante	36,60	36,98	36,82	36,66	36,50	36,34	36,18	36,03	35,87	35,71	35,55	35,39	35,23
Atuel	36,50	36,91	36,75	36,58	36,41	36,24	36,07	35,90	35,73	35,56	35,39	35,22	35,06
Total	219,59	222,72	221,74	220,75	219,77	218,78	217,80	216,81	215,83	214,84	213,86	212,87	211,89

Fuente: Elaboración propia.

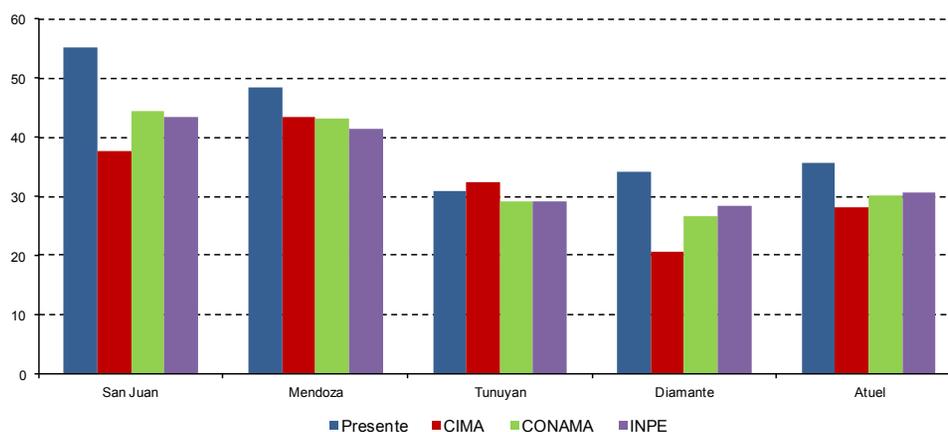
<sup>a</sup> La última fila es el total de la oferta hídrica de los ríos de Cuyo. Los caudales representan valores medios anuales.

## 2. La estimación de los caudales

Para tener una medición de los impactos, en volumen de agua, los porcentajes de aumento o disminución de los caudales se escalaron a los valores de los caudales medidos durante el período base 1961-1990. En el cuadro 2 se ha desplazado el año inicial de las décadas para que el centro coincida con los años múltiplos de diez, a los fines de permitir una mejor comparación con los estudios realizados en otras regiones del país. El análisis de estos resultados permite deducir que, el escenario B2, es un escenario para el cual la pérdida de oferta hídrica es del orden de 10 m<sup>3</sup>/seg, para toda la región, lo que probablemente no supera la variabilidad natural del sistema. En cambio el escenario A2 representa una pérdida de 33 m<sup>3</sup>/seg, para el conjunto de la oferta hídrica regional, tres veces más que para el escenario B2 y correspondiendo a un caudal equivalente a ríos como el Tunuyán, Diamante o Atuel.

Los tres modelos analizados presentan un comportamiento muy similar y establecen una reducción de los volúmenes erogados. La disminución de los caudales en porcentaje varía de acuerdo a la cuenca que se considere, la del río San Juan, ubicada más al norte, es la que tendría una mayor disminución de aproximadamente el 21% con respecto al presente, la del Mendoza el 12%, el Tunuyán casi sin cambio, el Diamante 19% y el Atuel 15% para los modelos PRECIS y algo más extremo para el modelo MM5/CIMA (ver gráfico 7).

**Gráfico 7**  
**Comparación de los caudales pronosticados por los tres modelos con los actuales<sup>a</sup>**  
(En m<sup>3</sup>/seg)



Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Los tres modelos presentan resultados similares, lo cual indica que la calidad de la estimación es buena. Las predicciones para los modelos PRECIS son para el período 2071-2100, mientras que el modelo MM5/CIMA lo hace para 2081-2090.

La gran variabilidad que se observa en la precipitación de la región está también representada en las estimaciones de los escenarios futuros. Falvey (2007) estudio la precipitación en un ensamble de 21 modelos de circulación para la región de los Andes Centrales Argentino-Chilenos y concluyó que la variabilidad natural del sistema enmascara la señal del cambio climático. Se observa que recién hacia fines del presente siglo, la precipitación estará por debajo de una desviación estándar y comenzará a ser significativa. Es interesante notar que la disminución de la precipitación alcanzará valores entre un 20% a un 25% menores a los actuales que son coherentes con los valores pronosticados de la disminución en los caudales. Esta variabilidad implica que en el futuro existirán años en los que la cantidad de nieve será normal y años de déficit de precipitaciones, y que estos últimos serán cada vez más frecuentes.

## G. Metodología para la estimación de las superficies de almacenaje

Para estimar la pérdida de capacidad de almacenaje de las cuencas por aumento de la temperatura y consiguiente elevación de la isoterma de 0°C. Se empleó la siguiente metodología:

- En base a la grilla de puntos empleada en el estudio de los caudales, se extrajeron de los datos provistos por el modelo PRECIS, las series temporales de temperatura media, mínima y máxima (escenario A2) que posteriormente se redujeron a temperaturas media, mínima media y máxima media anual, a temperaturas media, mínima media y máxima media de verano (enero-abril) y a temperaturas media, mínima media y máxima media de invierno (mayo-septiembre).
- En base a la altitud (en metros sobre el nivel del mar) que asigna el modelo a cada punto de la grilla y a la temperatura de superficie dada por modelo para ese punto, se calculó la altura de la isoterma de 0°C, proyectando el gradiente normal de temperatura (-0,7 °C/100mts de elevación).
- Para cada cuenca se corrigieron las alturas encontradas por la proyección del gradiente tomando como referencia los 4100mts sobre nivel del mar como altura media de la isoterma 0°C para el período base. Este valor es el valor medio de altura de la isoterma 0° de la serie de radiosondeos suministrado por la estación Quinteros de Chile para los años 1975-2004.
- Para estimar la superficie de las cuencas por encima de la altura media de la isoterma de 0°C en verano y en invierno se utilizaron imágenes satelitales.
- La definición de los límites de las cuencas se realizó aplicando modelo ARC HYDRO, implementado como una extensión de ARCGIS 9.0 (ESRI), sobre el Modelo Digital de Elevación SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) obtenido en el USGS (*United States Geological Survey*).
- Proyectando sobre el DEM correspondiente a cada cuenca el valor de la altura de la isoterma, se determinó la superficie en km<sup>2</sup> sobre la línea de 0°C, para las décadas del período base, 2011-2020; 2021-2030; 2051-2060; 2071-2080; y 2091-2100 así como el porcentaje de superficie de la cuenca sobre el cual se puede acumular nieve en invierno o puede permanecer la nieve en el verano.
- Para estudiar el impacto del incremento de temperatura en los Andes Centrales sobre el hidrograma de los ríos, se encuentra el problema de la falta de series largas de datos meteorológicos en la región, especialmente en las altas cuencas y la falta de modelos teóricos que correlacionen, temperatura, precipitación de nieve y los caudales emergentes.
- La estación de Punta de Vacas sobre el río Mendoza a 2.450 m es un lugar en donde existe una serie de temperatura y de caudales. Cercana a esta estación aunque a mayor altura, se encuentran la carrera de nieve de Horcones y de Portillo. Si se estudia aquí la relación entre el caudal mensual y la temperatura media mensual se observa que las variables no se encuentran relacionadas linealmente y que poseen una distribución exponencial.
- Utilizando las ecuaciones derivadas de esta distribución exponencial y colocando como parámetros los valores estimados de temperatura por el modelo PRECIS para el punto de grilla más cercano a la estación de Punta de Vacas se realizó el experimento de establecer la forma del hidrograma para los valores de la línea base y para la década del 2021-2030.

## H. Resultados de la estimación de superficies de almacenaje

### 1. La isoterma de 0°

La isoterma de 0°C indica la división de regiones en donde ocurren los fenómenos de acumulación y de ablación de la nieve.

Esta línea tiene variaciones estacionales, desciende en el invierno y asciende en el verano. La amplitud de esta oscilación indica la superficie sobre la cual se produce la fusión de la nieve que origina los caudales emergentes.

Como la fusión de la nieve depende de que se alcancen temperaturas superiores a los 0°C, la altura de la isoterma de 0°C, indica la región por encima de la cual no habrá fusión mientras que todo lo que esté por debajo de esta cota, tendrá energía suficiente para transformar la nieve en agua líquida. Además separa las región en donde ocurren la precipitación líquida y la precipitación de nieve, y en donde los suelos permanecen congelados en forma estacional. Esta región de suelos congelados en forma casi permanente es una región en donde los suelos están estabilizados y no permiten la formación de lodo, ya que no hay caída de lluvia en forma líquida, asegurando una gran estabilidad de las pendientes. Una consecuencia del aumento de la temperatura será también la mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. En algunas regiones, en particular en la cuenca del río Mendoza, en donde se encuentra el mayor paso fronterizo, podría implicar un incremento del riesgo.

La máxima altura alcanzada por la línea de 0 permite estimar la zona en donde la nieve es permanente y en donde su acumulación y transformación en hielo permite la existencia de glaciares.

Se ha estimado la altura media de la isoterma para los meses de invierno (mayo-septiembre) y de verano (octubre-abril). Los datos actuales usados para comparación se obtuvieron de las series de radiosondeos diarios en Quinteros, tomadas por la Dirección de Meteorología de Chile desde 1975 hasta 2004.

Como se observa en el cuadro 3 las superficies sobre la línea de 0 disminuyen tanto en invierno como en el verano, la proporción de esta disminución es distinta para cada cuenca ya que hay diferencias topográficas entre ellas, tanto en su altura como en su superficie total.

Así, las cuencas ubicadas al norte de la región (Jachal, San Juan, Mendoza y Tunuyán) que poseen mayor altura media presentan variaciones en los porcentajes de superficie sobre 0°C entre los inviernos actuales y los inviernos de la década 2020-30 en valores cercanos a -10%. Algo mayor es la pérdida entre los veranos (-25%).

En las cuencas ubicadas hacia el sur, esta proporción es notablemente mayor en el verano, dado que las cuencas tienen menor altura. Esta situación es analizada para la cuenca del río Diamante: la cuenca del Diamante es relativamente baja, con pocos cerros con alturas superiores a los 4800mts por lo que en la misma no existen muchos glaciares.

La magnitud de la disminución de la superficie por encima de la isoterma 0 resulta evidente cuando se estima el porcentaje que sobre el total de la cuenca representa dicha superficie. Así, en la actualidad, en el invierno, el 72% de la cuenca está en la región con temperaturas menores a 0°C; para la década del 2021-2030, esta proporción desciende al 64% y para la década del 2091-2100 alcanzaría a solo el 46%. Durante el verano, en la actualidad la superficie en donde se mantiene la nieve es del 6%, se estima para el 2021-2030 en 2,5% y para el 2080-2100 apenas en un 0,1%, prácticamente no habrá superficie capaz de mantener nieve de un año para otro.

La reducción de las superficies captadoras afectará necesariamente el balance de los glaciares, cuya disminución probablemente se acentúe fuertemente.

**Cuadro 3**  
**Altura de la línea de 0°C para cada cuenca en verano, invierno y media anual<sup>a</sup>**

Río	Década	Altura s.n.m isoterma 0°C (en mts)			Superficie sobre isoterma 0° (en km <sup>2</sup> )			Superficie sobre isoterma 0°C (en porcentajes)		
		media anual	verano	invierno	media anual	verano	invierno	media anual	verano	invierno
Jachal	1961-1990	3 714	4 187	3 241	12 986	7 756	16 427	51	30	64
	2011-2020	3 884	4 356	3 411	11 395	5 720	15 357	45	22	60
	2021-2030	3 940	4 413	3 468	10 791	5 213	14 932	42	20	59
	2051-2060	4 110	4 582	3 637	8 706	3 663	13 653	34	14	54
	2071-2080	4 223	4 695	3 751	7 339	2 773	12 660	29	11	50
	2091-2100	4 336	4 808	3 864	6 063	2 040	11 593	24	8	45
	superficie total río Jachal: 25 500 km <sup>2</sup>									
San Juan	1961-1990	3 535	4 158	2 912	9 351	3 566	14 614	37	14	57
	2011-2020	3 686	4 320	3 051	7 845	2 512	13 618	31	10	53
	2021-2030	3 736	4 374	3 098	7 346	2 222	13 273	29	9	52
	2051-2060	3 886	4 536	3 237	5 869	1 522	12 150	23	6	48
	2071-2080	3 987	4 644	3 330	4 950	1 169	11 340	19	5	44
	2091-2100	4 087	4 752	3 423	4 103	883	10 459	16	3	41
	superficie total río San Juan: 25 570 km <sup>2</sup>									
Mendoza	1961-1990	3 499	4 135	2 862	3 694	1 925	5 151	41	21	57
	2011-2020	3 648	4 303	2 993	3 343	1 433	4 767	37	16	53
	2021-2030	3 698	4 359	3 037	3 216	1 280	4 651	36	14	51
	2051-2060	3 847	4 527	3 168	2 803	866	4 387	31	10	49
	2071-2080	3 947	4 638	3 256	2 510	635	4 185	28	7	46
	2091-2100	4 047	4 750	3 343	2 198	442	4 013	24	5	44
	superficie total río Mendoza: 9 040 km <sup>2</sup>									
Tunuyán	1961-1990	3 492	4 124	2 861	2 655	1 143	4 066	24	11	37
	2011-2020	3 640	4 290	3 013	2 262	851	3 779	21	8	35
	2021-2030	3 690	4 346	3 064	2 135	767	3 677	20	7	34
	2051-2060	3 838	4 512	3 216	1 786	554	3 352	16	5	31
	2071-2080	3 936	4 623	3 317	1 566	444	3 124	14	4	29
	2091-2100	4 035	4 734	3 418	1 332	336	2 858	12	3	26
	superficie total río Tunuyán: 10 848 km <sup>2</sup>									
Diamante	1961-1990	3 467	4 098	2 836	1 059	165	2 007	38	6	73
	2011-2020	3 609	4 258	2 978	793	86	1 840	29	3	67
	2021-2030	3 657	4 311	3 025	708	68	1 784	26	2	65
	2051-2060	3 799	4 471	3 166	474	31	1 600	17	1	58
	2071-2080	3 894	4 577	3 261	349	16	1 477	13	1	54
	2091-2100	3 988	4 683	3 355	249	7	1 284	9	0	47
	superficie total río Diamante: 2 753 km <sup>2</sup>									
Atuel	1961-1990	3 467	4 098	2 836	533	69	1 472	14	2	39
	2011-2020	3 609	4 258	2 978	375	38	1 243	10	1	33
	2021-2030	3 657	4 311	3 025	326	30	1 169	9	1	31
	2051-2060	3 799	4 471	3 166	205	12	955	5	0	25
	2071-2080	3 894	4 577	3 261	148	6	810	4	0	21
	2091-2100	3 988	4 683	3 355	106	3	673	3	0	18
	superficie total río Atuel: 3 800 km <sup>2</sup>									

Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Se incluye la superficie correspondiente sobre dicha línea y el porcentaje de la superficie total de la cuenca.

## 2. Las modificaciones del hidrograma

Se estudio la relación entre el caudal mensual, la temperatura media mensual y las mediciones de nieve de la estación meteorológica de Punta de Vacas sobre el Río Mendoza. Se encontró que las variables están relacionadas en forma exponencial con una ecuación de ajuste del tipo  $y=a+bx^3$ .

Se observa que con temperaturas menores a 10°C en Punta de Vacas, el caudal se mantiene aproximadamente constante con valores entre 15 y 17 m<sup>3</sup>/seg. Cuando la temperatura alcanza valores mayores, el caudal se incrementa exponencialmente. La dispersión de los datos es particularmente notable a temperaturas mayores a 15°C y se debe a la mayor o menor cantidad de nieve presente en la cuenca.

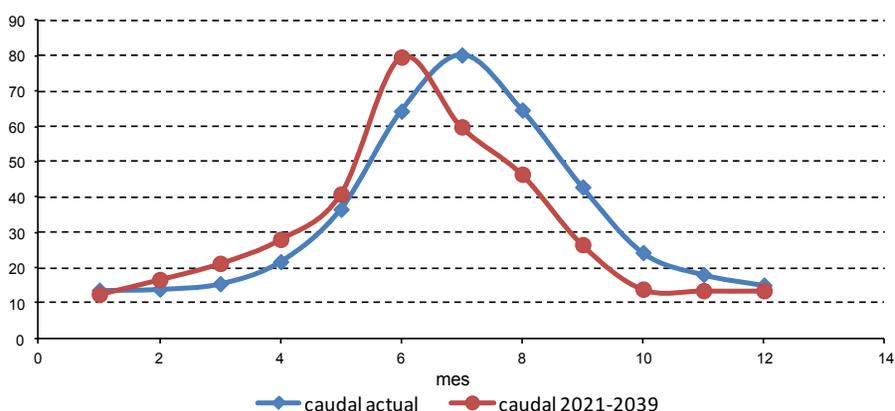
Se proyectó el hidrograma medio del río con un aumento de temperatura de 1,25°C y una disminución de la cantidad de nieve en equivalente agua de 100mm de acuerdo a los valores estimados por el modelo PRECIS para el escenario A2, con respecto a los valores de la línea de base corregidos.

El hidrograma medio del río Vacas se calculo utilizando los datos de los caudales medios mensuales correspondientes a los años para los cuales se poseen datos de carreras de nieve en la estación Portillo, la temperatura media mensual para dichos años y la carga de nieve promedio.

Utilizando la relación establecida se estimó el hidrograma teórico para las temperaturas actuales y para las temperaturas pronosticadas para la década de 2021-2030.

Los resultados se visualizan en la gráfico 8. Claramente se observa 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. Las consecuencias de este fenómeno deberían tenerse en cuenta en la planificación del riego, en el manejo de las presas y centrales hidroeléctricas y sobre la provisión de agua para el consumo humano.

**Gráfico 8**  
**Hidrograma actual en la estación Punta de Vacas y el proyectado**  
**para la década de 2021-2030**  
(En m<sup>3</sup>/seg)



Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Valores con un aumento de la temperatura media de 1,5°C y una carga de nieve estimada según modelo de 505mm equivalente agua (100mm menos que el promedio actual). El mes 1 corresponde a julio.

## I. Conclusiones

- Los ríos de la región cuyana son de régimen hidro-nival, fuertemente condicionados por la cantidad de precipitación sólida que se acumula en la cuenca superior.
- El proceso de escorrentía se produce por fusión de la nieve acumulada en la cuenca, proceso en el cual la temperatura determina el momento y la velocidad con la que la nieve se funde.
- El modelo de simulación empleado muestra cambios importantes en la precipitación y la temperatura para los escenarios climáticos futuros en comparación con los valores actuales, estos cambios se acentúan notablemente hacia el final del presente siglo, y son particularmente importantes en el escenario A2. El escenario B2 no muestra cambios de magnitud que supere la variabilidad natural del sistema.
- La proyección de estos cambios climáticos a los caudales medios anuales se traducen en una disminución en las descargas emergentes con mayor impacto en los ríos San Juan (-18%) y Mendoza (-16%) mientras que los ríos ubicados hacia el sur presentan un impacto levemente menor (-10 a -15%) en relación a los caudales medios actuales.
- El río Jachal, cuya cuenca se ubica en el extremo norte de la región es la que se ve menos afectada, con pérdidas del orden del 5% hacia los fines de este siglo.
- La probable modificación el hidrograma se estimó solamente para un punto de la cuenca del río Mendoza, debido a la falta de datos y a la falta de un modelo de fusión de nieve. El punto en donde se realizó la estimación, cuenta con valores de caudales, temperatura y precipitación de nieve. La proyección de los valores dados por el modelo de circulación al hidrograma medio indica un adelanto de los picos de máxima descarga de aproximadamente un mes, aumento de los caudales en primavera (octubre y noviembre) y disminución de los caudales del verano (enero, febrero y marzo) para el período 2021-2030 y el escenario A2.
- La proyección de los valores de temperatura media, máxima y mínima obtenidos del modelo PRECIS, a la posición de la isoterma 0°C indica una disminución de la superficie de acumulación de nieve en el invierno y una disminución de la superficie que permite la permanencia de nieve en el verano de un año hacia el siguiente.
- Las cuencas más afectadas serán las cuencas ubicadas hacia el sur de la región porque son las cuencas más bajas, en las cuales la disminución de las superficies mencionadas alcanza a porcentajes entre 75 y 80 % para fines de este siglo, con respecto a las superficies actuales.
- Una consecuencia será la desaparición paulatina de los glaciares por elevación de la línea de 0°C y disminución de las precipitaciones, con la pérdida de la capacidad reguladora y de la reserva de agua que los mismos poseen.
- La elevación de la línea de 0°C en el invierno implicará la disminución de superficies aptas para la práctica de deportes invernales.
- La elevación de la línea 0°C media de verano expondrá superficies que en la actualidad están en forma permanente o casi permanentemente congeladas, con riesgo de pérdida de estabilidad y aumento de movimientos en masa.
- Si bien los resultados expresados en este informe son valores indicativos de tendencias y de órdenes de magnitud más que datos exactos, en su conjunto revelan una modificación importante del ciclo hidrológico para una región que es altamente dependiente del recurso hídrico y altamente vulnerable a cualquier alteración del mismo.



## **II. Evaluación de los impactos esperados y vulnerabilidad al cambio climático en la oferta y demanda de agua en la provincia de Mendoza**

---

*Armando Llop*

El objetivo de este capítulo del trabajo consiste en cuantificar el impacto socioeconómico producido por cambio climático sobre el ciclo hidrológico en las cuencas de Mendoza y San Juan, básicamente a través de su impacto en la reducción de los derrames de los ríos. Este efecto de contracción de los derrames, sumado al constante aumento de la demanda de agua y a los procesos de degradación del recurso que limitan, determinan la creciente escasez del recurso, que a su vez se refleja en el aumento de su valor: el valor marginal social del agua (VSMA). Nótese que este valor puede ser medido ya sea por el lado de la oferta (en términos del valor de todos los recursos asignados para disponer de unidad), como por el lado de la demanda (disposición a pagar por aquellos que adquieren tal unidad). En realidad, en situaciones de equilibrio, ambos valores deben coincidir. En este trabajo lo cuantificaremos a través de la oferta, simplemente porque es información fácil de obtener. La idea central es que el valor marginal social del agua es un poderoso indicador económico de la escasez del agua.

### **A. Un breve anticipo metodológico**

En este estudio se aplica una metodología conceptualmente muy sencilla. Para una cuenca dada, se establecen las condiciones básicas determinantes de su balance hídrico. Se establecen los determinantes de la evolución de la oferta agregada en el tiempo, por un lado, y los determinantes del aumento de la demanda, por el otro. En tanto el agua no es producible, en el corto plazo su disponibilidad está fija, y es tal cantidad la que determina el precio según donde la corte la curva de demanda. Será la trayectoria futura de oferta y la demanda las que determinen el camino del valor marginal social del agua en tiempo, que nos dará información acerca de la magnitud de la escasez, y de la vulnerabilidad de la cuenca (tasa de cambio del VMSA).

Lo descrito se desarrolla en base a un modelo de simulación básico en el que se cuantifican la oferta y la demanda del recurso. Para modelar la demanda, se especifican los distintos usos del agua,

particularmente el uso doméstico, riego, uso industrial, ambiental, etc. Se consideran los determinantes relevantes para establecer la intensidad de uso de un sector, tal como el crecimiento de la población para el sector agua potable.

La oferta del recurso se caracteriza a través del sistema hidrológico superficial y el sistema hidrogeológico que lo complementa, incorporando eventualmente el reuso de efluentes urbanos e industriales. En la determinación del VMSA deben incluirse las externalidades causadas por la sobreexplotación del agua subterránea que reducen su stock o que producen la salinización de tal recurso.

Para completar este anticipo metodológico, en el trabajo se toman como bases referenciales los escenarios climáticos suministrados por el INPE correspondientes a las emisiones A2 y B2 del IPCC. Para cada uno de ellos se realizan las proyecciones de oferta y demanda de agua considerando el siguiente conjunto de respuestas sociales<sup>2</sup>: a) no hacer nada; b) manejo de la demanda sectorial del agua (agua potable, riego, uso industrial, uso público) a través del cobro medido; y c) implementación de políticas sectoriales para incrementar la eficiencia de uso del agua. El estudio abarca a cada una de las cuencas de Mendoza y a la del río San Juan. Las trayectorias temporales del VMSA se proyectan del presente al 2100, destacando los valores que se alcanzan para los “años de corte” seleccionados: 2020; 2030; 2050; 2070 y 2100.

## B. Los componentes del modelo

Para abordar el tema mediante un enfoque sistémico, se ha adoptado el tradicional y recomendado criterio de tomar a la cuenca como unidad de análisis. Se analiza la demanda agregada del agua por un lado y la oferta agregada por el otro. La primera se encuentra afectada por el crecimiento poblacional y económico, mientras que la segunda está sujeta a los efectos que produce el cambio climático.

### 1. La oferta de agua

La metodología que se usa para estimar el valor social del agua, consiste en especificar la oferta de agua de largo plazo para cada cuenca bajo análisis, la que está determinada por el costo social de poner una unidad adicional del recurso en uso. En todos los casos, la disponibilidad de agua se encuentra determinada por los ingresos de agua a la cuenca, generalmente de origen meteórico, y por ende afectada por el cambio climático. Los estudios realizados indican que el cambio climático afecta negativamente los derrames de todos los ríos que nutren las cuencas bajo estudio.

Al incrementarse la demanda, se agotan las fuentes superficiales y se avanza en el uso del agua subterránea hasta que, tarde o temprano, se inicia la sobreexplotación de este recurso. La sobreexplotación trae aparejadas dos externalidades, que son costos sociales, una es función de la reducción del nivel piezométrico, y otra es producida por procesos de intrusión salina. Sobre esta base, se entiende por valor del agua al monto que la comunidad (o un individuo) está dispuesta a gastar para contar con una unidad adicional del recurso. Conceptualmente, tal valor es una medida de los beneficios que tal unidad de agua reporta a la comunidad (o individuo).

En todas las cuencas debe aceptarse que la oferta total del agua está compuesta por las fuentes de agua superficial y subterránea. La oferta de agua superficial va a depender de las características hidroclimáticas, la topografía, características del suelo, la cobertura vegetal, el grado de intervención antrópica, etc., de cada cuenca en particular. En general, la oferta de agua superficial es variable, pero su distribución probabilística es bien conocida en la mayoría de las cuencas. En el caso de las cuencas andinas cuyos ríos son de origen nival, se puede incluso anticipar los derrames mediante mediciones de la nieve acumulada.

---

<sup>2</sup> Esta terminología responde al esquema Presión-Estado-Respuesta Social (PSR).

### a) El derrame futuro de los ríos

En la primera sección de este trabajo, Boninsegna mostró la manera en que el cambio climático afectará el derrame de los ríos que alimentan las cuencas bajo estudio, todos de origen nival. El cuadro 4 muestra los porcentajes en que se estima se reducirán los derrames hacia el año 2100. Estos valores, por su signo y magnitud pasan a jugar un rol primordial en la determinación de la escasez futura de recurso. Cabe recordar también que estos ríos son la principal fuente de la recarga de los sistemas de aguas subterráneas, a los que en este trabajo damos particular atención.

**Cuadro 4**  
**Reducción de los derrames de los ríos de las cuencas**  
(En porcentajes)

Cuenca	Escenario	Reducción del caudal-período 2000-2100
Cuenca Mendoza-Tunuyán (Norte)	B2	4,53
	A2	14,42
Cuenca Tunuyán Superior (Centro)	B2	2,41
	A2	10,46
Cuenca Diamante-Atuel (Sur)	B2	5,00
	A2	14,02
Cuenca San Juan	B2	7,18
	A2	19,06

Fuente: Elaboración propia.

### b) El agua subterránea

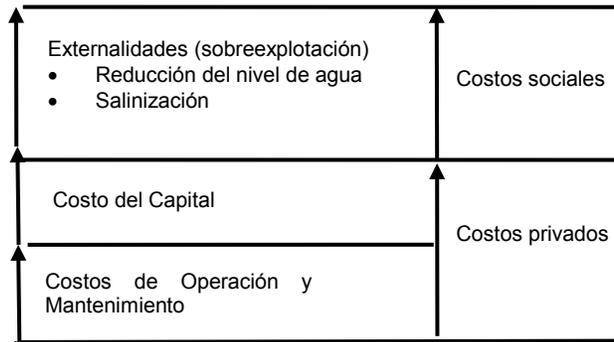
El agua subterránea se presenta de manera totalmente distinta, ya que ésta consiste en un stock de agua oculta en el subsuelo que crece en función de la recarga (que puede ser natural o artificial), y se descarga a través de las extracciones por bombeo, por vertientes o flujo subterráneo. Se trata de un proceso dinámico en que el stock de agua subterránea en un período es igual al stock que tenía en el período anterior, más la recarga, menos las extracciones. Cuando la descarga se torna mayor que la recarga y el stock se reduce, se dice que existe sobreexplotación, que trae aparejadas distintas externalidades. Lo relevante en la vida de la cuenca es la trayectoria temporal del stock, componente que se torna crítico al momento de estimar el valor del agua.

Para construir la curva de oferta de largo se supone que la comunidad de una cuenca tomará en primer lugar las fuentes de agua de menores costos, y en la medida que las necesidades por el recurso aumenten, seguirá avanzando siempre sobre las fuentes que le resulten comparativamente más económicas<sup>3</sup>. Ante el crecimiento sostenido de la demanda, se recurre en primer lugar a las fuentes de agua superficial, cuyos costos de captación y transporte resulten ser comparativamente los menores. Una vez agotadas las fuentes más económicas, se sigue con las de costos comparativos menores. Se puede seguir aumentando la oferta indirectamente vía el aumento en la eficiencia de distribución y uso del agua en los distintos sectores, lo que normalmente requiere de inversiones adicionales e involucra necesariamente mayores costos. Una vez agotadas las fuentes superficiales, se recurrirá a las disponibilidades de agua subterránea, por lo que el costo del recurso estará determinado por los costos inversión (costo de uso del capital), más los costos de operación y mantenimiento (ver gráfico 9).

Cuando se intensifica el uso del agua subterránea, la tragedia de los bienes comunes se pone en funcionamiento y comienza a producirse la sobreexplotación de los acuíferos con sus problemas derivados, que se presentan en la forma de externalidades. En la cuenca norte de Mendoza se han podido observar y cuantificar dos tipos de externalidades asociadas a la sobreexplotación del agua subterránea: una es de naturaleza esencialmente volumétrica, producto del descenso del nivel piezométrico, y la otra es producto de la pérdida de calidad del agua subterránea por intrusión de aguas salinas.

<sup>3</sup> Esta Ley fue postulada por el economista clásico David Ricardo.

**Gráfico 9**  
**Composición de los costos de la oferta**



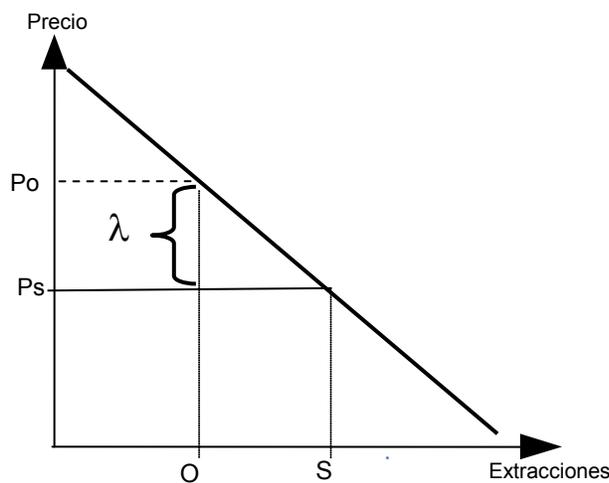
Fuente: Elaboración propia.

Una vez construida la curva de oferta de largo plazo, es la posición de la demanda agregada la que, al cruzarse con la oferta, determinarán el valor del agua relevante en ese determinado momento.

**c) Externalidad volumétrica por sobreexplotación**

Al extraer agua en exceso se provoca una reducción del nivel piezométrico del acuífero, lo que implica mayores costos. En esta situación se crea una divergencia entre los costos marginales privados y los costos marginales sociales, que conduce a una sobreexplotación del recurso subterráneo. En el corto plazo en detrimento de las disponibilidades futuras del mismo. El gráfico 10 muestra los niveles óptimos de extracción de agua desde el punto de vista privado  $X_p$ , y desde la perspectiva social  $X_s$ , claramente menor. La diferencia en la dimensión precios es el valor  $\lambda$ , que es precisamente el valor de la externalidad. Este valor refleja el costo impartido a terceros por cada unidad de agua que se extrae en el nivel de bombeo  $X_p$ , y es la divergencia entre el costo privado y el social. Conceptualmente, este valor representa el impuesto óptimo que la Autoridad de Aguas debería imponer para que el productor se comporte de la manera socialmente óptima. El valor de  $\lambda$  puede ser formalmente estimado para cada caso particular.

**Gráfico 10**  
**Representación de la externalidad**



Fuente: Elaboración propia.

Llop<sup>4</sup> (1982) deriva la siguiente expresión para esta externalidad:

$$I_j = \frac{l}{r} \sum_{i=1}^n X_i \frac{\partial C_i(Y)}{\partial Y} \quad (1)$$

Donde  $I_j$  es la externalidad,  $r$  es la tasa de descuento relevante,  $X_i$  es el volumen extraído por el usuario  $i$ ,  $\partial$  es el operador matemático de derivación parcial,  $C_i$  es el costo de bombeo para el usuario  $i$ , e  $Y$  es el stock de agua subterránea. Esta expresión dice que la externalidad  $I_j$  es igual al valor presente ( $l/r$  es el factor de actualización) del flujo de los costos que el usuario  $j$  genera a terceros, valor que está determinado por el producto entre el volumen total bombeado en un período dado (la sumatoria de las extracciones  $\sum X_i$ ) y el aumento en el costo de bombeo que produce la reducción de una unidad en el stock de agua subterránea  $Y$  ( $\partial C_i(Y)/\partial Y$ ). Esto tiene un profundo sentido lógico, pues significa que el costo inducido a la comunidad de usuarios al bombear una unidad adicional es cuanto incrementa el costo unitario de bombeo multiplicado por el número de unidades que bombean todos los usuarios.

Las estimaciones realizadas en la cuenca norte de Mendoza indican que para situaciones de franca sobreexplotación, como las que se dieron durante la gran sequía del siglo pasado (1968-1972), el valor de la externalidad acá descrita representó entre un 20% y 70% del valor de la energía eléctrica consumida por los usuarios.

Por fortuna, en el pasado reciente no se han evidenciado tendencias ni caídas de naturaleza permanente en el nivel piezométrico del acuífero, como las observadas en el período crítico arriba mencionado. Además, nuevos cambios estructurales, como el Dique de Potrerillos, han generado incertidumbre con relación al futuro del comportamiento del sistema subterráneo. No obstante, para muchos autores, el cambio climático determinará una reducción en el derrame de los ríos de Cuyo, lo que puede poner en vigencia esta externalidad en un futuro cercano.

#### d) La externalidad por salinización

Existe un proceso de salinización del agua subterránea que se manifiesta en la zona Este de la cuenca norte de Mendoza, que por su importancia y alcance espacial, constituye un caso paradigmático. El sistema de agua subterránea en esta cuenca tiene una estructura tricapa. El primer nivel (freático) se encuentra totalmente salinizado; el segundo nivel, salinizado en las vastas zonas críticas; y el tercer nivel está en vías de salinización<sup>5</sup>. Se sabe que los principales determinantes de la salinización son: a) la intrusión salina que ocurre al permear el agua a través del semi-confinamiento que separa los distintos niveles cuando se reduce la presión en los niveles profundos producto del bombeo (efecto conocido como “goteo”); y b) la intrusión salina que ocurre a través de los pozos deteriorados o mal construidos. De estos dos determinantes, se sabe que el principal responsable es el primero, que colabora cuantitativamente en más del 80% del aumento en el incremento de la salinidad (Llop y Fasciolo, 1998).

El aumento de la salinidad del agua determina el aumento de la salinidad del suelo mediante el riego, lo que a su vez produce la reducción de los rendimientos de los cultivos, lo que constituye un costo económico, que es una externalidad. La externalidad funciona así: cuando un productor extrae una unidad adicional de agua subterránea, que se encuentra en proceso de sobreexplotación, produce un aumento (aunque infinitesimal) de la salinidad del mismo, la que genera el consecuente costo al conjunto de usuarios. Además, no existe ningún mecanismo de mercado que obligue a este regante a no sobreexplotar, o a compensar al resto de los usuarios.

Esta externalidad se estima a través de un modelo simple de calidad de agua, del tipo de los conocidos MODFLOW. Estos se encargan de modelar las sucesivas reglas de mezcla que se concatenan determinando los procesos de acumulación de sales entre los distintos niveles que conforman a los acuíferos. Las sales se acumulan por los procesos de intrusión salina de los niveles freáticos

<sup>4</sup> Sobre la estimación de externalidades temporales en el uso del agua. Mendoza, INCYTH-CELA, 1981. Trabajo presentado en el IV Congreso Mundial de Recursos Hídricos, realizado, en septiembre de 1982 y en la XIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Agraria, Río Cuarto, Córdoba, octubre de 1982.

<sup>5</sup> Los recientes trabajos del INA-CRA dan indicación que el proceso de salinización, por lo menos en las zonas más críticas, son ya irreversibles.

superficiales hacia los niveles de mejor calidad. Esta salinización determina la pérdida de valor del agua por su menor productividad, donde pueden observarse los flujos de agua que ocurren en el sistema subterráneo.

## 2. La demanda de agua

La demanda agregada o demanda total de agua en un período dado está determinada por la suma de las demandas sectoriales. Esto es, la suma entre la demanda doméstica; la demanda de agua con fines de riego; la demanda industrial del recurso; la demanda del sector público; y la demanda ambiental por el mismo. Cada una de estas demandas sectoriales está determinada, a su vez, por la suma de los consumos de todos los usuarios del sector.

En las cuencas bajo análisis, la mayoría de los estudios de demanda de agua atacan fundamentalmente la dimensión cantidad. En este sentido, en la primera parte de esta sección se adoptó esta tradición, pero en la segunda parte se incorporan los componentes relativos a la calidad del agua. Hoy en día se admite que la calidad es de mucha mayor relevancia que la dimensión cantidad: es allí donde se encuentran los mayores problemas, y es ese el principal aspecto que determinó el primer Principio Dublín, que considera que el recurso hídrico es finito y vulnerable. Desde la perspectiva de la cantidad, se sabe que es un recurso renovable. El análisis tradicional del recurso hídrico comienza por un diagnóstico en el que se analiza la oferta y la demanda del recurso.

Se admite que la demanda total del recurso hídrico es la sumatoria de las demandas sectoriales. En la ecuación (2) se establece que la demanda total de agua en un determinado período  $t$  ( $DT_t$ ), es igual a la suma de la demanda doméstica en ese período ( $DD_t$ ); la demanda de agua con fines de riego ( $DR_t$ ); la demanda industrial del recurso ( $DI_t$ ); la demanda del sector público ( $DE_t$ ); y la demanda ambiental por el mismo ( $DA_t$ ). Esto es:

$$DT_t = DD_t + DR_t + DI_t + DP_t + DA_t \quad (2)$$

A continuación, se caracteriza cada una de estas demandas, identificando los principales argumentos o factores que la determinan con el fin de establecer los criterios básicos para su modelación.

### a) Demanda doméstica

La demanda doméstica o para uso humano es prioritaria en toda comunidad por múltiples razones, como también ocurre en las cuencas bajo análisis. En primer lugar, por el hecho que el uso humano del agua es priorizado en todas las leyes de agua o marcos normativos que norman su uso. En segundo término, porque los valores de la comunidad establecen siempre que el uso humano es en gran medida prioritario. Finalmente, existen razones de tipo económicas que determinan que éste es un uso prioritario. Esto deriva del hecho que la elasticidad por la demanda doméstica de agua es muy baja<sup>6</sup>. Que la demanda de uso doméstico sea inelástica, indica que la comunidad está dispuesta a pagar altos precios por el recurso cuando éste es decididamente escaso, y que existe una relativamente baja variación en las cantidades demandadas cuando se plantean importantes variaciones en el precio de la misma. En general, en la problemática de la provisión del agua potable, se incorpora como elemento de gran relevancia la capacidad de pago de la comunidad o población servida por este servicio. Es tal el valor que se asigna a la provisión de agua potable segura, que éste es el subsidio menos criticado por la ortodoxia económica.

Como elementos básicos para sustentar el alto valor que la comunidad le asigna al agua, cabe destacarse que la gran mayoría de las leyes provinciales del país, incluyendo las leyes de agua de La Rioja, de San Juan y de Mendoza, establecen el llamado uso común del agua. El uso común del agua es el derecho que tiene toda persona de satisfacer sus necesidades básicas, tales como agua para la bebida, preparación de alimentos, de higiene, abrevado de ganado, y otros elementos que hacen a la subsistencia básica de la vida.

<sup>6</sup> Las distintas estimaciones de la elasticidad precio de la demanda de agua potable arrojan, en general, valores próximos y menores a -0,3, lo que caracteriza a una demanda considerablemente inelástica: si aumenta mucho el precio, el consumo cae muy poco.

Por razones técnicas y económicas, en la gran mayoría de los casos, el agua potable se provee mediante sistemas centralizados, provisión que tiene las características de constituir un monopolio. Por esta razón, el servicio debe ser regulado y controlado por la autoridad pública, sea cual fuere la estructura institucional a través de la cual se provea el servicio.

En Mendoza y San Juan no existe una medición operativa del consumo de agua potable, razón por la cual las tarifas son simplemente un cargo fijo. Este está determinado por un polinomio de variables que intentan aproximar un uso presunto del agua, tales como superficie de la vivienda, superficie del terreno, edad de la vivienda, localización, entre otras. El hecho es que cada comisión paga un cargo fijo, independientemente del volumen consumido. Esto lleva a una situación de sobreuso o derroche del agua.

En el caso particular de las provincias de Cuyo, mucho se menciona en los medios acerca de la falta de conducta de la población en la utilización del recurso hídrico, aduciendo que existe siempre un notorio derroche del agua. Es común escuchar que el consumo asciende a más de 500 litros por día y por persona. Este dato es, en realidad, falso ya que lo que se está comentando es la cantidad producida por la empresa dividida el número de personas que sirve, es decir, el agua producida per cápita. Estimaciones concretas, realizadas en el Centro de Economía y Administración del Agua (CELA) (1988), indican que el consumo per cápita es mucho menor, siendo el valor más frecuente del orden de los 250 litros por persona y por día. Existen, no obstante, los grandes usuarios que, naturalmente, realizan un mayor consumo. Pero también existe un amplio segmento que utiliza muy poca agua; pues, literalmente en muchos casos, tiene la imposibilidad de aumentar el uso por las características de la conexión y la presión del recurso.

Cuando se realiza una proyección de la demanda futura del agua potable, normalmente lo que se hace es estimar el aumento de la población y la posible trayectoria en el tiempo de la demanda de agua insatisfecha. Esta última, consiste en todos aquellos potenciales usuarios que carecen de conexión al servicio de la empresa que sirve su localidad. En general, las proyecciones se realizan bajo el supuesto implícito de que el consumo per cápita se mantendrá constante, y que el principal determinante del aumento del consumo en el tiempo es el aumento de la población. No obstante, la experiencia a nivel internacional indica que es el precio del agua uno de los principales determinantes del consumo por conexión o del consumo per cápita. En la mayoría de los centros poblacionales en los que se pasa de un sistema de “canilla libre” a uno medido, en que el agua se paga por volumen, se produce una caída en el consumo que oscila entre el 30 y el 40%. Esta no es más que la acción del efecto precio en las decisiones de los individuos acerca de la cantidad de agua a utilizar.

En consecuencia, es muy importante establecer en la predicción futura de la demanda de agua el momento y la manera en que se incorporará la medición del consumo y se imponga una tarifa volumétrica por el consumo de agua. Este es, por lejos, el principal instrumento para racionar el consumo de agua.

Es importante también destacar que las provincias cuyanas ostentan clima árido, lo que indica que la mayoría de los usuarios asigna una importante cantidad del agua que consumen con fines de riego de jardines, árboles o plantas en general. Es muy conocido también que la demanda por este uso del agua (*outdoor*) es mucho más elástica que la demanda para consumo directo por el hombre, razón por la cual se tiene que esperar que la puesta en vigencia de una asignación por volumen y el establecimiento de una tarifa volumétrica producirá reducciones en el consumo por arriba del valor recientemente mencionado. En la sección donde se presenta la cuantificación y modelación del agua, se vuelve a este tema.

## **b) Demanda industrial**

La demanda de la industria en la región es importante, ya que la rama de actividad industrial dominante es la industria de base agraria, de por sí muy intensiva en el uso del recurso hídrico. En el caso particular de la cuenca norte de Mendoza, en las tomas del río existe un uso industrial asociado a la destilería de petróleo y a la Central Térmica Mendoza, las cuales presentan un uso consuntivo relativamente bajo, pero una necesidad de grandes cantidades de agua con fines de refrigeración. Se encuentra también aguas abajo la conocida zona alcoholera que hace un uso intensivo del agua,

particularmente no consuntivo. El grueso de los establecimientos industriales hace uso del agua subterránea. En este sentido, por desafortunado que parezca, en las provincias cuyanas no existen estadísticas de la cantidad de agua utilizada por el sector industrial, ni intenciones de medirla. En el mejor de los casos, existen registros en donde se consignan el número de bombas asignadas al sector industrial y algunas características básicas de las mismas, pero no mediciones de la cantidad de agua que utiliza. Las industrias prefieren esta fuente por tener un mayor control en cuanto a su disponibilidad, y también la garantía de una mejor calidad. No obstante, debe reconocerse que esto es muy importante.

Para realizar un análisis cuantitativo, no queda otra alternativa que aproximar el uso industrial por métodos indirectos. Información de los censos económicos y caracterización de las ramas de actividad dominantes resultan las mejores fuentes indirectas. Estos datos pueden ser complementados con las observaciones realizadas por las Inspecciones de Cauce respecto a los efluentes volcados. Este número inferido es preferible a considerar un uso industrial nulo, como normalmente consideran de manera implícita los organismos de gestión del agua.

La proyección de la demanda de agua con fin industrial debería considerar el uso de agua como función del desenvolvimiento de las empresas, determinado por la cantidad de unidades industriales y la intensidad de producción de las mismas.

### **c) Demanda de agua para riego**

Esta demanda es de hecho la que presenta el máximo uso consuntivo. Existe información bastante profusa, aunque contradictoria según las fuentes, acerca del volumen de agua utilizado por el sector. Para realizar un adecuado análisis del mismo, conviene discriminar entre el uso de agua superficial y el uso de agua subterránea.

El agua superficial se distribuye en las cuencas bajo análisis mediante sistemas de canales que asemejan una estructura dendrítica, compuestos por canales primarios, secundarios, terciarios, que pueden llegar a cuaternarios o más. Los nombres utilizados dependen de la jerga de cada provincia. En general, debe observarse que la problemática del riego en San Juan es considerablemente distinta a la de Mendoza. La principal cuenca sanjuanina, alimentada por el río San Juan, y sustentada por el dique de Ullum, encuentra sus canales primarios y secundarios totalmente impermeabilizados. Esto, si bien ha facilitado importantes incrementos en la eficiencia de distribución del agua, ha generado problemas de revenimiento en muchas áreas regadas, ya que al desarrollarse el sistema de riego no se previeron adecuadamente las futuras necesidades de drenaje.

En los casos de las cuencas de Mendoza, los sistemas de riego son administrados por el Departamento General de Irrigación (DGI) y las Asociaciones de Regantes, denominadas Inspecciones de Cauce. La autoridad hídrica central administra diques y canales primarios, el resto es administrado por las Inspecciones de Cauce. La mayoría de los canales son de tierra, lo que lleva a elevadas ineficiencias en la asignación del agua superficial. Puede decirse, en términos generales, que la eficiencia de asignación del agua de riego (río-planta) en las cuencas de Mendoza, se encuentra cercana al 30%. Esto equivale a decir que existe un importante espacio para avanzar en el incremento de la eficiencia para mitigar las potenciales reducciones del recurso asociadas a eventos como el cambio climático. Pero esto involucra grandes inversiones y, lo más importante, cambios culturales en los regantes y en la administración central.

El agua subterránea se ha manejado de una manera totalmente descentralizada y anárquica, de tal modo que los productores se comportan como si este recurso fuera de naturaleza privada: cada productor con capacidad de pago establece sus equipos de bombeo con el sólo requisito de solicitar permiso a la autoridad pública, que generalmente lo otorga, salvo contados casos<sup>7</sup>. No se mide la utilización del recurso subterráneo. Existe también un aspecto relevante que es un subsidio a través del pago de la energía, el cual se aplica al bombeo de agua subterránea con fines de riego. Esto tiende a

<sup>7</sup> Sólo existen 3 antecedentes de normas que prohíben la construcción de nuevos pozos: el área crítica de salinización de aguas subterráneas en San Martín, la margen derecha del Río Mendoza, y pequeños acuíferos pedemontanos. Todas estas normas estuvieron relacionadas con el Río Mendoza, e implementadas por una gestión que mostró alguna preocupación por el agua subterránea.

reducir los costos de este recurso, y facilitar su sobreexplotación. Sea cual fuere el caso, para el uso de agua subterránea, el regante debe pagar, además de la inversión, un costo que es el gasto en kw/hora utilizado en el bombeo, los costos de mantenimiento, y administrativamente un pequeño monto por bomba y por año al DGI. La existencia del consumo energético es equivalente a un pago por unidad de extracción del agua, lo que hace que la utilización del agua subterránea resulte mucho más eficiente que la utilización del agua superficial. El efecto precio es claramente un determinante de la eficiencia en la utilización del recurso.

La existencia del agua subterránea y la libertad de acceso a la misma, en el marco normativo existente, hacen que el agua subterránea tenga todas las características de un bien común. Como tal, en los casos que existe una alta demanda por el recurso, se produce la conocida “tragedia de los bienes comunes”. Esto se ha manifestado en el este de la cuenca norte de Mendoza, básicamente en los departamentos de San Martín, Rivadavia y Junín, donde se observa un creciente problema de salinización del agua subterránea. Los determinantes del proceso de salinización del agua subterránea son: a) la Ley de Aguas, que con su principio de inherencia, impide la reasignación del recurso superficial a zonas en la que el uso del agua subterránea es muy intenso; en el caso de esta importante zona del Este mendocino, miles de hectáreas satisfacen sus necesidades de riego exclusivamente gracias al agua subterránea; b) la estructura de suelo de las áreas críticas, que por ser de tipo franco-arenoso facilita la lixiviación del agua en profundidad, colaborando con la aceleración del proceso de intrusión salina; c) el alto valor que tiene la utilización del agua asignada a la producción agrícola; y d) la falta de incentivos que tiene el productor para abordar el fenómeno, por ser este un recurso común. La conjunción de estos elementos hace que se extraiga más agua que la socialmente deseable para asegurar condiciones de sustentabilidad.

En la zona bajo consideración, resulta ya prácticamente irreversible la tendencia en la degradación del acuífero, lo que conducirá a la desertificación de importantes áreas, básicamente de aquéllas que dependen exclusivamente del agua subterránea. Cabe destacarse acá, que en la cuenca norte de Mendoza, casi un 70% de las hectáreas cultivadas se encuentran complementadas con las aguas subterráneas. Esto quiere decir que los productores usan el agua subterránea cuando tienen déficit en la dotación de agua superficial. Este es un claro ejemplo de uso conjunto de agua subterránea, manejado descentralizadamente por los regantes, y causante de la tragedia de los bienes comunes.

Otro aspecto, un tanto novedoso, que se tiene en cuenta en este trabajo es la incorporación del reúso de las aguas cloacales e industriales con fines de riego. Es un hecho que los efluentes son utilizados con tal fin, independientemente de la formalización institucional de tal asignación del agua. Es más, las aguas servidas pueden llegar a tener mayor valor que el agua proveniente de otras fuentes. Factores que colaboran en esta apreciación del recurso son, entre otras, su contenido de fertilizantes y la invariancia de su caudal en el tiempo, lo que equivale a certidumbre en su disposición.

#### **d) Demanda del sector público y ambiental**

Tampoco existe mucha información del volumen de agua utilizado por los municipios. En este sentido, conviene recordar que son estos organismos los encargados del mantenimiento del arbolado público y de los espacios verdes, para lo cual cuentan con concesiones de agua superficial, y en muchos casos operan bombas de agua subterránea. Desafortunadamente, las autoridades hídricas, el DGI en Mendoza y la Dirección de Hidráulica de San Juan, prestan poca atención a este consumo, a pesar que ha mostrado una demanda creciente en el tiempo, acompañando al desarrollo urbano y a la mayor valoración que la población otorga a los espacios verdes. Al igual que en el caso de la demanda industrial, en este trabajo se estiman volúmenes de agua asignados, en función de la escasa información existente.

Al igual que la demanda industrial y la del sector público, la idea de uso ambiental carece de presencia institucional, y no cuenta con información adecuada. Se entiende por demanda ambiental aquel recurso utilizado con fines de mantenimiento de sistemas ecológicos y biodiversidad (como el caso de la laguna de Llacanelo en Malargüe, para mencionar un caso paradigmático), y con fines de recreación y turismo. Estos usos presentan un valor creciente en el reciente pasado, y todo análisis prospectivo debe incorporar el incremento del uso ambiental del agua. A manera de ejemplo comparativo, puede decirse que el Plan Hídrico de California establece que el uso ambiental del agua es el único que crece en términos absolutos en relación con otros usos.

## C. Cuenca norte de Mendoza - río Mendoza y Tunután inferior

El principal objetivo del análisis que aquí se presenta es contar con los valores básicos de consumo de agua por parte de los distintos sectores, a fin de contar con datos que hacen al balance hídrico, e identificar aquellos criterios básicos, relaciones funcionales y coeficientes que permitan la construcción de escenarios para el desarrollo de un modelo predictivo de la escasez de recursos hídricos.

### 1. Agua potable

La información relativa al agua potable muestra un uso de agua superficial del orden de los 198 hm<sup>3</sup>, y de 35 hm<sup>3</sup> de agua subterránea al año para esta cuenca. Esto totaliza los 233 hm<sup>3</sup> anuales. Si bien es común escuchar comentarios que aducen un monto de 500 litros por habitante por día, es importante destacar que ésta es en realidad la cantidad de agua producida per cápita. En este sentido, es importante comentar los resultados de trabajos realizados por el INA-CELA, en los que se ha estimado la demanda de agua potable utilizando como base fuentes alternativas. Este estudio indicó que la mediana del consumo se encuentra entre los 250 a 280 litros por persona por día y la elasticidad de la demanda oscila en alrededor de -0,3. La especificación funcional que más se utiliza, y que resulta muy fácil de operar, es la siguiente:

$$Q_t = k \cdot P_t e \quad (3)$$

Donde  $Q_t$  es la cantidad consumida,  $P_t$  es el precio,  $k$  es una constante, y  $e$  es la elasticidad. Puede apreciarse que con sólo 2 coeficientes,  $k$  y  $e$ , se puede caracterizar totalmente la demanda. La demanda para una conexión<sup>8</sup> de agua potable, estaría caracterizada por la siguiente función:

$$Q \text{ (m}^3\text{/mes)} = k \cdot (\text{precio o tarifa})^{-0,3} \quad (4)$$

No existe información fidedigna respecto a la demanda de agua insatisfecha, ya que los sistemas de información en la cuenca norte de Mendoza han tenido problemas interpretativos entre la empresa, Obras Sanitarias Mendoza y el Ente Regulador. Con la finalidad de establecer una proyección a futuro relativa al consumo de agua en esta cuenca, el escenario base mantiene el supuesto de un consumo per cápita constante, que totaliza 233 hm<sup>3</sup> anuales, y que aumenta según la proyección del crecimiento poblacional. Para estimar el crecimiento poblacional, se consideraron tres trayectorias alternativas, que son la lineal, la potencial y la logística. Los valores de población utilizados para las proyecciones son: 1.069.095 habitantes para el año 2000, según censo, y 1.164.760 estimada al 2010.

Existen dos dimensiones en las que se puede sensibilizar el consumo de agua per cápita. Una de ellas radica en establecer efectivamente el cobro volumétrico, pues actualmente el grueso de la tarifa que se cobra es según la vieja estructura polinomial utilizada por Obras Sanitarias de la Nación. La estructura es simple, siguiendo un polinomio en el cual entran como variables relevantes la superficie de la vivienda, la superficie del terreno, y otras variables orientadas a aproximar un uso presunto del agua utilizada. La experiencia internacional indica que cuando se pasa de un sistema de tarifa fija como la mencionada a un cobro volumétrico, el consumo del recurso hídrico cae entre un 30% y un 40%. En este sentido, una de las alternativas utilizadas para modelar los escenarios futuros, fue considerar que en algún período no lejano la empresa tomará la decisión de establecer el cobro volumétrico, por lo menos a una porción significativa de los usuarios.

<sup>8</sup> En el caso del agua potable, resulta más práctico utilizar el valor de consumo de la conexión, antes que una demanda individual. Sabiendo el promedio de usuarios por conexión, puede hacerse referencia, en promedio, al consumo individual.

## 2. El sector riego

El sector riego es el que presenta el mayor uso consuntivo del agua. En este sentido, resulta crítico su análisis a fin de determinar las demandas y disponibilidades futuras del recurso, y así poder cuantificar el impacto de distintos tipos de políticas en la asignación del agua, y el impacto de factores exógenos tales como cambio climático.

Afortunadamente, en el año 2002 se realizó el censo agropecuario<sup>9</sup>, merced al cual se puede contar con información bastante fidedigna acerca de la composición de los cultivos actualmente, como así también de las hectáreas cultivadas con cada uno de los cultivos dominantes. Este censo permite contar con buena información a nivel desagregado y a nivel de cuenca. De este modo, para esa fecha las hectáreas totales cultivadas por cuenca se explicitan en el cuadro 5.

**Cuadro 5**  
**Superficie cultivada por cuenca para Mendoza**  
(En hectáreas)

Cuenca	Superficie total
Norte: Mendoza y Tunuyán inferior	152 412,5
Centro: Tunuyán Superior	49 083,6
Sur: Diamante y Atuel	70 232,7

Fuente: CNA, 2002 "Censo Nacional Agropecuario".

Con relación a la superficie plantada con los distintos cultivos perennes, resulta difícil contar con series de tiempo, salvo para el caso de la viticultura. Estos valores son importantes para contar con datos históricos acerca de la naturaleza del crecimiento de las áreas cultivadas. La principal fuente de información del sector vitícola es el Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV), el cual ha realizado censos periódicos y actualizaciones anuales y permanentes de la superficie cultivada. Para dar un orden de magnitud, puede decirse que para el año 2000, Mendoza ostentaba 142.702 has cultivadas con vid, mientras que San Juan presentaba 45.285 has. Afortunadamente, los datos se pueden obtener desagregados por departamento, lo que posibilita la construcción de la información por cuenca.

El relevamiento realizado para contar con información relativa a frutales, hortalizas, forestales, etc., es tarea ardua, difícil y en gran medida frustrante, debido a la gran heterogeneidad y dispersión de la información. No obstante, todos los esfuerzos son necesarios para obtener una buena aproximación a la composición de cultivos (también llamada célula de cultivos). De esta manera, conociendo los fatos de evapotranspiración de cada cultivo y su proporción, pueden calcularse los coeficientes que relacionan has con consumo de agua para cada cuenca.

En este documento no se va a abundar con la información detallada disponible, pues no aporta valor al trabajo en sí, sino que simplemente advierte sobre la naturaleza de los supuestos asumidos para construir la información de base. Valga simplemente comentar que se cuenta con información sobre; evolución de la superficie cultivada con ajo; evolución de la superficie cultivada con frutales; la composición de especies que componen la canasta hortícola de la provincia; etc.

Con la información descrita, complementada con datos del Departamento General de Irrigación y de la Dirección de Estadísticas, se puede llegar a conocer cuál es la célula de los cultivos y otros datos que hacen al sector riego. En el cuadro 6 se presenta la información utilizada

Los datos de la célula de los cultivos son los utilizados por el DGI (Plan Director de la Cuenca del Río Mendoza, FAO – DGI, 2004). Estos datos son relevantes, pues indican la composición de los cultivos, lo que permite aproximar sus requerimientos de riego en base a la información relativa a la evapotranspiración de los cultivos. En este sentido, el cuadro 6 muestra la evapotranspiración para cada uno de los principales cultivos, según distintas fuentes. En la primera columna de este cuadro se

<sup>9</sup> [http://www.indec.mecon.gov.ar/agropecuario/cna\\_principal.asp](http://www.indec.mecon.gov.ar/agropecuario/cna_principal.asp) Mendoza. Superficie implantada de las EAP con límites definidos, por grupo de cultivos, según departamento y período de ocupación

muestran los principales cultivos. La segunda columna contiene los requerimientos de riego, medidos en milímetros por año, de acuerdo al informe de la FAO-DGI (2004d). Puede verse que la vid ocupa más del 50% de las hectáreas, siendo seguida por frutales y luego hortalizas.

**Cuadro 6**  
**Célula de cultivos y requerimientos de riego (ET)**

Cultivo	Requerimiento de riego <sup>a</sup>		Célula de cultivos
	(En mm/año)	(En m <sup>3</sup> /ha/año)	(En proporción)
	FAO - DGI	INTA - Bagini	
Ajo	636,68	5 690	0,018
Alfalfa	1245,92	11 650	0,027
Forestales	953,15	9 760	0,120
Frutales	1 086,03	10 280	0,153
Olivo	1 026,37	9 910	0,058
Tomate	809,34	5 690	0,096
Uva	776,4	10 160	0,529
Evapotranspiración ponderada		997,31	

Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Se adoptan los valores sombreados.

Con el fin de obtener un dato agregado de requerimientos agronómicamente determinados de los cultivos, se utilizan los datos de evapotranspiración sombreados en dicho cuadro. Estos datos, ponderados por la célula de cultivos, arrojan un requerimiento medio por hectárea y por año del orden de los 997,3 m<sup>3</sup>/ha/año.

La eficiencia de la asignación del agua es uno de los temas centrales cuando se analiza un sistema de riego en cualquier ámbito. La información al respecto es escasa y responde en general a algunas muestras o trabajos relativamente sistemáticos hechos en porciones de la cuenca. A los fines de este trabajo, se utilizan las eficiencias de riego elaboradas por el Instituto Italo-Latinoamericano y el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (actual INA), en el año 1982 (IILA-INCYTH, 1982). En él se consigna la medición de la eficiencia en distintos tramos del sistema de riego en la cuenca norte de Mendoza, que abarca los ríos Mendoza y Tunuyán Inferior. Los datos están presentados de manera desagregada para cada una de las unidades de gestión de estos ríos. Las unidades de gestión mencionadas aproximan las posteriormente definidas zonas de riego del río Mendoza.

Los datos de eficiencia medidos a principios de los años ochenta son reportados en el cuadro 7. En él se muestran las eficiencias: río-canal, canal-hijuela, hijuela-propiedad y propiedad-planta. El producto de estas cuatro es la eficiencia río-planta, que es la que aparece en la última fila. Debe señalarse que al presente han ocurrido importantes cambios estructurales que modifican a las eficiencias estimadas anteriormente en 1982. La primera modificación viene por las mejoras considerables de las eficiencias en las unidades de gestión 5, 6 y 7, producto de la finalización del 5° y 6° tramo del Canal San Martín.

El cambio estructural en las unidades de gestión mencionadas, que están localizadas en la zona Noreste de Lavalle y Norte de San Martín, se debe a que el agua que se asigna actualmente se hace a través de una importante extensión de un canal impermeabilizado. Anteriormente, estas zonas eran alimentadas con el agua que se tomaba directamente del lecho del río, y que eran allí derivadas los fines de semana cuando se procedía a la limpieza del dique derivador Cipolletti. Esta situación determinaba que el agua llegase en períodos muy cortos, normalmente mezclada con aguas freáticas, que naturalmente fluyen al río, y debía ser administrada en grandes volúmenes. Adicionalmente, era muy alto el transporte de sedimentos que el agua recogía del lecho del río y producía acumulaciones indeseadas de sedimento en las áreas regadas. Con el quinto y sexto tramo del Canal San Martín las

reglas de juego han cambiado totalmente. Se cuenta con un mayor volumen de agua, de mucha mejor calidad, cuya entrega ahora se extiende durante todos los días de la semana, no solamente los fines de semana. También se suman las aguas, ahora claras, provenientes del dique Potrerillos. Esto hace que la eficiencia en la entrega del agua (río-propiedad) haya sufrido un incremento muy notorio, que desafortunadamente ha llevado a otro problema adicional. Los regantes, siguiendo sus viejas técnicas de riego masivo, aplican demasiada agua a los cultivos; estas aguas claras son erosivas y percolan con facilidad, con lo cual se produce el lavado de suelos en muchas áreas cultivadas, la elevación de los niveles freáticos y el avance de la salinización en muchos suelos agrícolas.

**Cuadro 7**  
**Eficiencias de riego a principios de los años ochenta**  
(En valores porcentuales)

Río Mendoza							
Unidades de Gestión	UG 1	UG 2	UG 3	UG 4	UG 5	UG 6	UG 7
Río-canal	85,90	85,90	90,68	99,18	88,23	54,38	43,54
Canal-hijuela	73,03	73,03	78,78	93,21	77,53	62,73	65,33
Hijuela-propiedad	90,30	90,30	87,11	90,76	84,57	72,99	83,98
Propiedad-planta	59,00	59,00	46,85	55,98	63,00	52,00	73,00
Río-planta	33,42	33,42	28,87	47,41	36,45	12,95	17,44

Río Tunuyán Inferior				Valores	Agregados
Unidades de Gestión	UG 8	UG 9	UG 10	Río Mendoza Ajustado	Río Tunuyán
Río-canal	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00
Canal-hijuela	73,35	55,00	93,59	95,00	73,98
Hijuela-propiedad	90,21	99,00	92,06	85,72	93,76
Propiedad-planta	81,64	85,00	75,00	67,69	80,55
Río-planta	50,89	43,97	60,00	52,36	51,62

Fuente IILA-INCYTH ( 1982), "Eficiencias de Riego en el Río Tunuyán Inferior.

Otro de los aspectos que ha modificado notoriamente la asignación del agua es la existencia del dique Potrerillos. Antes, el agua se asignaba en función del caudal existente en el río; pero actualmente, se lo puede manejar con mucha mayor precisión, lo que también colabora con el aumento de la eficiencia en todo el sistema vía la racionalización en el sustenta de entrega de agua superficial. Esto, más la innecesaria limpieza del Dique Cipolletti, que ya no es alcanzado por los sedimentos y material de arrastre del lecho del río, lleva a que la eficiencia río-canal y canal-hijuela hayan avanzado notoriamente. Los datos finales de eficiencia adoptados figuran en la parte inferior derecha del cuadro 7. De este cuadro surge que la eficiencia global río-planta asciende en la cuenca norte a 52%, que resulta el promedio observado para las áreas de influencia de los ríos Mendoza y Tunuyán.

Debe considerarse que la eficiencia media arriba consignada no considera a la "fracción de lixiviación" recomendada por los agrónomos para mantener bajo el nivel de salinidad del suelo como una ineficiencia. Se recomienda que esta fracción debe ser por lo menos del orden del 30% de la dotación de agua. No obstante, existe la concepción común de que las "pérdidas por lixiviación" constituyen una ineficiencia<sup>10</sup>, situación bajo la cual se aduce que eficiencia de riego en la cuenca constituye un valor ligeramente superior al 30%.

<sup>10</sup> Esta concepción surge de considerar que el rol del agua de riego debe atender solamente a las necesidades volumétricas del cultivo, lo que está asociado a que los estudios de evapotranspiración estiman solamente el volumen de agua evapotranspirado. Pero si solo

La caracterización del sistema de riego es muy relevante para establecer las condiciones imperantes que acotan las posibilidades de manejo del agua en el mismo. La restricción más importante es el conocido principio de inherencia que figura en la Ley del Agua de Mendoza. Este principio significa que una vez asignada el agua a una determinada propiedad, o extensión de tierra, ésta no puede ser utilizada con ninguna otra finalidad y en ningún otro lugar. Esto es, el agua está atada al suelo. La única forma de transferir el recurso es mediante la venta de la propiedad. Este principio, que si bien ha dado certidumbre en la propiedad del recurso por parte de los empresarios agrícolas, ha llevado también a la aparición y permanencia de una serie de restricciones. No obstante esto, debe indicarse que, con el transcurso del tiempo y las necesidades planteadas por la comunidad, muchas de las implicancias de tal principio han sido relativizadas o modificadas de distintas maneras. A pesar de ello, la inflexibilidad planteada ha generado graves problemas, algunos de los cuales mencionamos a continuación.

El problema de la salinización del agua subterránea en el Este mendocino está grandemente determinado por la inflexibilidad existente en la asignación del agua. Al existir áreas apropiadas para los cultivos con alta productividad, sin derechos de riego, las adecuadas condiciones a fines de la década de los sesenta y principios de los años setenta determinaron ingentes inversiones en riego con agua subterránea exclusiva. Esto se repite en varios ámbitos de las cuencas de Mendoza. En San Juan existe flexibilidad para trasladar el recurso.

A lo mencionado debe agregarse el hecho de que en la cuenca norte de Mendoza, aproximadamente un 70% de las hectáreas cultivadas con derecho de riego cuentan con infraestructura para extraer agua subterránea y complementar el déficit de agua superficial. Ante la ausencia del dique Potrerillos, el máximo déficit hídrico ocurría en los meses de primavera, debido a que existe un natural rezago en el escurrimiento de las aguas con relación a la trayectoria temporal de la evapotranspiración de los cultivos. Esta deficiencia temporal ha sido grandemente superada mediante la utilización de agua subterránea. Basta con observar los consumos mensuales de energía para la zona, para apreciar que las máximas demandas de energía se dan en los meses de primavera. Esto ha ayudado a que, entre las hectáreas con riego subterráneo exclusivo y la complementación del agua superficial durante su escasez, se produzca un proceso de sobreexplotación del agua subterránea. Este hecho, como se explica más adelante está produciendo un proceso irreversible: el acuífero en esta zona se comporta como tricapa. El primer nivel, el freático, ya ha sido salinizado desde fines de los años sesenta. El segundo nivel se ha salinizado por intrusión salina asociada a la sobreexplotación y ha perdido su capacidad de ser utilizado para riego. Se ha recurrido al tercer nivel que ya está dando muestras de un aumento de salinidad. Este proceso, que se considera irreversible, impone un alto costo en la actividad agrícola y constituye una severa restricción a la oferta del recurso hídrico. Esto desde el punto de vista económico constituye una externalidad, característica asociada a las condiciones de bien común inherente al agua subterránea. Este componente se incorpora explícitamente en el modelo de predicción de la oferta de agua.

Otro de los problemas zonales de gran relevancia radica en el proceso de abandono de área cultivada que se dio desde mediados de los años ochenta hasta principios del 2000. Esto llevó a que importantes áreas de riego dejaran de producir, generando excedentes de agua superficial que han sufrido distintos destinos en el tiempo. Uno de los más importantes ha sido la aparición de mercados de flujos de agua. Estos nacen por la disponibilidad de volúmenes excedentes de agua producidos por el abandono de muchas fincas, lo que llevó a que las inspecciones de cauce buscaran maneras de reasignar los excedentes. En muchos casos, esto se realizaba de manera informal, de acuerdo a lo que decidieran Inspectores de Cauce y Tomeros. Posteriormente, muchas de estas situaciones han sido formalizadas mediante resoluciones administrativas del Honorable Tribunal Administrativo del DGI (el HTA es el órgano legislativo del agua de la provincia de Mendoza). Lo que se hizo fue formalizar un mercado de agua, se podría llamar un banco de agua. Los excedentes son consignados y se abren planillas para receptar pedidos de aquéllos que requieren volúmenes adicionales de agua. Contrastando los excedentes con las demandas se arbitran mecanismos de reasignación de dichos excedentes. La condición es que los

---

se agrega la lámina de agua que se evapotranspira, el suelo necesariamente se salinizará. Por ello se habla de riego y drenaje, y no solamente de riego. Para controlar la calidad del agua del suelo, es necesario aplicar un excedente de lixiviación.

demandantes paguen el equivalente al canon de riego. Esto funciona bien cuando se da escasez de agua. Cuando el agua sobra, este mecanismo no resulta operativo.

Uno de los problemas asociados al abandono de los cultivos es que las tierras se cubren de manera aleatoria, dejando parcelas sin uso en la cuenca, lo que redundo en ineficiencias en la asignación del agua. Esto está asociado al hecho que los grandes inversores prefieren salir del sistema de riego superficial tradicional, para incursionar nuevas áreas a ser regadas con agua subterránea. Esto es muy notorio en la cuenca centro de Mendoza, el Valle de Uco, lo cual lleva a una expansión agrícola sobre la base del agua subterránea.

Un problema que se presentará de manera creciente son las externalidades temporales por la sobreexplotación del agua subterránea. Cuando se intenta realizar una proyección futura en un escenario en el que aumenta la escasez del agua, es interesante recordar la situación que ocurrió a fines de los años sesenta y principios de los setenta en la región, que de hecho fue el mayor período de sequía del siglo pasado. Para presentar esta situación de manera cuantitativa, se vuelcan los datos en el cuadro 8. En este cuadro se muestran las disponibilidades de agua ocurridas en los períodos 1967-1968 al 1972-1973. La fuente es el Centro Regional de Aguas Subterráneas. En la primera fila aparecen los derrames de agua en  $\text{hm}^3$  del río Mendoza, con una media cercana a los  $1.600 \text{ hm}^3$  por año. Puede apreciarse que de los años 1967-1968 hasta 1971-1972, los módulos han estado muy por debajo de este dígito. Esta deficiencia de agua resultó en una gran dependencia de las extracciones de agua subterránea. Para este período se muestran los  $\text{hm}^3$  producidos por surgencia en este período y la cantidad de agua bombeada. Nótese que la surgencia, proceso natural, se reduce notoriamente durante estos cinco primeros períodos, indicando la considerable reducción del nivel piezométrico ocurrido en la cuenca. En cuanto al riego subterráneo, obsérvese que llegaron en el período 1970-1971 a extraerse más de  $650 \text{ hm}^3$ , los que adicionados a la surgencia natural arrojaban más de  $700 \text{ hm}^3$  de la fuente subterránea.

**Cuadro 8**  
**La cuenca del río Mendoza en la mayor sequía del siglo XX**  
(En  $\text{hm}^3$ )

	1967-1968	1968-1969	1969-1970	1970-1971	1971-1972	1972-1973
Caudal Cacheta anual	1 023,0	803,0	1 327,0	830,0	1 083,0	1 984,0
Caudal Cacheta oct-mar	695,0	546,0	1 001,0	537,0	752,0	1 533,0
(%oct-mar/año)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
Agua Surgente	159,4	103,3	109,2	48,7	42,8	175,1
Agua Subterránea por bombeo	482,1	579,3	341,7	654,0	537,2	236,8
Total subterránea	641,5	682,6	450,9	702,7	580	411,9

Fuente: Elaboración propia a partir de Pazos (1988) y Robles (1991).

Es importante destacar que en este período se dio la acción conjunta de tres fenómenos. El primero, el tremendo déficit hídrico del agua superficial ya mencionado; el segundo, una importante desgravación impositiva que permitía desgravar inversiones en zonas áridas, que alcanzaba a la compra de cultivos (como la vid) como al financiamiento de bombas para la producción del agua subterránea; y finalmente, un período en el cual los precios de la uva resultaron muy favorables debido a la importancia que había cobrado el consumo de vino. Estos tres factores ocasionaron que en el período 1967-1974 se colocaran en la cuenca norte de Mendoza 6.300 bombas, de las 16.000 establecidas a lo largo de toda la historia hasta el presente. Esta sobreexplotación de agua redundó en un descenso del nivel freático considerable, el que ha sido cuantificado no sólo físicamente sino económicamente.

En la aplicación del modelo de predicción que se presenta más adelante, se han incorporado los resultados obtenidos de los estudios de aumento de costos de extracción, o la sobreexplotación del agua y la consecuente reducción del nivel freático. Este aumento de costos es económicamente una externalidad temporal, que implica que todos los regantes van enfrentando mayores costos en la medida que aumenta la sobreexplotación, y se refleja directamente en la exigencia de mayores costos de bombeo.

El cuadro 9 permite evaluar la proporción existente en la cuenca norte entre las hectáreas regadas con agua superficial, aquéllas que hacen un uso conjunto de agua superficial y subterránea y las que usan sólo agua subterránea.

El cuadro 9 presenta para dos períodos distintos las hectáreas cultivadas en el área de influencia del río Mendoza. Estos datos son elaborados sobre la base de información existente en el CRAS. En el año 1996, aproximadamente un cuarto de las hectáreas cultivadas utilizaba exclusivamente agua subterránea, mientras que las hectáreas con derecho de agua superficial o aquéllas que realizaban uso conjunto cubrían las tres cuartas partes adicionales. De las hectáreas con derecho y uso conjunto, aproximadamente el 70% tiene el agua complementada con pozo. Esto significa que la cuenca norte de Mendoza presenta una de las estructuras más avanzadas en términos de uso conjunto; pero desafortunadamente, está estructurada sobre un criterio estrictamente privado del uso del agua subterránea. Esta situación, como se menciona más adelante, es la que genera una externalidad.

**Cuadro 9**  
**Uso conjunto en la cuenca norte de Mendoza**  
(En hectáreas)

Período	1971-1972	1981-1982	1996-1997
Superficie con derecho de riego y uso conjunto		150 000	120 000
Superficie con riego subterráneo exclusivo		60 000	40 000
Total	205 000	210 000	160 000

Fuente: INA CRA.

### 3. Demanda industrial en la cuenca norte de Mendoza

Los usos más conspicuos del agua superficial en la cuenca norte de Mendoza están dados por las siguientes empresas:

- Central Térmica Mendoza (CTM): 305 hm<sup>3</sup> por año. Retorna el 98% de este volumen (no consuntivo).
- Destilería Repsol YPF: utiliza 41 hm<sup>3</sup> por año, con un retorno (uso no consuntivo) del 88% al sistema superficial.
- Zona libre alcoholera: utiliza 6 hm<sup>3</sup> por año, retornando el 80% de tal volumen.

El uso consuntivo efectivo realizado por estos tres grandes usuarios, asciende a 22,9 hm<sup>3</sup>.

Por otro lado, el informe ambiental realizado por el Gobierno Provincia (Secretaría de Ambiente, 2005), establece un uso consuntivo para estas industrias de 12,6 hm<sup>3</sup> por año. Sin embargo, la Universidad Nacional de Cuyo (2004) plantea que el uso industrial asciende a 103 hm<sup>3</sup> por año.

Como puede verse, existe una notoria heterogeneidad entre las fuentes de información, según sean los antecedentes o criterios utilizados en cada caso. Ante esta disyuntiva, se realizó una consulta con operadores del sector hídrico, llegando a la conclusión de que, salvo por problemas de deterioro de calidad, el uso consuntivo de las empresas mencionadas asciende a 12,6 hm<sup>3</sup> por año.

En realidad, el uso más importante lo realiza la industria manufacturera de la provincia, donde es relevante la industria de base agraria. Para hacer una estimación del agua subterránea utilizada por el sector industrial, recordando que ésta es la fuente prácticamente única de abastecimiento del sector, se utilizan los datos del Censo Nacional Económico de 2005 (CNE 2005), que si bien son provisorios, dan información acerca del número y tamaño de los establecimientos.

Para la cuenca norte de Mendoza, considerando los establecimientos de actividad secundaria (esto es, todas las empresas dedicadas a la manufactura) y exceptuando los de Capital y Godoy Cruz que no consumen grandes cantidades de agua, encontramos un total de 2.892 unidades industriales.

Por otro lado, para la misma cuenca encontramos que existen 2.811 empresas de actividad industrial que facturan más de 200.000 pesos al año. Este estrato industrial, si se dedica a una rama de actividad de alto consumo hídrico como es la industria de base agraria, es el que con alta probabilidad cuenta con infraestructura para extraer agua subterránea. Conforme a la información disponible del Censo Económico 2005, en la provincia un 25% de las mencionadas empresas se dedica a la industria de base agraria, o sea que son grandes consumidoras de recurso hídrico. Sobre la base de las 2811 empresas individualizadas en la cuenca, aproximadamente 703 unidades serían altamente usuarias de agua.

Si se supone que cada una de estas empresas cuenta con una sola bomba y que esta bomba extrae la mitad del agua que utiliza una bomba asignada al riego, puede inferirse que el consumo por bomba en estas condiciones es de  $0,15 \text{ hm}^3$  al año (conviene recordar que una bomba media extrae aproximadamente  $0,3 \text{ hm}^3$  por año, con lo que cubre unas 25 a 30 hectáreas con riego superficial medianamente eficiente).

Teniendo en cuenta este consumo para las 703 empresas usuarias intensivas de agua, se concluye, como una grosera aproximación, que el consumo industrial estaría en el orden de los  $105 \text{ hm}^3$  por año. Si a esto le agregamos el uso consuntivo en las industrias mencionadas al inicio de esta sección, llegaremos a un consumo total aproximado a  $118 \text{ hm}^3$  al año, estimado al 2005.

Se sabe que esta estimación no es más que una grosera aproximación de lo que pudiera darse en la realidad. Lo trágico de este punto es que tanto en la provincia de Mendoza como en San Juan, el agua subterránea es muy desatendida. Si bien existen registros apropiados de la existencia y de la ubicación de pozos, particularmente en Mendoza, es notoria la ausencia total de datos acerca del volumen que se extrae. En consecuencia, es mejor establecer este tipo de análisis muy somero, antes de implícitamente asignar un valor nulo al uso industrial de agua subterránea. El Centro Regional Andino (CRAS) y el Centro Regional de Agua Subterránea (CRA) del INA han determinado históricamente el volumen de bombeo como la variable de ajuste para cerrar sus balances hídricos, lo que no permite discriminar por sector de uso.

Cabe destacarse que la demanda por agua para el sector industrial es altamente inelástica, debido a que, de acuerdo con una de las leyes del clásico economista Marshall, al ser muy escasa la participación del costo del agua en los costos totales de la empresa, la demanda es considerablemente inelástica. Esto quiere decir que las empresas extraerán agua subterránea incurriendo en costos muy por encima de los que puede afrontar un productor agrícola.

#### **4. Demanda de agua del sector público y ambiental**

La utilización del agua por parte del sector público es muy importante en Mendoza, ya que es el que, entre otros fines, distribuye el agua para el riego del arbolado público a través de la tradicional figura de las acequias. Si bien muchas de las acequias ya han perdido esta finalidad, quedando solamente como un componente del sistema de drenaje urbano de agua, y eventualmente de disposición de residuos sólidos, el agua sigue siendo asignada a los distintos municipios por el Departamento General de Irrigación. Es difícil llegar a conocer la cantidad de agua asignada con estos fines a la cuenca norte de Mendoza.

Con el fin de establecer una aproximación a la demanda por uso municipal (público) del agua, se apeló a las concesiones otorgadas a través de las distintas hijuelas que componen la Cuenca Norte de Mendoza. De ellas, identificando las que conducen el agua hacia los centros urbanos o asentamientos poblacionales, y observando las asignaciones realizadas con el fin de riego forestal, se aproximaron algunas hectáreas para el arbolado público. Cabe recordarse que las concesiones de agua en Mendoza se realizan en agua por hectárea.

Considerando básicamente las hijuelas como Jarillal, Canal Oeste, Tajamar, y otras, se puede llegar a estimar la existencia de 1.093 hectáreas con forestales, la mayoría de las mismas conforman el arbolado público.

Suponiendo una utilización del agua correspondiente a  $10.000 \text{ m}^3/\text{ha/año}$  para el arbolado público y sobre los criterios arriba mencionados, se infiere la existencia de un consumo de  $93 \text{ hm}^3$  para el área del río Mendoza,  $7 \text{ hm}^3$  para el río Tunuyán Inferior, y  $5 \text{ hm}^3$  asignados a los distintos municipios para sus centros poblacionales. Esto conforma un total de  $22,9 \text{ hm}^3$  asignados a este fin.

A lo mencionado deberían incorporarse otros usos ambientales, dentro de los cuales entran el riego de calles no pavimentadas por parte de los municipios, la utilización de agua en piscinas para clubes y viviendas localizadas en la zona rural, que han mostrado un crecimiento destacado en los últimos años, y otros usos de tipo recreativo no consignados en el conjunto de las concesiones realizadas por el DGI. Es notorio ver la expansión de áreas verdes o arboladas en el piedemonte y los valles intermontanos de la provincia.

A fin de considerar un consumo razonable para este creciente sector, se consideró a los fines de la modelación un consumo anual de 40 hm<sup>3</sup> asignados al sector público y ambiental.

En realidad, en una cuenca razonablemente manejada, se debería hablar de la existencia de un caudal ecológico, entendiéndolo por tal aquél que permite el mantenimiento de los sistemas ecológicos aguas abajo. Este concepto nunca ha sido tenido en cuenta en las gestiones del agua en Mendoza y San Juan. Es más, las autoridades hídricas se sienten muy poco motivadas a incorporar la idea de un uso ambiental del agua, pues suponen que los regantes reaccionarían en contra de este presunto nuevo competidor en el escenario de los actores hídricos.

## **D. Cuenca centro de Mendoza - el Valle de Uco**

### **1. Agua potable**

La información relativa a los usos del agua potable en el Valle de Uco es muy escasa, tal vez por presentar una interesante particularidad: en el área donde están radicados los centros urbanos, particularmente Tunuyán, el agua subterránea, además de ser de excelente calidad, es artesiana. Esto ha llevado a que la provisión de agua potable sea eficientemente provista por uniones vecinales y otras unidades independientes dispersas en el asentamiento poblacional. Por esta razón, la empresa de agua potable de Tunuyán sirve apenas a un 20% de la población. Es un ejemplo muy interesante de la situación en que la oferta de agua es segmentable.

Para hacer simple el nivel de análisis conducente a la estimación de la cantidad de agua utilizada para abastecimiento humano, se supone que toda la población de la cuenca tiene acceso al agua y que el nivel de consumo es igual al de la cuenca norte, de 597,1 l/h/d. Esto se justifica por el hecho de que en esta cuenca el acceso al agua potable, una vez realizado un pozo, presenta un costo marginal de provisión cercano o igual a cero.

Con la finalidad de establecer las condiciones iniciales de las proyecciones de consumo, se consideró directamente que el consumo total es el producto entre el consumo per cápita y el número de habitantes. Esto arroja un consumo inicial de 21,51 hm<sup>3</sup>/año. Para establecer la proyección de la población en el futuro, se adoptó el mismo criterio que el utilizado para la cuenca norte de Mendoza: un promedio entre las proyecciones lineal, potencial y logística. En el escenario base se mantiene el supuesto de un consumo per cápita constante. La información censal base corresponde a los años 1991 con 82.232 habitantes, 2001 con 98.720 y en 2010 con 116.137 habitantes.

### **2. El sector riego**

Como en el resto de las cuencas cuyanas, el riego es el sector que presenta el mayor uso consuntivo del agua. Desafortunadamente, el DGI presenta la información relativa al área regada de varias fuentes, y con datos que contradicen a los del Censo Nacional Agropecuario del año 2002. Además, el DGI nunca logró integrar los balances de agua superficial con los de aguas subterráneas, a pesar de haber contado con el apoyo de muy buenos especialistas: la negación de la importancia del agua subterránea es un viejo componente de la cultura de este organismo. El grueso de la información de esta sección se basó en los datos del Censo Nacional Agropecuario (INDEC, 2002), del Instituto Nacional del Agua (INA) y el trabajo de compilación realizado por el grupo FAO-DGI, organizado por el Departamento General de Irrigación.

Con relación a la superficie plantada con los distintos cultivos, resulta difícil contar con series de tiempo, salvo para el caso de la viticultura. La principal fuente de información del sector vitícola es el Instituto Nacional de Vitivinicultura, el cual ha realizado censos periódicos y actualizaciones anuales y

permanentes de la superficie cultivada. En el cuadro 10 se presentan los resultados del CNA 2002, complementado con datos de la DEIE (2000, 2001, 2002, 2003 y 2004) y el INV. (2001).

Con la información descrita se conoce cuál es la célula de los cultivos de la cuenca. Complementando esta información con los datos de evapotranspiración (ET) del INTA y el grupo FAO-DGI, se puede llegar a estimar la media ponderada de la ET para la cuenca, es de 9.799 m<sup>3</sup>/ha/año.

**Cuadro 10**  
**Superficie cultivada por tipo de cultivo en el Valle de Uco**  
(En hectáreas)

Cultivo	Superficie cultivada
Cereales para grano	1 238,5
Semilla	429,5
Legumbres	397,2
Forraje anual	941,1
Forraje perenne	1 181,5
Hortalizas	10 158,8
Flores	2,2
Aromáticas	626,2
Vid	13 024,4
Otros Frutales	15 621,9
Bosques	5 348,1
Viveros	113,3
<b>Total</b>	<b>49 083,6</b>

Fuente: INDEC (2002), "Censo Nacional Agropecuario 2002" y (2000, 2001, 2002, 2003 y 2004) "Anuarios".

La eficiencia de la asignación del agua en el sector riego, según el Plan Director del río Tunuyán (tramo superior) muestra a una eficiencia de aplicación de 58% y una eficiencia externa de 71% (FAO-DGI 2004a). Para utilizar esta información en la modelación, se realizaron varios ajustes. En primer lugar, el dato de eficiencia de aplicación fue ajustado a fin de incorporar los requerimientos de lixiviación para la eliminación de las sales acumuladas en el perfil del suelo, valor no considerado en mediciones realizadas<sup>11</sup>. En segundo lugar, debe reconocerse que la eficiencia de riego con agua subterránea es considerablemente superior a aquella del agua superficial, precisamente por la inexistencia de las ineficiencias de conducción externas. Para llegar a un valor promedio para la cuenca, se procedió a estimarlo ponderando la eficiencia de riego con agua subterránea y superficial por las hectáreas respectivas. Considerando la eficiencia de riego del agua subterránea en 80%, se llega a una eficiencia global del 69%, dato que se utiliza en el escenario base. Debe recordarse que ésta es una de las variables sobre la que se efectúan análisis de sensibilidad.

La caracterización del sistema hídrico es de gran importancia en esta cuenca, muy pródiga en calidad y disponibilidad de agua subterránea. A continuación, se presentan los distintos balances reportados para la cuenca, uno para el sistema superficial y otro para el sistema subterráneo, que deben ser compatibilizados.

Atendiendo la expresión superficial del recurso, el aforo del río Tunuyán en la Estación Valle de Uco asciende a 28,6 m<sup>3</sup>/s, o sus equivalentes 901,93 hm<sup>3</sup>/año para el período 1954-2004. Existe el arreglo institucional que solo el 17% de este volumen puede ser asignado a la cuenca del Tunuyán Superior, mientras que el resto debe asignarse al Tunuyán Inferior, dejándolo pasar aguas abajo. Además de esta alícuota, la cuenca superior cuenta con numerosos arroyos y vertientes que le son

<sup>11</sup> El documento postula que "La eficiencia de aplicación en una unidad de riego se la define como la relación entre el volumen de agua retenido en la zona radicular del cultivo y el volumen suministrado a la unidad de riego en su toma", lo que claramente excluye el necesario requerimiento de lixiviación, cuya valoración empírica lo ubica en un 30% del volumen de agua aplicada.

propios. Estos suman 547,97 hm<sup>3</sup>/año, dato que incluye el 17% de la alicuota que le corresponde a la cuenca de los aportes del río Tunuyán (FAO-DGI, 2004).

El problema de la salinización del agua subterránea tiene relevancia más potencial que real en la cuenca. No obstante, existe la certidumbre de que cuando se inicien los procesos de sobreexplotación aparecerán los mismos problemas a los que se ha hecho referencia en el caso de la cuenca norte de Mendoza. Antes de que se manifiesten los problemas de salinización, aparecerán aquellos asociados a la sobreexplotación volumétrica, que se traducirán en el aumento de los costos de extracción del agua subterránea. A los fines de la modelación, se utilizarán los mismos coeficientes obtenidos para la zona norte de Mendoza. Con posterioridad, se manifestarán los problemas de salinización, esto es las externalidades temporales por la sobreexplotación del agua subterránea; pero, con un importante grado de atenuación relativo con respecto al caso de la cuenca norte de Mendoza, ya que en esta cuenca dominan claramente los desplazamientos horizontales del agua subterránea, y la recarga vertical en la zona de uso es decididamente menor.

### **3. Uso industrial**

El agua superficial con fines industriales, literalmente, no se utiliza en esta cuenca, salvo el uso que se da a los canales como sistema de disposición de efluentes. Tampoco existen mediciones ni estimaciones acerca del volumen involucrado. Lo mismo ocurre con el uso público, caso en el que la información existente es sólo una parcialidad del uso total. Para aproximar estos usos, se desarrolló un índice de tamaño relativo de la cuenca norte de Mendoza para utilizarlo como coeficiente que dimensione al sector, en el que se incluye población, área cultivada, tamaño económico y cantidad de perforaciones. Este coeficiente es cercano a 0,2, lo que lleva a que los usos iniciales de los sectores industrial y público asciendan a 23,52 hm<sup>3</sup> y 7,91 hm<sup>3</sup>, respectivamente.

Al igual que en el modelo utilizado en el caso de la cuenca norte de Mendoza, el modelo funciona trazando la curva de oferta de agua de largo plazo. La causalidad supuesta es que primero se accede a las reservas de agua superficial; cuando ésta se agota, las demandas adicionales son satisfechas mediante el uso de agua subterránea, fuente que a la larga resulta de costo creciente por mayores costos causados por sobreexplotación en cantidad y por la salinización que este proceso induce. Las curvas de oferta simplemente informan acerca del costo de oportunidad del agua en el tiempo.

### **4. El modelo utilizado**

Para realizar el análisis correspondiente a la incidencia futura de distintos eventos como el cambio climático, asociado a distintos cursos de acción que se formulen, se desarrolló un modelo de simulación muy similar al presentado para la cuenca norte de Mendoza, con todas las ventajas y limitaciones que ello impone. Lo importante es contar con un modelo de simulación en el que se pueden incorporar de manera sencilla todos los escenarios concebibles y realizar todas las pruebas de sensibilidad que se consideren necesarias. Como en el caso de la cuenca norte, el modelo incorpora todos los componentes descriptos precedentemente. Trabaja según valores anuales y a lo largo de un horizonte hasta el año 2100. Los valores iniciales y los coeficientes técnicos ya han sido descritos en el desarrollo de los distintos componentes del modelo. El cuadro 16 de salida para las distintas corridas seleccionadas para todas las cuencas bajo estudio, contiene las definiciones y criterios expuestos en la descripción del modelo.

## E. Cuenca sur de Mendoza - ríos Diamante y Atuel

El enfoque metodológico para analizar esta cuenca es el mismo que el adoptado para el conjunto de las aquí tratadas. En consecuencia, se procede de manera equivalente.

No obstante, antes de iniciar el análisis, es importante considerar que la cuenca sur ha sido históricamente una cuenca con excesos de agua, pero con importantes condiciones que tienden a limitar su desarrollo económico. Entre estas condiciones se pueden mencionar: a) se encuentra en un ámbito geográfico y ecológico en el cual resultan críticos los accidentes climáticos tales como heladas, granizo, corto período libre de heladas, etc, b) limitaciones en la calidad del agua subterránea, que presenta niveles de salinidad natural por encima de los 2000 micro siemens; c) los departamentos del sur exhiben claros síntomas de degradación de los recursos naturales, tal es el caso relacionado con la realización de las grandes presas sobre los ríos Diamante y Atuel y los impactos en las aguas claras que redundan en pérdida de la fertilidad, revenimiento y salinización de suelos; d) los suelos tienen un elevado nivel de salinidad natural que, vía drenaje y desplazamientos de la freática, afecta aguas abajo; ésta es la principal razón de la construcción del Canal Marginal del Atuel: impedir la salinización del agua en el lecho del río por los aportes de los niveles freáticos.

Aparte de los problemas mencionados, relativos a las actividades bajo riego, esta cuenca se ha constituido en aquélla que presenta los mejores atractivos turísticos.

### 1. Agua potable

Como en el resto de los casos, la información relativa a los usos del agua potable en esta cuenca es muy escasa. Esto es así en parte porque el DGI sólo se ocupa del agua superficial para riego, y en lo que hace a otros usos, salvo la información contenida en los registros de concesión, no tiene nada más. Nunca pudo superar su cultura de organismo de riego con agua superficial.

Se supone, como declara la empresa de agua potable, que toda la población de la cuenca tiene acceso al agua y que el nivel de consumo es igual al de la cuenca norte, de 597,1 l/h/d. Este consumo presumiblemente crecerá en el tiempo según el crecimiento poblacional, que en este caso es decididamente bajo, alcanzando 229.419 habitantes en el año 2010.

Considerando que el consumo total es el producto entre el consumo per cápita y el número de habitantes, el consumo inicial es el orden de los 47 hm<sup>3</sup>/año. Para la proyección de la población, se adoptó el mismo criterio antes utilizado de calcular un promedio entre las proyecciones lineal, potencial y logística.

### 2. El sector riego

Se trabajó sobre la base de los datos del Censo Nacional Agropecuario del año 2002. Según esta fuente, el área cultivada con las distintas especies se presenta en el cuadro 11. Como en los resultados de este censo no se discrimina la vid dentro de los frutales, esta información se tomó de la los datos de la DEIE 2000-2006) y el INV (2005).

La información describe la célula de los cultivos de la cuenca. Complementando esta información de la misma manera como que se hizo en los otros casos (datos de evapotranspiración del INTA y el grupo FAO-DGI), se puede llegar a estimar la media ponderada de la ET para la cuenca, que alcanza a 10.590 m<sup>3</sup>/ha/año.

La eficiencia de la asignación del agua en el sector riego es una incógnita de vieja data, de la que sólo se sabe que es muy baja. Dicen los Planes Directores de las cuencas de los ríos Diamante y Atuel, elaborados por el equipo FAO-DGI (2004b y c), que: “La eficiencia global del uso del agua es muy baja, incluidas las eficiencias de conducción, distribución y aplicación. El método predominante de riego predial, es el método tradicional por gravedad; en surcos para la vid, frutales, hortalizas y forestales; por medio de melgas o manto en pasturas y forrajés. La actual eficiencia global es de 32% en el sistema de riego Diamante y 28% en el sistema de riego Atuel”. Más adelante postula que: “Si consideráramos la eficiencia global de todo el sistema (Corte Suprema de Justicia de la Nación, 1984) en la cual la eficiencia de conducción es del 70%, la eficiencia de distribución del 80% y la de aplicación del 50% dando un resultado final de eficiencia global del 28%. En suma, podemos decir que

del agua ingresada al sistema del río Atuel es sólo aprovechada un 28%, perdiéndose por diferentes motivos (filtración, evaporación, desborde de canales, compuertas y obras en mal estado, roturas, mala operación, percolación profunda, escurrimiento superficial, etc.) el 72%". La ausencia de estos coeficientes críticos son limitaciones al conocimiento.

Pueden aceptarse niveles de eficiencia por debajo del 30%; pero esto normalmente ocurre con el agua superficial (nunca con el agua subterránea, que tiene un costo volumétrico que es la tarifa eléctrica). No obstante, en la áreas cercanas a las fuentes de agua y en aquellas fincas medianamente tecnificadas, las eficiencias son superiores, superando con holgura el 50%. Es más, en general, las ineficiencias son inducidas por el mismo sistema de gestión: cuando hay agua, los regantes piden siempre más puesto que el costo marginal del agua para ellos es cero, y lo hacen aún cuando puedan generar las conocidas externalidades por revenimiento y salinización. Los administradores, para minimizar conflictos, entregan el agua. En años hidrológicamente ricos, esto es lo común. Consecuentes con lo planteado, utilizamos los datos de eficiencia mencionados.

**Cuadro 11**  
**Superficie cultivada por tipo de cultivo en la cuenca sur**  
(En hectáreas)

Cultivo	Superficie
Cereales para grano	634,4
Semilla	1 461,7
Legumbres	1,6
Forraje anual	1 883,5
Forraje perenne	11 708,6
Hortalizas	2 778,8
Flores	17,6
Aromáticas	124,7
Vid	21 919,6
Otros frutales	26 356,1
Bosques	3 185,9
Viveros	158,7
<b>Total</b>	<b>70 231,2</b>

Fuente: Fuente: INDEC (2002), "Censo Nacional Agropecuario 2002" y DEIE (2000, 2001, 2002, 2003y 2004) "Anuarios".

En síntesis, para las corridas básicas del modelo se utilizaran eficiencias del orden del 45%.

La caracterización del sistema hídrico muestra a la cuenca sur, alimentada por los ríos Diamante y Atuel, con una importante cantidad de tierras regables ociosas. El cuadro 12, que se basa en el Censo de 1988, presenta las hectáreas regadas según el origen del agua, donde puede notarse la escasa gravitación del agua subterránea, lo que se explica por el exceso de agua superficial. Según el Censo de 2002, en la actualidad se riega algo más de 70.200 hectáreas (INDEC, 2002). En este contexto, la provincia se encuentra gestionando un trasvase de aguas del río Colorado al Atuel, lo que implica las dificultades que tendrán aquéllos que intenten demostrar la conveniencia económica del proyecto. En la cuenca existen 2.331 pozos construidos a lo largo del tiempo, de los cuales menos del 40% se encuentran en uso.

Por otro lado, se cuenta con el balance de agua subterránea para la unidad hidrogeológica de los ríos Diamante y Atuel, en el que se da la existencia de un importante exceso de agua subterránea, parte importante de la cual reingresa sub-superficialmente al mismo lecho del río Diamante, y parte también se traslada hacia el Atuel, colaborando en el proceso de salinización del mismo.

**Cuadro 12**  
**Superficie cultivada según fuente de agua utilizada en la cuenca sur**  
*(En hectáreas)*

Fuente de agua	Atuel	Diamante	Cuenca
Riego superficial	31 162	34 312	65 474
Riego subterráneo	327	1 629	1 956
Riego mixto	7 220	4 203	11 423
Total	38 709	40 144	78 853

Fuente: INDEC (1988), "Censo Nacional Agropecuario 1988 y actualizaciones".

Para proyectar la oferta de agua en el tiempo, resulta necesario establecer claramente cuáles son las restricciones existentes a la asignación del agua, y cuales los posibles cambios en los escenarios futuros. Cabe considerarse lo siguiente:

- Existe el compromiso que el agua del Atuel debe ser compartida entre Mendoza y La Pampa. Suponemos en la corrida básica del modelo que este compromiso se satisface dejando pasar el agua históricamente registrada en la Estación Carmensa.
- Existe el riesgo que Mendoza se deba comprometer a derivar mayores volúmenes a La Pampa, acción que debería venir acompañada por aumentos de eficiencia en el uso del agua en la cuenca.
- Se está gestando un trasvase de aguas del río Grande, afluente del Colorado, al río Atuel. Esta iniciativa, impulsada por los gobiernos Federal y de ambas provincias involucradas, brindaría un escenario de excedentes hídricos por un largo plazo, lo que en principio le conferiría a la cuenca una muy baja vulnerabilidad a la reducción de los derrames superficiales.

En principio, se parte del supuesto que la cuenca puede hacer uso de los excedentes del río Diamante que se manifiestan en Montecomán. Esta es una holgura a la que conceptualmente se puede apelar si generar conflictos.

El problema de la salinización del agua subterránea tiene en principio un origen natural, ya que uno de los afluentes al Diamante de la cuenca alta es un cauce con altos contenidos de sales. Esto, más las actividades bajo riego y el problema de las aguas claras asociado a las presas hidroeléctricas, ha determinado que la gran masa de agua subterránea contenga un tenor salino relativamente alto.

Los problemas de externalidades temporales por la sobreexplotación del agua subterránea en esta cuenca lucen remotos, vistos los grandes excedentes de aguas subterráneas que existirán por un buen tiempo.

### **3. Uso industrial, público y ambiental en la cuenca sur**

Si bien se sospecha que el agua superficial con fines industriales se usa muy poco en esta cuenca, como en la generalidad de los casos, no hay mediciones. Lo mismo ocurre con el uso público, caso en el que la información existente es sólo una parcialidad del uso total. Para aproximar el uso industrial, se desarrolló un índice de tamaño relativo con relación al de la cuenca norte de Mendoza, que fue utilizado como coeficiente para dimensionar al sector en el que se incluye población, área cultivada, industria usuaria de agua y tamaño económico. Este coeficiente es del orden de 0,25. Aplicándolo para uso industrial y público, se obtienen 29,40 hm<sup>3</sup> y 9,89 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Debe recordarse que también se observa el uso de canales como sistema de disposición de efluentes.

Al igual que en el modelo utilizado en el caso de la cuenca norte de Mendoza, el modelo funciona trazando la curva de oferta de agua de largo plazo. La causalidad supuesta es que primero se accede a las reservas de agua superficial; una vez agotadas, las demandas adicionales son satisfechas mediante el uso de agua subterránea, fuente que a la larga resulta de costo creciente por mayores costos causados por sobreexplotación en cantidad y por la salinización que este proceso induce. En esta cuenca también se observan grandes excedentes de agua subterránea. Las curvas de oferta simplemente informan acerca del costo de oportunidad del agua en el tiempo.

## 4. El modelo utilizado y los resultados bajo escenarios alternativos

Para realizar el análisis correspondiente a la incidencia futura de distintos eventos como el cambio climático, asociado a distintos cursos de acción que se formulen, se utilizó un modelo de simulación similar a los anteriormente presentados. Por ello pasamos directamente a analizar los resultados de las principales corridas del modelo, apuntando a los escenarios que incorporen específicamente la incidencia del cambio climático en los derrames de los ríos que alimentan la cuenca. El cuadro 16 expone los resultados obtenidos.

### F. Cuenca del río San Juan

A manera de introducción, la provincia de San Juan tiene una superficie de 89.651 km<sup>2</sup>, está inmersa en un clima desértico con precipitaciones por debajo de los 200 mm, y donde sólo el 2,36% conforma los "oasis" irrigados. El principal recurso hídrico de la provincia es el río San Juan, que riega los valles del Tulum y Ullum-Zonda. Los restantes valles son los de Calingasta, Jáchal, Iglesia y Valle Fértil. En el Valle del Tulum, que tiene como centro poblacional a la Ciudad Capital, se concentran las tres cuartas partes de las tierras incorporadas a la producción, que se destinan al cultivo de vid, hortalizas, frutales y olivo en valles irrigados.

La provincia se ha ido especializando en la agricultura, con una superficie implantada del orden de las 80.000 hectáreas de acuerdo al Censo Nacional Agropecuario del 2002. A lo largo del último cuarto del siglo pasado se observó una disminución en la superficie implantada, alcanzó a un tercio en el territorio nacional y a un 25% en San Juan. En la década de los años setenta, previa a la iniciación de la larga crisis vitivinícola, en San Juan había unas 60.000 hectáreas de viñedos. Hacia principios de los años noventa esta superficie se redujo a unas 46.000 hectáreas. En el 2000 cuenta con 45.285 hectáreas.

De acuerdo a información del Instituto Nacional de Vitivinicultura (2002), se estima que desde 1994 al 2000 se han cultivado en el orden de 17.000 a 18.000 hectáreas nuevas en San Juan, asociadas a los diferimientos impositivos, muchas de las cuales provienen de grandes capitales nacionales y externos. La distribución de la mencionada expansión es de unas 10.000 hectáreas de olivo, 4.000 hectáreas de vid, y 3.000 hectáreas de otros cultivos. Para el período 1994-2000, el área total cultivada con vid ha pasado de unas 46.000 a 48.000 hectáreas. Ante un crecimiento de los viñedos nuevos en 4.000 hectáreas, esto significa que en los viñedos tradicionales la contracción continuó durante este período.

La provincia de San Juan produce la mayoría de las uvas para consumo en fresco y pasas del total del país. En mostos, produce alrededor del 33% y en vinos el 17%, destinándose la mayoría a vinos comunes de baja calidad. De las nuevas hectáreas de vid, el 80% es para uva de mesa, compuesta básicamente por Red Globe y Superior. Es clara la especialización de San Juan en uvas de mesa.

En esta provincia subsisten plantaciones de vides comunes de elevada edad que, caracterizada por una alta proporción de minifundistas, configuran una situación problemática. Contrastando con esto, se ha dado también el incremento de cultivos con cepas de uvas de calidad, y una inserción de la provincia en los mercados externos. En el reciente pasado se han implantado unas 6.000 hectáreas con uvas para vinos finos por el régimen de diferimientos impositivos, equivalentes al 17% de la superficie actual de uvas para vinificar, que ya han entrado en producción.

En lo referente a los recursos hídricos y el riego, casi todas las 18.000 hectáreas de nuevos cultivos se encuentran fuera del sistema tradicional de riego con aguas superficiales, localizándose en áreas de tierras de escaso valor original, y dependiendo del agua subterránea de manera exclusiva. Son emprendimientos muy tecnificados que involucran una utilización del agua con alta eficiencia.

El sistema de riego tradicional, que entró en funcionamiento en 1975, estaba compuesto por el dique Ullum, el conjunto de canales principales y secundarios impermeabilizados (en el orden de los 600 km), y una batería de pozos para complementar épocas de déficit hídrico.

Como consecuencia de la incursión en nuevas tierras, un 40% de las hectáreas del área regable bajo la influencia del sistema superficial de riego se ha dejado de cultivar en este lugar; el interés se ha

centrado en las nuevas zonas, teniendo en la mayoría de los casos la posibilidad de transferir agua concesionada a esas áreas. Esto deja la imagen de fincas que sólo riegan una pequeña porción de su superficie. La tradicional área regada con agua superficial luce entonces como un sistema “pecoso” o con “lunares” cultivados.

Esto significa que el área de riego superficial tradicional tiene capacidad ociosa, pero con la presencia de tierras degradadas por revenimiento y salinización. No se observan nuevos cultivos en esta área.

El agua subterránea de los acuíferos estudiados (cono de deyección del río San Juan), en principio, presenta muy buenas características: está contenida en estratos aluviales de gran espesor y rendimiento específico, presentando en general buenos rendimientos y calidad. Este sistema presenta muchas e importantes fallas geológicas que dificultan su modelación.

En estos acuíferos no existen estudios de calidad ajustados al sistema multicapa que los caracteriza, por lo que no pueden hacerse diagnósticos ni proyecciones acerca de procesos de salinización. No obstante, existen casos que muestran la existencia del fenómeno.

El 70% de las nuevas inversiones en agua subterránea se encuentran en el sureste del Valle del Tulum, en el departamento de 25 de Mayo, la zona de mayor expansión. En este lugar se da la existencia de acuíferos de excelente calidad, todavía no bien estudiados. De todas las nuevas inversiones, el 90% cuenta con riego presurizado.

El enfoque metodológico para analizar esta cuenca es el mismo que el adoptado para el conjunto de las aquí tratadas. En consecuencia, se procede de manera equivalente.

## **1. Agua potable**

El contexto institucional del agua potable y saneamiento en San Juan es distinto al de Mendoza. La empresa prestadora de servicios, Obras Sanitarias Sociedad del Estado (OSSE) nunca se privatizó, manteniendo su forma jurídica. De acuerdo a la información del ente Nacional de Obras Hidráulicas, la cobertura de la demanda en los centros urbanos es cercana al 100%, y el volumen de agua producida por persona asciende 488,7 litros por habitante y por día. Al igual que en casos anteriores, se parte de la base de los datos de población provistos por los respectivos censos nacionales.

Los datos de población de los años 2001 y 1991 para la cuenca son 498.764 y 581.225 habitantes, respectivamente. Considerando que el consumo total es el producto entre el consumo per cápita y el número de habitantes, se puede estimar el consumo inicial en el orden de los 103,68 hm<sup>3</sup>/año. Para la proyección de la población, se adoptó el mismo criterio antes utilizado de calcular un promedio entre las proyecciones lineal, potencial y logística.

## **2. El sector riego**

En la introducción a esta sección se hizo mención al sector riego. Como en el caso de las otras cuencas, se trabajó sobre la base de los datos del Censo Nacional Agropecuario del año 2002. Según esta fuente, el área cultivada con las distintas especies se presenta en el cuadro 13. Asimismo, la superficie de vid dentro de los frutales se tomó del INV (2002).

La información expuesta describe la célula de los cultivos de la cuenca. Complementando esta información de la misma manera con que se hizo en los otros casos (datos de evapotranspiración del grupo FAO-DGI), se puede llegar a estimar la media ponderada de la ET para la cuenca que asciende a 10.087 m<sup>3</sup>/ha/año.

La eficiencia de la asignación del agua para riego en San Juan tampoco es una variable muy estudiada, de manera tal que debemos aproximar un valor razonable en función de las características del sistema de distribución del agua y de la naturaleza del riego. En primer lugar, es importante destacar que el sistema de riego superficial de San Juan tiene la totalidad de los canales primarios y secundarios impermeabilizados, y los terciarios en una alta proporción. Esto indica que si bien el sistema ostenta otras ineficiencias operativas, tales como la formación de lamas (algas filamentosas) producto de las aguas claras, las pérdidas en conducción deben resultar bajas. En adición a esto, el grueso de los nuevos desarrollos se ha orientado al uso de sistemas de riego presurizados, que de por sí están dotados de una

alta eficiencia de uso. De acuerdo con información provista por técnicos del INTA, la eficiencia de distribución media debe estar en el orden del 70%, y la eficiencia de aplicación considerando ambas fuentes, superficial y subterránea, en el orden del 52%, lo que lleva a una eficiencia global del 39%. No obstante, es importante recordar que en la eficiencia de aplicación no se consideran los requerimientos de lixiviación que, si bien desde un punto de vista cuantitativo significan una pérdida, son un elemento fundamental para el mantenimiento de la productividad de los suelos. Ajustando el dato de eficiencia por incorporar la necesaria fracción de lixiviación recomendada, que es del orden del 30%, la eficiencia final aproximada es de 55,7%.

**Cuadro 13**  
**Superficie cultivada por tipo de cultivo en la cuenca río San Juan**  
(En hectáreas)

San Juan	Toda de la provincia	Cuenca río San Juan
Cereales para grano	584	288
Cultivos para semillas	1039	676
Legumbres	112	28
Forrajes anuales	547	138
Forrajes perennes	3 623	2 210
Hortalizas	7 633	6 544
Flores de corte	8	8
Aromáticas	288	144
Vid	46 921	46 452
Otros frutales	15 102	13 493
Bosques y montes	4 217	3 609
Viveros	77	74
<b>Total</b>	<b>80 152</b>	<b>73 663</b>

Fuente: INDEC (2002), "Censo Nacional Agropecuario 2002" e INV (2001).

La caracterización del sistema hídrico es muy semejante al resto de las cuencas analizadas, caracterizadas por un sistema aluvial compuesto por un cauce superficial y un importante sistema hidrogeológico asociado.

En el año 1982 existían 7.711 pozos instalados por el proceso de desarrollo del sector agrícola. De estos, unos 4.850 se instalaron en el período de mayor sequía del siglo pasado, entre 1968 y 1972. Según los registros de la Dirección de Hidráulica, en 1994 quedaban en uso 3.696 pozos. De la totalidad de los pozos, a semejanza de la cuenca norte de Mendoza, un 63% se utilizaban como complemento del agua subterránea, un 32% se asignaban al riego exclusivo, y el 5% eran pozos surgentes.

**Cuadro 14**  
**Aforos de derrame del río San Juan**

Estación de aforo	(m <sup>3</sup> /seg)	(hm <sup>3</sup> /año)
Dique Ignacio de la Rosa	59,42	1 874
Km 47,3	65,23	2 057
Km 101	56,41	1 779
El Encón	20,37	642

Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos y EVARSA (2004), "Estadística Hidrológica", 2004.

Nótese en el cuadro 14 que de los 1.874 hm<sup>3</sup> que pasan por el Dique Ignacio de la Rosa, aproximadamente un tercio sale de la cuenca por El Encón. Claramente, este volumen está en promedio disponible para su uso en la cuenca del río San Juan. Este dato es crítico en la modelación, ya que las eventuales reducciones en el derrame serán extraídas de estos excedentes antes de recurrir a la expansión de las extracciones del agua subterránea.

El problema de la salinización del agua subterránea presenta las mismas características que el caso de la cuenca norte de Mendoza, ya que se han identificado áreas críticas donde se está dando este fenómeno. Así mismo, el desarrollo de la explotación del agua subterránea producido en el reciente pasado está determinando un descenso del acuífero, lo que se agrava en años hidrológicamente pobres. Eso implica que el funcionamiento del mecanismo de sobreexplotación latente que genera las externalidades temporales por la sobreexplotación del agua subterránea, se pone en marcha particularmente en períodos de bajos derrames. La aparición de estos fenómenos es previsible cuando las disponibilidades del recurso son superadas por la demanda, lo que induce a la extracción del recurso subterráneo.

### **3. Uso industrial público y ambiental en la cuenca del río San Juan**

El perfil industrial de la Provincia de San Juan es muy semejante al de Mendoza. Para estimar el uso de la industria manufacturera se realizó un análisis equivalente al caso de Mendoza, pero San Juan cuenta con otro importante uso, que es la minería. Desafortunadamente, no se la logrado ubicar un estudio serio acerca de la estimación de la cantidad de agua que esta industria utiliza. Por el contrario, se cuenta con partes interesadas que aventuran cifras sin mayor sustento técnico, que no garantizan veracidad. Por un lado, se encuentran informes producidos por las empresas, y otros avanzados por ONG's. Ante esta incertidumbre, se adoptó la posición pesimista de utilizar el valor más alto<sup>12</sup>, que es de 4.000 l/s, lo cual a su vez involucra un consumo de 126 hm<sup>3</sup>/año. Como este consumo incorpora las actividades mineras que aún están en proyecto, se supuso que el uso minero del agua escala en el tiempo desde los 42 hm<sup>3</sup>/año actuales al nivel de los 126 hm<sup>3</sup>/año en el 2016.

El uso público del agua es aproximado según el tamaño relativo entre la cuenca de San Juan y la del norte de Mendoza, para la cual se ha podido establecer una cuantificación indirecta. Es así como los usos industrial y público se han establecido en 42,05 hm<sup>3</sup>/año y 19,78 hm<sup>3</sup>/año, respectivamente.

### **4. El modelo utilizado y los resultados bajo escenarios alternativos**

El modelo funciona trazando la curva de oferta de agua de largo plazo. La causalidad supuesta es que primero se accede a las reservas de agua superficial, y una vez agotadas, las demandas adicionales son satisfechas mediante el uso de agua subterránea, fuente que a la larga resulta de costo creciente por mayores costos causados por sobreexplotación en cantidad y por la salinización que este proceso induce. En esta cuenca también se observan grandes excedentes de agua subterránea.

#### **a) Los principales escenarios escogidos**

Por el lado de la demanda, se adoptaron los siguientes criterios en la conformación de las corridas:

- Crecimiento de la población. Se usan dos trayectorias alternativas:
  - La recomendada por la CEPAL-CELADE (Población América Latina 1950-2100).
  - Logística.
- Todos los usos sectoriales constantes en el horizonte 2010-2100 excepto la asignación al agua potable, que aumenta con la población.

<sup>12</sup> Debe reconocerse que el problema de la industria minera está prioritariamente relacionado con la calidad. En este trabajo, salvo las externalidades por salinización, no se trata la problemática ambiental.

- Supone que el sector agua potable desarrolla un programa de micromedición, que reduce el consumo medio per cápita en un 25% aplicado linealmente entre 2010 y 2020. El consumo per cápita se mantiene en este nivel desde el 2100.

Con el fin de analizar la vulnerabilidad de las distintas cuencas, se realizaron algunas corridas adicionales específicas:

- Para el caso de la cuenca norte, en adición a las alternativas anteriores, se utilizó la reducción de las ineficiencias de riego en un 10%, implementada linealmente entre 2020 y 2040.
- Para los casos de las cuencas centro y sur de Mendoza, y San Juan, se incorporó doble supuesto de admitir que el riego aumenta su consumo neto de agua en un 30% de ahora al 2100, producto de un 50% de aumento en su superficie irrigada y un 20% de mejora en la eficiencia de riego.

#### **b) La estructura del modelo utilizado**

Para realizar el análisis correspondiente a la incidencia futura de distintos factores que afectan al ciclo hidrológico, principalmente el cambio climático, y en función de los alternativos cursos de acción que puedan formularse para el manejo del sistema, se desarrolló el modelo de simulación que a continuación se describe.

La ventaja de contar con un modelo de simulación como el que acá se presenta, es que pueden incorporarse de manera sencilla todos los escenarios concebibles, y realizarse todas las pruebas de sensibilidad que se consideren necesarias. Es un instrumento muy apto para el trabajo interdisciplinario, ya que requiere de los aportes de todas las disciplinas intervinientes, y exige contar con estimaciones y especificaciones cuantitativas acerca de cada componente o escenario. El modelo incorpora todos los componentes mencionados en las secciones anteriores y puede ampliarse para agregar nuevas dimensiones. Trabaja según valores anuales, y sobre un escenario que se extiende hasta el 2100.

El modelo contiene todas variables arriba desarrolladas, condiciones iniciales (año 0), coeficientes técnicos, etc. Funciona así: conocida toda la información de base y condiciones iniciales, se definen los componentes del escenario a correr para la cuenca, que involucra supuestos de comportamiento futuro de cada una de las variables y condiciones consideradas. Por ejemplo, escenario A o B; estrategia de ahorro de agua potable; política de asignación del agua de riego: tasa de reuso de efluentes; precios y costos en el futuro; etc.

La salida del modelo cuenta con 16 vectores, que son:

##### *i) Año*

Horizonte temporal que se extiende del presente hasta 2100.

##### *ii) Demanda agua potable ( $hm^3$ ).*

Como ya se ha mencionado, para hacer la proyección de este sector se partió del consumo actual de la cuenca norte, realizando la extensión del uso del agua con este fin conforme al crecimiento de la población. Para estimar el crecimiento de la población se tomaron los datos de los censos de población 1991 y 2001, y se realizaron tres proyecciones: real, potencial y logística. Los distintos escenarios que se contemplan en este documento para el uso futuro del agua potable, comprenden: a) mantener los niveles actuales de consumo presunto; b) incorporar el sistema de medición en un porcentaje dado de la población. La alternativa de incorporar mejoras operativas para reducir agua no contabilizada no se ha considerado, pero su incorporación es sencilla. En el cuadro 11 que sintetiza todas las corridas realizadas, en la primera columna se expone el criterio utilizado para la proyección de la población para cada escenario particular.

##### *iii) Demanda agua de riego ( $hm^3$ ).*

Para la construcción de esta columna, se han elaborado proyecciones relativas a los principales componentes del sector agrícola, que son: vid, frutales, hortalizas y otros. La información utilizada como condición inicial para cada uno de estos sectores de la producción ha sido arriba descrita. El modelo utiliza esencialmente una proyección de la cantidad de hectáreas asignadas a cada cultivo

particular, cuya trayectoria futura puede ser simulada a través de un coeficiente que permite incorporar una tasa de crecimiento.

*iv) Uso industrial del agua*

A partir de las condiciones iniciales, éste se puede proyectar en el tiempo de acuerdo con un coeficiente que refleje la tasa de crecimiento que se propone.

*v) Demanda de agua pública*

Al igual que en los casos anteriores, partiendo de las condiciones iniciales, se puede proyectar el consumo futuro de acuerdo con una tasa de crecimiento (positiva o negativa), a definir según el escenario que se plantee.

*vi) Demanda total de agua (hm<sup>3</sup>)*

Se compone por la sumatoria de los componentes anteriores.

*vii) Oferta superficial (hm<sup>3</sup>)*

Muestra la oferta de agua que responde a los derrames superficiales aprovechables de los ríos.

*viii) Oferta de reuso de efluentes (hm<sup>3</sup>)*

Incorpora los efluentes urbanos e industriales, que en su totalidad son reutilizados con fines de riego. Se supone que la cantidad de efluentes reutilizados crece proporcionalmente con el uso del agua potable y el uso industrial. Es sabido que para el caso del agua potable, el coeficiente entre el consumo del agua medido en la conexión y la cantidad de efluentes emitidos es del orden de 0,7.

*ix) Externalidad calidad exclusivo (pesos/ha)*

Indica el valor de la externalidad por la caída en la productividad producida por el proceso de salinización del agua. Se toma como base el valor de la producción media de una hectárea en el corriente año, valor que asciende a 8.895 pesos por ha/año. Este problema afecta a una porción considerable de la cuenca norte, y es suficientemente importante como para determinar un techo a la explotación del agua, debido a su pérdida en calidad. Esta columna mide la externalidad para aquellos productores que realizan un uso exclusivo del agua subterránea.

*x) Externalidad calidad conjunto (pesos/ha)*

Indica la caída del valor de la externalidad por salinización. De igual manera que para la columna anterior, pero para el caso de un uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Se usa la proporción media de las fuentes de agua superficial y subterránea, que es aproximadamente 3:1.

*xi) Externalidad volumétrica uso exclusivo (pesos/ha)*

Indica el valor de la externalidad negativa (en términos de costos), producida por la sobreexplotación volumétrica del recurso. Este costo social, que no aparece en la contabilidad de la empresa, es incurrido por el conjunto de los usuarios del agua subterránea por tener que bombear el agua de una mayor profundidad por uso conjunto. Indica el valor de la externalidad medida por hectárea para el caso de uso exclusivo.

*xii) Externalidad volumétrica uso conjunto (pesos/ha)*

Igual al anterior, pero para el caso de uso conjunto.

*xiii) Agua subterránea sobreexplotada*

Esto es, la reducción anual del stock de agua subterránea. De acuerdo con los balances realizados por el INA CRA para un período de 30 años, este volumen asciende a 46 hm<sup>3</sup> por año. Esta columna indica la tasa de sobreexplotación de agua subterránea.

*xiv) Déficit se bombea (hm<sup>3</sup>)*

Da la cantidad de hm<sup>3</sup> que se bombean anualmente de agua subterránea. Esta variable se construye como una diferencia entre los requerimientos de agua y la oferta de agua superficial, la cual incluye los efluentes urbanos e industriales, por lo que es la variable que cierra el balance. De acuerdo con los distintos balances desarrollados por el CRAS y el CRA, existe un volumen de bombeo anual del orden de los 400 hm<sup>3</sup> que es sustentable. Esta columna indica la cantidad de agua que normalmente se bombearía si no existe ningún tipo de restricciones por mayores costos o problemas de externalidades

que se mencionan más adelante. La idea es que, si el agua subterránea se utiliza para cerrar el balance, esta columna representa tal valor.

*xv) Costo social exclusivo (pesos/ha)*

Muestra los costos sociales totales agregados para el uso exclusivo del agua subterránea.

*xvi) Costo social conjunto (pesos/ha)*

Igual al anterior, pero para el caso de uso conjunto. En todos los casos se hace referencia a los costos totales como costos sociales, que involucran los costos privados de inversión en equipos de bombeo, los costos de operación y mantenimiento, y las dos externalidades evaluadas.

**c) Las corridas básicas realizadas**

Para cada una de las cuencas se realizaron 6 corridas básicas del modelo, las que se describen a continuación:

**Corrida 1**

Adopta el escenario B2, (en la cuenca norte de Mendoza implica una caída de 1,2 hm<sup>3</sup> por año).

La población sigue la trayectoria de crecimiento sugerida para este estudio por CEPAL.

Todos los usos sectoriales del agua son constantes en el período 2010-2100.

El caso consumo del agua potable crece en la misma medida que la población.

**Corrida 2**

Adopta el escenario A2, (en la cuenca norte de Mendoza implica una caída de 3,82 hm<sup>3</sup> por año).

El resto, idéntico a la Corrida 1.

**Corrida 3**

Adopta el escenario B2.

La población sigue la trayectoria logística de crecimiento.

Todos los usos sectoriales del agua son constantes en el período 2010-2100.

El caso consumo del agua potable crece en la misma medida que la población.

**Corrida 4**

Adopta el escenario A2.

El resto, idéntico a la Corrida 3.

**Corrida 5**

Adopta el escenario B2.

Todos los sectores mantienen la demanda constante, salvo el agua potable.

La población sigue la trayectoria logística de crecimiento.

En el sector agua potable se desarrolla el programa de micromedición arriba descrito.

**Corrida 6**

Adopta el escenario A2.

El resto, idéntico a la Corrida 3.

## G. Análisis de los resultados

- El caso de la cuenca norte de Mendoza es el más crítico de Cuyo, pues literalmente carece de recursos superficiales o subterráneos ociosos. Aún en el escenario más conservador, en el cual lo único que aumenta es el consumo humano por el crecimiento de la población, se pueden observar los costos marginales crecientes a lo largo de todos los años de corte seleccionados hasta el 2100 (ver el cuadro resumen abajo).

- Los resultados indican que en todas las corridas alternativas para la cuenca norte de Mendoza se produce sobreexplotación del agua subterránea, que ocurre hasta en el escenario más benigno (Corrida 1). En este escenario, ya a partir del 2030, los costos sociales asociados al uso de agua subterránea en riego, como fuente exclusiva, superan el límite máximo de costos admisible. Este valor (que incluye los costos privados y las externalidades) se ha estimado, como caso extremo, en el orden de los 4.500 pesos por hectárea y por año. No obstante, cabe aclarar que, desde la perspectiva privada, un costo por el agua del orden de los 2.000 pesos ya deja afuera del negocio agrícola a una significativa proporción de productores del sector tradicional, aquellos que no están tecnificados y carecen de capacidad de inversión.
- Es tal la gravedad de la cuenca norte de Mendoza, que se ha incursionado preliminarmente en la identificación de políticas que permitan mitigar la escasez en el horizonte temporal estudiado. La más relevante apunta preponderantemente al aumento en la eficiencia de uso del agua para riego.
- La cuenca centro de Mendoza, el Valle de Uco, es una de las más pródigas de la región, por la disponibilidad y calidad del agua, además de su aptitud agroecológica y paisajística. En un escenario de estado estable, sólo bajo las condiciones más astringentes del escenario A2 se observa un tenue aumento del valor del agua en el año 2100.
- La cuenca sur de Mendoza, alimentada por los ríos Diamante y Atuel, también presenta excesos de agua. Esto se evidencia claramente al observar los caudales de salida de los ríos de la cuenca, y a través del balance de aguas subterráneas. No obstante, los excedentes del río Atuel no pueden ser utilizados en la provincia por acuerdos con La Pampa. En esta cuenca, el agua subterránea tiene muy poco uso. Como es de esperar, en un escenario de estado estable, salvo por el crecimiento de la población, no se observa déficit alguno que se manifieste en un aumento en el valor del agua.
- La cuenca del río San Juan muestra también importantes excedentes de agua superficial, lo que se observa a través de los caudales medidos en El Encón. No sucede lo mismo con el agua subterránea, mucho más comprometida. Como en los casos anteriores, si se mantiene un estado estable en los distintos usos del agua, salvo el agua potable, en el horizonte hasta el 2100 no se llega a una situación de escasez. El comportamiento de esta cuenca es muy parecido a los casos de las cuencas centro y sur de Mendoza.
- En el cuadro 15 se pueden observar los resultados centrales de este trabajo: la trayectoria temporal del valor del agua calculado como el costo marginal social de largo plazo para las cuatro cuencas tratadas y para las seis corridas básicas. En todos los casos, estos costos marginales están referidos al sector agrícola, en términos de costos por hectárea y por año. Se puede observar que la cuenca norte de Mendoza está en un estado crítico de alta vulnerabilidad, mientras que el resto de las cuencas se encuentran en óptimas condiciones para iniciar medidas preventivas para manejar el recurso hídrico ante el cambio climático.

## H. Conclusiones

Considerando las corridas arriba presentadas, a continuación se presentan los resultados, mismos que se pueden apreciar en el cuadro 15.

### 1. La cuenca norte de Mendoza

Esta cuenca es la más comprometida en cuanto a las disponibilidades de agua, ya que el recurso hídrico está totalmente asignado a sus distintos fines. Para satisfacer nuevos usos de agua, se requiere sacrificar actuales asignaciones, o aumentar la eficiencia de uso para liberar recursos adicionales; o simplemente, dejar que los costos producidos por nuevas asignaciones sean pagados por la sociedad en términos de reducción de las actuales dotaciones y pérdida de calidad del recurso, que en muchos casos se evidencia ya como irreversible.

Las dos primeras corridas se realizan utilizando las proyecciones recomendadas por CEPAL-CELADE para Argentina. En la Corrida 1, bajo un escenario B2, y en la que nada cambia, solo el aumento de la población, el costo social para el riego con agua subterránea exclusiva es soportable solo hasta el 2030, cuando ya su envergadura (4.356 pesos) supera el 50% de los ingresos medios por hectárea de la finca. Para el caso de uso conjunto, el mismo techo está ubicado en el 2080. Nótese que ésta es la más benévola de las corridas. La Corrida 2, bajo el escenario A2, el costo social del agua crece más rápidamente. Para el caso de uso de agua subterránea exclusivamente, establece un techo antes del año 2030, mientras que para el riego conjunto con aguas superficiales y subterráneas tal techo se alcanza antes del 2060.

La Corrida 3 utiliza las proyecciones de población según una trayectoria logística y bajo el escenario B2, que arroja resultados semejantes a la Corrida 1. En la Corrida 4, bajo escenario A2, el costo social del agua por hectárea irrigada exclusivamente con agua subterránea alcanza su techo en términos de factibilidad de pago social, aproximadamente en el año 2025. Esto habla del grado de vulnerabilidad que se ha alcanzado en esta cuenca. Para el más generalizado uso conjunto con aguas superficiales y subterráneas, el techo de factibilidad social se aleja al año 2055.

Todas las siguientes corridas adoptan el aumento de la población según la trayectoria logística.

La Corrida 5 supone la micromedición en el sector agua potable bajo el escenario B2. El impacto de esta sola acción no luce muy relevante, pues en esta corrida indica que el momento de corte para el agua subterránea exclusiva se rezaga no más de 5 años con relación a la situación sin micromedición. Para el uso conjunto, el respiro que otorga la aplicación de esta política va desde mediados de los años ochenta a mediados de los años noventa. La Corrida 6, con escenario A2 y con los mismos supuestos que la anterior, tampoco muestra grandes diferencias entre los resultados con y sin micromedición.

Con la finalidad de dimensionar la intensidad de las acciones a tomar para lograr mínimas condiciones de sustentabilidad en la cuenca, se realizó la Corrida 7, que integra el escenario B2 y sobre los supuestos de las corridas anteriores, se agregaron medidas sobre el sector riego que logran una reducción en las ineficiencias en las entregas de agua en un 10%, aplicadas y logradas entre 2020 y 2040, manteniéndose los niveles de la mayor eficiencia hasta el 2100. Por fortuna, este escenario permite transitar la centuria sin tener que confrontar costos crecientes. Pero bajo el escenario A2, en la Corrida 8, lo que se logra es el alejamiento de la crisis en el tiempo: el techo para el uso exclusivo del agua subterránea aparece recién en el 2095.

Esto llama claramente la atención sobre lo estratégico que resulta trabajar en la reducción de las ineficiencias en la distribución del agua de riego. Conviene recordar que en la cuenca norte de Mendoza la eficiencia del sistema es cercana al 30%, por lo que un aumento de un 10% debiera ser social, política y económicamente factible ante los resultados previsibles de tal acción.

En la Corrida 9 se mantienen los mismos supuestos que para el caso anterior, con la diferencia que ahora se elimina el programa de micromedición del agua potable. Los resultados son idénticos a la Corrida 7, lo que indica la baja efectividad de la micromedición en este escenario. En cambio, la eliminación de la tal acción en el sector agua potable tiene relevancia en el escenario A2. Bajo este escenario, el comienzo de la crisis para el uso exclusivo del agua subterránea aparece antes del 2090. Bajo los supuestos y condiciones del modelo desarrollado, puede decirse que la micromedición pospone unos siete años el problema de la escasez en el tiempo.

## **2. La cuenca centro de Mendoza**

El Valle de Uco es una cuenca muy rica en recursos naturales y bienes ambientales. Goza de buenas dotaciones de agua de excelente calidad. La particular dotación de recursos se destaca en los resultados del modelo utilizado.

En la Corrida 1, (población según CEPAL-CELADE bajo el escenario B2) no hay impacto alguno de la reducción de los caudales producidos por el cambio climático. La cuenca se mantiene sin acusar impacto por la reducción de los aportes de agua superficial durante todo el horizonte. En la Corrida 2, recién para el 2100 aparecen los primeros síntomas de costos crecientes, pero lejos de toda gravedad.

En las siguientes corridas la población crece de acuerdo con una función logística ajustada según los últimos datos censales, y suponiendo un techo de 1,5 millones de habitantes en la cuenca centro de Mendoza. Puede apreciarse en la Corrida 3 (escenario B2) que recién para el 2100 aparecen magros incrementos en el valor del agua. En la Corrida 4 se utilizan para esta corrida los mismos supuestos que para el caso anterior, pero ahora bajo la mayor astringencia del escenario A2, que tiene su efecto en anticipar el aumento del costo marginal del agua, que ya se inicia para el 2070, y se acentúa tenuemente en el 2100. Aún así, los aumentos en costo no revisten gravedad.

En la Corrida 5 supone un programa de micromedición que reduce el consumo medio per cápita en un 25% entre 2010 y 2020. El impacto de esta sola acción es mínimo cuando se lo compara con la Corrida 3. Pareciera que los beneficios agregados de la micromedición no tienen gran efecto en la reducción del costo marginal de largo plazo. La Corrida 6, con los mismos supuestos que la anterior pero para el escenario A2, no muestra grandes diferencias cuando se la compara con la Corrida 4, que no incluye la micromedición.

Con el fin de probar la robustez de la cuenca, en la Corrida 7 se incorpora el supuesto de admitir que el riego aumenta su consumo neto de agua en un 30% de ahora al año 2100, producto de un 50% de aumento en su superficie irrigada y un 20% de mejora en la eficiencia de riego. En el escenario B2 los resultados muestran que para el 2050 se empiezan a manifestar aumentos en el costo marginal del agua, que asciende lentamente hasta el 2100, pero manteniendo niveles muy fáciles de soportar por la actividad agrícola. En la Corrida 8, bajo el escenario A2, el comienzo del aumento de costos se manifiesta a partir del 2030, creciendo muy lentamente hacia el 2100, trayectoria en que se mantienen niveles de costos razonablemente bajos.

Se concluye que el Valle de Uco es una cuenca robusta, donde los mayores esfuerzos deben orientarse hacia la conservación de los recursos y bienes ambientales.

### **3. La cuenca sur de Mendoza - ríos Diamante y Atuel**

Al igual que el Valle de Uco, la cuenca sur es también muy rica en recursos naturales y bienes ambientales. Igualmente, goza de buenas dotaciones de agua pero de inferior calidad, como así también presenta mayores limitaciones ecológicas para las actividades agropecuarias.

En la aplicación del modelo formulado, puede apreciarse que en esta cuenca hay excedentes de agua de magnitud tal que las necesidades de agua —en el mundo de casi estado estable como el que se plantea en los distintos escenarios y corridas seleccionadas— la dotación de agua es tal que no alcanzan a ser afectadas por la reducción de caudales atribuibles al cambio climático. Esto lo indican las Corridas 1 a 4, que no muestran cambios en el valor del agua a lo largo de todo el horizonte temporal.

En la Corrida 7, bajo el escenario B2, se reduce el consumo medio per cápita en un 25% entre 2010 y 2020, a lo que se agrega el supuesto de admitir que el riego aumenta su consumo neto de agua en un 30% de ahora al año 2100, producto de un 50% de aumentar su superficie irrigada y un 20% de mejora en la eficiencia de riego. En el contexto definido, los resultados muestran que esta cuenca es aún más robusta (en términos de cantidad de agua) que la cuenca centro. En esta última los efectos del cambio climático aparecían para el 2050; en cambio, en esta cuenca sur se empiezan a manifestar aumentos en el costo marginal del agua recién en el 2070.

La Corrida 8, bajo el escenario A2 y con los mismos supuestos que la corrida anterior, el comienzo del aumento de costos se manifiesta a partir del 2050, creciendo muy lentamente hacia el 2100. Esta es decididamente una cuenca robusta en el contexto del análisis realizado en este trabajo.

### **4. La cuenca del río San Juan**

Al igual que el Valle de Uco y la cuenca sur, esta cuenca presenta notorios excedentes de agua. Como elemento paradigmático, ya se mencionó que al Encón (salida del río San Juan) llegan en promedio 600 hm<sup>3</sup> anuales, que son excedentes de la cuenca. Esto hace que las corridas del modelo formulado muestren una notoria ausencia de impactos ante una creciente escasez del agua cuando las condiciones de aumento de la demanda de agua se mantienen casi invariables en el tiempo, según se ha establecido en las primeras corridas.

Para presentarlo de manera rápida, en las 4 primeras corridas diseñadas, los resultados que se obtienen para los costos sociales son idénticos: la oferta de largo plazo es una línea horizontal paralela al eje de las abscisas. En estos escenarios no se acusa impacto de la escasez producto de la reducción estimada en el caudal del río San Juan.

La Corrida 7, bajo el escenario B2 y suponiendo la micromedición que reduce el consumo medio per cápita en un 25% entre 2010 y 2020 y el aumento su consumo neto del riego en un 30%, los resultados indican que recién para el 2100 se comienzan a manifestar signos económicos de escasez.

La Corrida 8, bajo el escenario A2 y con los mismos supuestos que en el caso anterior, pero bajo las condiciones más severas que impone este escenario, el comienzo del aumento de costos se manifiesta a partir del 2070, creciendo rápidamente hacia el 2100. Esto es así por la rápida caída en el caudal del río San Juan en el escenario A2. No obstante, es una cuenca muy robusta.

## **I. Estimación de los costos sociales totales del efecto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico en Mendoza y San Juan**

En el cuadro 16 se presentan los costos totales en Cuyo, expresados en millones de pesos argentinos a octubre de 2009 y en millones de dólares para la misma fecha. El método utilizado consiste en ponderar los costos por hectárea según la fuente de agua utilizada para riego. Existen tres tipos de unidades productivas, que se dividen en: a) aquellas que utilizan agua superficial exclusiva; b) las que se nutren de agua subterránea exclusiva; y c) las que hacen un uso conjunto de agua superficial y subterránea.

De acuerdo a los resultados obtenidos para las corridas de los modelos utilizados en este trabajo, las únicas cuencas que aportan a estos costos son la cuenca norte, y en mínima proporción, la cuenca centro, ambas de Mendoza. En el siguiente cuadro se presentan los costos sociales atribuibles al cambio climático para los años de corte, en pesos y dólares.

**Cuadro 15**  
**Costo marginal social del agua obtenido para las 6 corridas básicas en las cuencas estudiadas**  
*(En pesos/ha)*

Corrida	Año	Cuenca norte de Mendoza		Cuenca centro de Mendoza		Cuenca sur de Mendoza		Cuenca río San Juan		
		Costo Social Exclusivo	Costo Social Conjunto	Costo Social Exclusivo	Costo Social Conjunto	Costo Social Exclusivo	Costo Social Conjunto	Costo Social Exclusivo	Costo Social Conjunto	
Corrida 1	2010	1 212	739	418	105	418	268	418	505	
	2020	2 579	969	418	105	418	268	418	505	
	Escenario B2									
	Todos los usos constantes, excepto el agua potable	2030	4 356	1 269	418	105	418	268	418	505
		2050	9 043	2 059	418	105	418	268	418	505
	La población sigue la trayectoria sugerida por CEPAL	2070	15 064	3 075	418	105	418	268	418	505
	2100	26 165	4 947	418	105	418	268	418	505	
Corrida 2	2010	1 212	739	418	105	418	268	418	505	
	2020	2 948	1 031	418	105	418	268	418	505	
	Escenario A2									
	Todos los usos constantes, excepto el agua potable	2030	5 765	1 506	418	105	418	268	418	505
		2050	15 185	3 628	418	105	418	268	418	505
	La población sigue la trayectoria sugerida por CEPAL	2070	27 983	5 786	418	105	418	268	418	505
	2100	54 280	10 221	1 087	111	418	268	418	505	
Corrida 3	2010	1 213	739	418	105	418	268	418	505	
	2020	2 585	970	418	105	418	268	418	505	
	Escenario B2									
	Todos los usos constantes, excepto el agua potable	2030	4 398	1 276	418	105	418	268	418	505
		2050	9 377	2 115	418	105	418	268	418	505
	La población sigue una trayectoria logística	2070	16 219	3 269	418	105	418	268	418	505
	2100	30 744	6 252	1 154	128	418	268	418	505	
Corrida 4	2010	1 213	739	418	105	418	268	418	505	
	2020	2 954	1 032	418	105	418	268	418	505	
	Escenario A2									
	Todos los usos constantes, excepto el agua potable	2030	5 807	1 513	418	105	418	268	418	505
		2050	15 519	3 684	418	105	418	268	418	505
	La población sigue una trayectoria logística	2070	29 137	5 981	1 134	123	418	268	418	505
	2100	58 218	10 886	1 286	161	418	268	418	505	

Cuadro 15 (conclusión)

Corrida	Año	Cuenca norte de Mendoza		Cuenca centro de Mendoza		Cuenca sur de Mendoza		Cuenca río San Juan	
		Costo Social Exclusivo	Costo Social Conjunto	Costo Social Exclusivo	Costo Social Conjunto	Costo Social Exclusivo	Costo Social Conjunto	Costo Social Exclusivo	Costo Social Conjunto
Corrida 5	2010	1 210	738	418	105	418	268	418	505
	2020	2 394	938	418	105	418	268	418	505
Escenario B2	2030	3 835	1 181	418	105	418	268	418	505
La población sigue una trayectoria Logística	2050	7 965	1 877	418	105	418	268	418	505
Micromedición reduce el consumo per cápita en un 25%	2070	13 799	2 861	418	105	1 293	967	418	505
	2100	25 844	4 893	1 086	111	1 809	1 096	4 945	1 608
Corrida 6	2010	1 210	738	418	105	418	268	418	505
	2020	2 394	938	418	105	418	268	418	505
Escenario A2	2030	3 835	1 181	418	105	418	268	418	505
La población sigue una trayectoria logística	2050	7 965	1 877	418	105	1 103	919	418	505
Micromedición reduce el consumo per cápita en un 25%	2070	13 799	2 861	1 090	112	1 518	1 023	1 083	1 148
	2100	25 844	4 893	1 218	144	2 147	1 180	13 519	2 629

64

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 16**  
**Costos sociales totales del efecto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico en Mendoza y San Juan**

Año	Escenario B2	Escenario A2	Escenario B2	Escenario A2
	<i>(millones de pesos de 2009)</i>		<i>(millones de dólares de 2009)</i>	
2010	0	0	0	0
2020	8	26	2	7
2030	31	100	8	26
2050	122	446	32	117
2070	273	939	72	247
2100	682	2 003	179	527

Fuente: Elaboración propia.

## Bibliografía

---

- Boninsegna, J. y Delgado S. (2002), Atuel River streamflow variations from 1575 to present reconstructed by tree rings, their relationships to the Southern Oscillation. In: Trombotto, D. and R. Villalba (eds.), 2002. "IANIGLA, 30 Years of Basic and Applied Research on Environmental Sciences", Zeta Editores, Mendoza, Argentina, pp. 31-34.
- Bottero, R. (2002), Inventario de Glaciares de Mendoza y San Juan. In: Trombotto, D. and R. Villalba (eds.), 2002. "IANIGLA, 30 Years of Basic and Applied Research on Environmental Sciences", Zeta Editores, Mendoza, Argentina, pp. 165 -169.
- CELA INCYTH (1988) "Estimación de la demanda de agua en el conurbano de Mendoza" Informe técnico no publicado realizado para Obras Sanitarias de Mendoza.
- CNA (2002), Censo Nacional Agropecuario, INDEC, Argentina.
- CNE (2005), Censo Nacional Económico 2004/2005, Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, Buenos Aires, Argentina.
- CONAMA (2006), "Estudio de la variabilidad climática de Chile para el siglo XXI. Informe Final", Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. 71p.
- Dirección de Gestión Hídrica (2009), "Boletín Hidrometeorológico Mayo 2009", Departamento de Evaluación de Recursos Hídricos, Departamento General de Irrigación, Provincia de Mendoza.
- DEIE (Dirección de Estadísticas y Censo de Mendoza) (2000), "Anuario 2000".
- \_\_\_\_\_ (2001), "Anuario 2001".
- \_\_\_\_\_ (2002), "Anuario 2002".
- \_\_\_\_\_ (2003), "Anuario 2003".
- \_\_\_\_\_ (2004), "Anuario 2004".
- Falvey, M. (2007), "Modelación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos de Chile", Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, 4to Taller de Circulación Oceánica y Atmosférica de la región del Pacífico Sureste. 18 de Octubre 2007, Santiago, Chile.
- FAO-DGI (2004), "Plan Director del río Tunuyán (Tramo inferior)", Grupo FAO-DGI, Mendoza.
- \_\_\_\_\_ (2004a), "Plan Director del río Tunuyán (Tramo superior)", Grupo FAO-DGI, Mendoza.
- \_\_\_\_\_ (2004b), "Plan Director para la cuenca del Río Atuel", FAO-DGI, Mendoza.
- \_\_\_\_\_ (2004c), "Plan Director para la cuenca del Río Diamante", FAO-DGI, Mendoza.
- \_\_\_\_\_ (2004d), "Plan Director para la cuenca del Río Mendoza", FAO-DGI, Mendoza.
- Hernández, J.; Poblete, M.; Pereyra, M.; Álvarez, A.; Martínís, N. (1984), "Localización de zonas aptas para la construcción de baterías de pozos. Zona Norte, Provincia de Mendoza", D.108 – CRAS.

- ILA-INCYTH, (1982), “Eficiencias de Riego en el Río Tunuyán Inferior”, INCYTH.
- INV (2001) “Síntesis Estadística Vitivinícola”, Instituto Nacional de Vitivinicultura, Mendoza, Argentina.
- INDEC (1988), “Censo Nacional Agropecuario y actualizaciones”. Buenos Aires, Argentina.
- INDEC (2002), “Censo Nacional Agropecuario”. Buenos Aires, Argentina.
- Lascano, M. y Villalba R (2007), Algunas precisiones sobre el rol de los glaciares en el escurrimiento andino. XXI Congreso Nacional del Agua (CONAGUA2007), Tucumán, Argentina. 17 p.g. (CD).
- Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J., Rivera, A. y Barichivich, J. (2009), Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Paleoecol.*
- Llop, A. (1982), “Sobre la estimación de externalidades temporales en el uso del agua”, Mendoza, IV Congreso Mundial de Recursos Hídricos, y XIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Agraria, Río Cuarto, Córdoba.
- Llop, A. y G. Fasciolo (1998), “Estrategias de control de la contaminación del agua subterránea: el caso del Este mendocino”, trabajo publicado en Anales del XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Santa Fe, Argentina, pág. 54 a 63.
- Masiokas, M. H., R. Villalba, B. H. Luckman, C. Le Quesne, y J. C. Araven (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. *J. Climate* 19(24):6334-6352.
- Núñez, M., Solman, S. (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 No. 2. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 31pp.
- Pazos, J.; Bartolomeo, J.; Ortiz, O.; Herrada, H. (1988), “Evaluación del estado hidrológico de la zona norte de Mendoza”, año 1987. Provincia de Mendoza. DI – 116 – CRAS.
- Robles, J; Álvarez, A. (1991), “Estado de perforaciones zona Norte. Departamentos San Martín, Junín y Rivadavia, Provincia de Mendoza”, DI – 171 – CRAS.
- Secretaría de Ambiente, (2005) “Informe Ambiental Provincial”, Mendoza.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos (2004), “Estadística Hidrológica de la Republica Argentina”, Secretaría de Obras Públicas. Edición digital ISBN: 987-98869-3-3.
- Universidad Nacional de Cuyo (2004), “Informe Físico Ambiental. Marco Estratégico”, Provincia de Mendoza. UNCuyo (inédito).
- Webber, S.R. y C.J. Willmott (1998), “South American Precipitation: 1960-1990 Gridded Monthly Time Series (Version 1.02)”, Newark, Delaware: Center for Climatic Research, Dept. of Geography, Univ. of Delaware.



NACIONES UNIDAS

**Serie****CEPAL****Medio Ambiente y Desarrollo****Números publicados**

**Un listado completo así como los archivos pdf están disponibles en**

**[www.cepal.org/publicaciones](http://www.cepal.org/publicaciones)**

161. 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. José Boninsegna y Armando Llop (LC/L.4089), noviembre de 2015. Email: pbonin@mendoza-conicet.gob.ar, armandollop@yahoo.com.ar, erecc.lac@cepal.org.
160. Emisiones de gases de efecto invernadero y mitigación en el sector de uso de suelo, cambio en el uso del suelo y silvicultura. Economía del cambio climático en la Argentina, Héctor Daniel Ginzo, (LC/L.4088), octubre 2015. Email: hdginzo@arnet.com.ar, erecc.lac@cepal.org.
159. Evaluación de los impactos del cambio climático sobre la salud. Economía del cambio climático en la Argentina, Anibal E. Carbajo (LC/L. 4084), octubre 2015. Email: acarbajo@unsam.edu.ar, erecc.lac@cepal.org.
158. Tipología de instrumentos de derecho público ambiental internacional, Marcos A. Orellana (LC/L. 3912), octubre 2014. Email: carlos.demiguel@cepal.org
157. La estimación de los efectos de los desastres en América Latina, 1972-2010, Omar Bello, Laura Ortiz, Joseluis Samaniego (LC/L.3899), septiembre 2014. Email: omar.bello@cepal.org
156. Paradojas y riesgos del crecimiento económico en América Latina y el Caribe: una visión ambiental de largo plazo, Luis Miguel Galindo, Joseluis Samaniego, José Eduardo Alatorre, Jimmy Ferrer, Orlando Reyes (LC/L.3868), junio 2014. Email: luismiguel.galindo@cepal.org.
155. Evaluación de impactos del cambio climático sobre la producción agrícola en la Argentina, Ana María Murgida, María Isabel Travasso, Silvia González, Gabriel R. Rodríguez (LC/L.3770), diciembre 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org, erecc.lac@cepal.org.
154. Escenarios hidrológicos de caudales medios del río Paraná y Uruguay, Vicente Barros (LC/L.3741), octubre 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org, erecc.lac@cepal.org.
153. Incidencia distributiva del impuesto a los combustibles en el Gran Santiago, Diego Vivanco Vargas (LC/L.3730), octubre 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org, erecc.lac@cepal.org.
152. Evaluación de los impactos del cambio climático sobre el ecosistema natural y la biodiversidad. Esteros del Iberá (Argentina) (LC/L 3728), octubre 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org.
151. Acceso a la información participación y justicia en temas ambientales en América Latina y el Caribe. Situación actual, perspectivas y ejemplos de buenas prácticas. Valeria Torres, Carlos de Miguel (LC/L. 3549-Rev 2), octubre 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org.
150. Climate change and reduction of CO2 emissions: the role of developing countries in carbon trade markets. Carlos Ludeña, Carlos de Miguel, Andres Schuschny (LC/L.3608), diciembre 2012. Email: carlos.demiguel@cepal.org.
149. Disponibilidad futura de los recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático en Chile. Ximena Vargas, Álvaro Ayala, Rodrigo Meza, Eduardo Rubio (LC/L. 3592), diciembre 2012. Email: carlos.demiguel@cepal.org, erecc.lac@cepal.org.
148. Efecto del cambio climático en la salud pública en Colombia: estudio de caso malaria y dengue. Viviana Cerón y Salua Osorio Mrad (LC/L.3587), marzo 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org, erecc.lac@cepal.org.
147. Desarrollo de una función agroclimática para estimar productividad de los cultivos agrícolas en Colombia. J. Francisco Boshell V. (LC/L.3586), marzo 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org, erecc.lac@cepal.org.

# MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

161

# MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

## MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO



COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE  
ECONOMIC COMMISSION FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN  
[www.cepal.org](http://www.cepal.org)