

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016**

**LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA COMO HERRAMIENTA PARA EL  
ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD DEL DESARROLLO AGRÍCOLA**

*A.N. Menéndez<sup>1</sup>, M. Sabarots Gerbec<sup>1</sup>, R. Ginzburg<sup>2</sup>, S. Torrela<sup>2</sup>, J. Adámoli<sup>2</sup>, M. Rujana<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Laboratorio de Hidráulica, INA & LaMM, Facultad de Ingeniería UBA, Argentina*

*<sup>2</sup>GESEAA, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales UBA, Argentina*

*<sup>3</sup>ICAA & y Facultad de Ciencias Agrarias UNNE, Argentina*

*angel.menendez@speedy.com.ar*

**RESUMEN:**

Se presenta un estudio, basado en la modelación hidrológica, para determinar la evolución del consumo de agua y la consecuente afectación del balance hídrico asociados al cambio de uso del suelo por el avance de la agricultura en la Cuenca del río Miriñay (Provincia de Corrientes, Argentina). Se describe la implementación y calibración del modelo. Se analizan el escenario natural previo al actual desarrollo agrícola, y se hacen proyecciones para escenarios futuros de expansión agrícola. El estudio muestra que las variaciones del balance hídrico no deberían poner en riesgo la sustentabilidad ambiental de la cuenca.

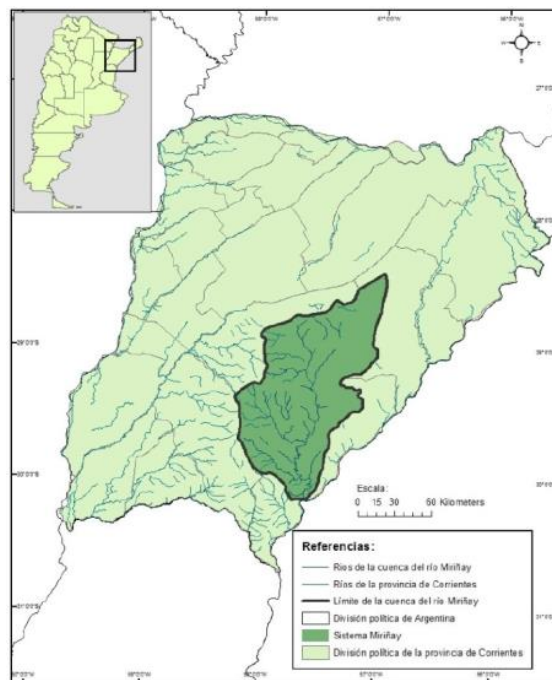
**ABSTRACT:**

A study, based on hydrological modelling, to determine the evolution of water consumption and the consequent alteration of the water balance associated to land use change due to agricultural advance in the Miriñay Basin (Corrientes Province, Argentina), is presented. The implementation and calibration of the model is described. The natural scenario previous to the present agricultural development is analyzed, and projections for future scenarios with agricultural expansion are made. The study shows that variations of the water balance should not put into risk the environmental sustainability of the basin.

**PALABRAS CLAVES:** modelación hidrológica; balance hídrico; cambio uso de suelo; agua para agricultura

## INTRODUCCIÓN

Desde principios de la década de 1990 diversas causas motivaron un desplazamiento de la producción arrocerá en el litoral argentino. La cuenca del río Miriñay, ubicada en la Provincia de Corrientes (Figura 1), dada su excelente aptitud agrícola, ha experimentado desde entonces una expansión del cultivo y de la infraestructura hídrica destinada a atender sus demandas. Al año 2010, la cuenca contaba con 38 embalses de más de 50 ha, concentrados en las subcuencas del Ayuí Grande y del Yaguari, la mayoría de ellos construidos durante la década del 90 (Alarcón & Insaurralde, 2011).



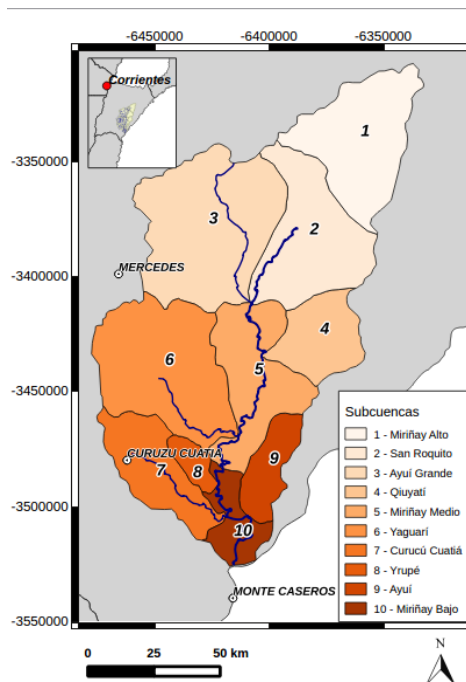
**Figura 1.-** Ubicación de la cuenca del Miriñay (tomada de Alarcón (2013)).

Para asegurar la sustentabilidad ambiental en la cuenca del río Miriñay resulta necesario un programa de ordenamiento territorial integral, basado en la evaluación de los efectos ambientales acumulativos de los proyectos de desarrollo agropecuario y forestal. Con este objetivo, a pedido del ICAA (Instituto Correntino del Agua y del Ambiente) se llevó a cabo un estudio para determinar la evolución del consumo de agua y la consecuente afectación del balance hídrico, teniendo en cuenta la pérdida de ambientes naturales asociada por cambio de uso del suelo. Se consideraron no sólo los proyectos ya realizados, sino también los previstos a futuro.

En este trabajo se describe el estudio hidrológico y se presentan y discuten sus principales resultados.

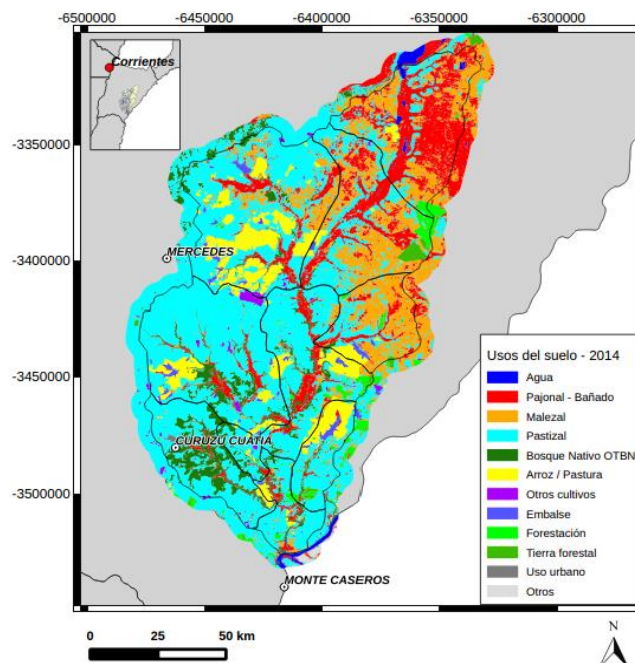
## IMPLEMENTACIÓN DE MODELO HIDROLÓGICO

Se efectuó una modelación hidrológica de la cuenca utilizando el software HEC-HMS. Se tomaron como base 8 subcuencas definidas por Alarcón (2013), dos de las cuales fueron subdivididas en dos partes de modo de generar cierres en las estaciones San Roquito y Paso Ledesma, donde se dispone de registros hidrométricos, y en consecuencia utilizar esas salidas de caudal para calibrar el modelo. Las 10 subcuencas resultantes se muestran en la Figura 2.



**Figura 2.-** Subcuencas de la cuenca del Miriñay.

Para construir el Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno se utilizó como base de datos el SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). Se elaboraron detallados mapas de cobertura del suelo para los años 2000 y 2014 en base a imágenes satelitales y verificación de campo (Figura 3).



**Figura 3.-** Mapa de uso de suelo.

El balance vertical de agua se efectuó mediante el método SMA (*Soil Moisture Accounting*; Bennett & Peters, 2000), que plantea una distinción entre 5 compartimientos. Los valores de los parámetros del modelo (almacenamientos iniciales, almacenamientos máximos, infiltración / percolaciones máximas, tiempo de retardo subterráneo e impermeabilidad) se asignaron en función de datos locales y regionales.

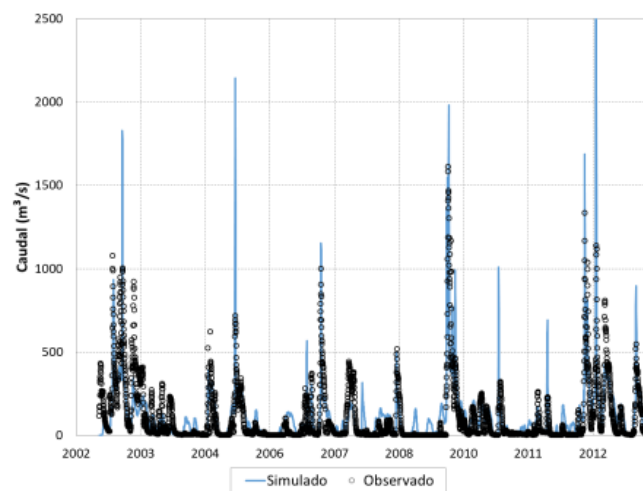
La evapotranspiración potencial de referencia fue calculada con la fórmula de Penman-Monteith. Para tener en cuenta el tipo de cobertura vegetal se la multiplicó por el coeficiente de cultivo, para el cual se construyeron ciclos estacionales asociados a los distintos tipos de cobertura (Allen et al., 2006; Jorgensen et al., 1993; López Avendaño, 2007).

Para el transporte de la escorrentía superficial se utilizó el método del hidrograma unitario del SCS (actualmente NRCS). Aunque este fue desarrollado para cuencas de EEUU, su aplicación a cuencas de otras partes del mundo suele dar resultados aceptables si no se requiere de una alta precisión. El transporte del flujo de base se efectuó mediante el método del reservorio lineal (Ven Te Chow, 1994).

Se estableció el período 2002-2014 como ventana de tiempo del estudio, tomándosela como representativa de las condiciones actuales de la cuenca. Se utilizó como forzante la serie temporal de precipitación diaria en la estación Paso San Roquito, a la que se le aplicó un factor de abatimiento de 0,91, que corresponde a eventos de duración mayor a 24 horas y área de cuenca mayor a 1000 km<sup>2</sup> (Zamanillo, 2009). Para la evapotranspiración potencial de referencia se utilizó la serie correspondiente a la estación Mercedes.

Se desarrolló una metodología aproximada para simular la operación de los embalses, consistente en sustraerle a cada subcuenca el área que captura el volumen total embalsado.

La calibración consistió en ajustar algunos de los parámetros del modelo, dentro del rango justificable físicamente, para obtener el mejor acuerdo posible entre las series de caudal calculadas y medidas en Paso San Roquito y Paso Ledesma, tal como se ilustra en la Figura 4. Factores determinantes fueron la elección de la serie temporal de precipitación y la tasa de infiltración. Algunas de las desviaciones (exageración o no captura de algunos pulsos) están asociadas a la propia limitación de los datos.

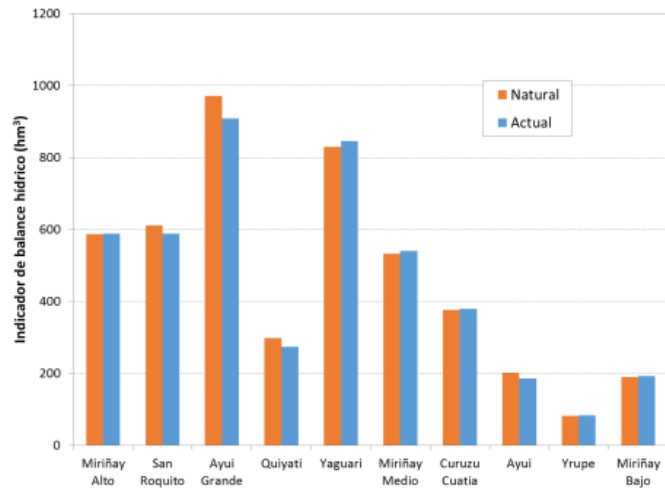


**Figura 4.-** Caudal en Paso Ledesma.

El objetivo del modelo es proveer una medida cuantitativa del balance hídrico para cada subcuenca bajo diferentes escenarios de aprovechamiento, que incluyen combinaciones de usos del suelo y represamientos. Se adoptó como indicador el volumen medio anual escurrido a la salida de cada subcuenca, es decir

$$V_s = \frac{1}{N} \int_{2002}^{2014} Q(t) dt \quad [1]$$

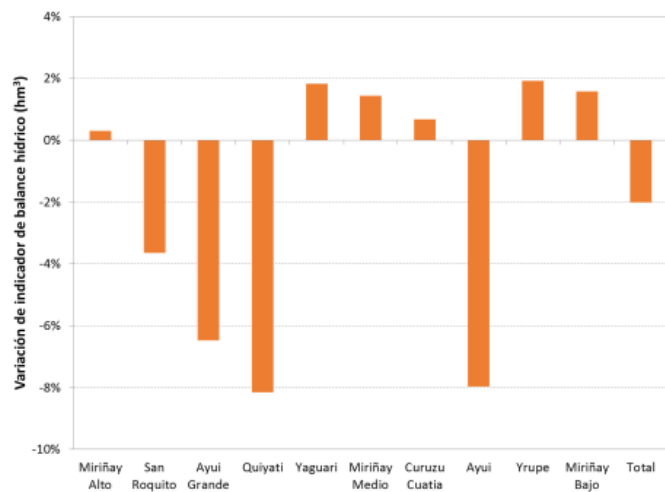
donde  $Q(t)$  es el caudal y  $N$  la cantidad de años (13). En la Figura 5 se muestran los valores por subcuenca de este indicador, identificados como escenario Actual.



**Figura 5.-** Indicador de balance hídrico.

## APLICACIÓN DE MODELO HIDROLÓGICO

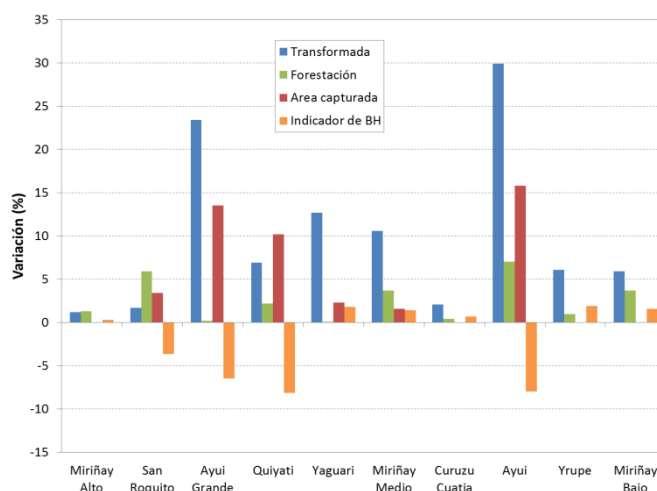
La primera pregunta que puede responder el modelo es la siguiente: ¿cuál era el balance hídrico antes de que se cambiara el uso del suelo a agrícola/forestal? Para responderla, se utilizó la misma ventana de tiempo climatológica que para la calibración, pero se redefinieron las zonas actualmente agrícolas o forestales a pastizales o malezales. A este escenario se lo denominó ‘Natural’. Además, se consideró ausencia de represas. En la Figura 5 se presentan los indicadores de balance hídrico para este escenario, junto a los del escenario Actual, mientras que la Figura 6 muestra la variación que el escenario Actual representa frente al Natural. Se observa que, debido al cambio de uso de suelo, se han producido variaciones de distinto signo y magnitud en las diferentes subcuencas. Esto sucede porque existen procesos contrapuestos: el embalsamiento de agua reduce el volumen escurrido; el reemplazo de pastizales o malezales por explotación agrícola conduce a una disminución del volumen anual evapotranspirado y, en consecuencia, a un aumento de la escorrentía; en cambio, el reemplazo de pastizales o malezales por forestación produce el efecto contrario, particularmente por el aumento del almacenamiento en el follaje. Los decrementos no superan el 8%, mientras que los incrementos no alcanzan el 2%.



**Figura 6.-** Variación del escenario Actual respecto del Natural.

Para un análisis más detallado de estos resultados, en la Figura 7 se resumen los cambios operados entre los escenarios Natural y Actual en términos de los aumentos relativos de área agrícola, de área forestal, de área capturada por los embalses (indicador del volumen embalsado), y de indicador de balance hídrico. Se observa que, debido a las intervenciones sobre la cuenca:

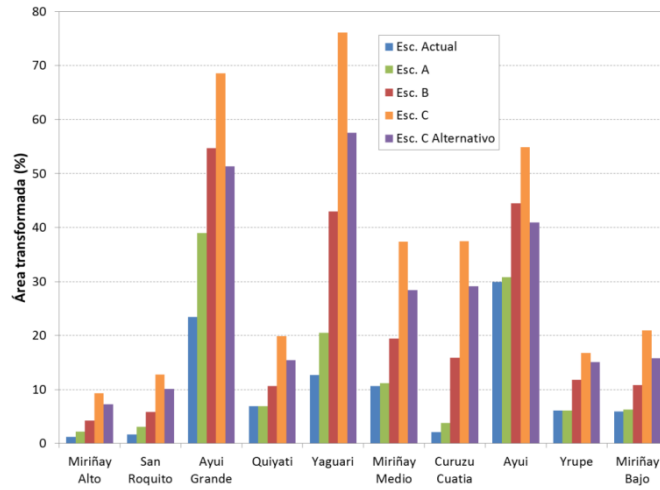
- Ha disminuido el indicador de balance hídrico en 4 de las subcuencas (San Roquito, Ayuí Grande, Quiyatí y Ayuí) y ha aumentado en el resto.
- Las disminuciones han sido más significativas en magnitud que los aumentos.
- Las mayores disminuciones del indicador de balance hídrico, de más del 5%, se dieron en las 3 subcuencas con gran cantidad de embalses construidos (Ayuí Grande, Quiyatí y Ayuí), con los cuales se captura no menos del 10% del área de la subcuenca.
- La disminución en la subcuenca restante (San Roquito), de más del 3%, se debe en parte a la construcción de embalses y en parte a la forestación.
- Donde se han producido incrementos del indicador de balance hídrico, éstos se deben al aumento de la agriculturización en la subcuenca (indicado por el aumento de área transformada), sin que ello haya sido acompañado de volúmenes embalsados significativos.



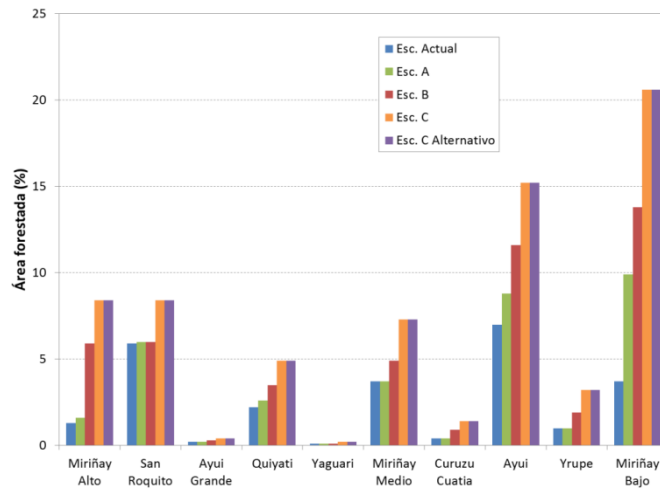
**Figura 7.-** Variaciones del escenario Actual respecto del Natural.

Los escenarios planteados para el desarrollo futuro de la cuenca incluyen uno de corto plazo (A), uno de mediano plazo (B), y dos de largo plazo (C y C Alternativo). Para representarlos, los incrementos en el Área Transformada para estos escenarios futuros se hicieron a costa de la disminución del uso Pastizal, mientras que los incrementos en la forestación fueron a costa de los Bosques Nativos y, una vez agotadas estas áreas, reduciendo el área de Malezal. Se incorporaron las combinaciones de aumento de represamientos y cambios de uso de suelo al modelo para representar cada uno de esos escenarios, manteniendo la misma ventana de tiempo climatológica (2002-2014). En la Figura 8 se representan las áreas relativas intervenidas en cada escenario, incluyendo el Actual como referencia. Se observan los incrementos en las áreas transformadas y forestadas, y en las áreas efectivas capturadas por embalsamiento.

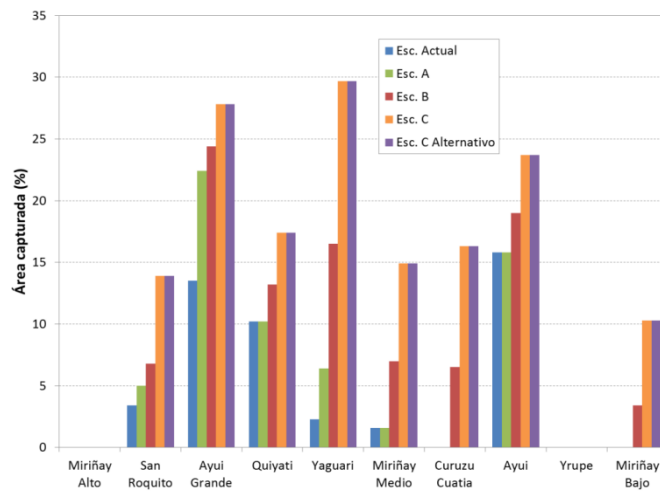
En la Figura 9 se presentan los indicadores de balance hídrico para los cuatro escenarios y la variación que esos escenarios representan frente al actual. No hay diferencia entre los resultados correspondientes a los escenarios C y C Alternativo, dado que se ha considerado que las pasturas y los pastizales tienen propiedades similares de evapotranspiración. Se observa que, debido a los cambios previstos en el uso del suelo, habría una merma de los caudales producidos para la mayoría de las subcuencas salvo para 2 (Miriñay Alto e Irupé). Las reducciones relativas no alcanzarán el 10%, salvo para una de las subcuencas (Yaguari), donde es más del 15%.



a) Área transformada

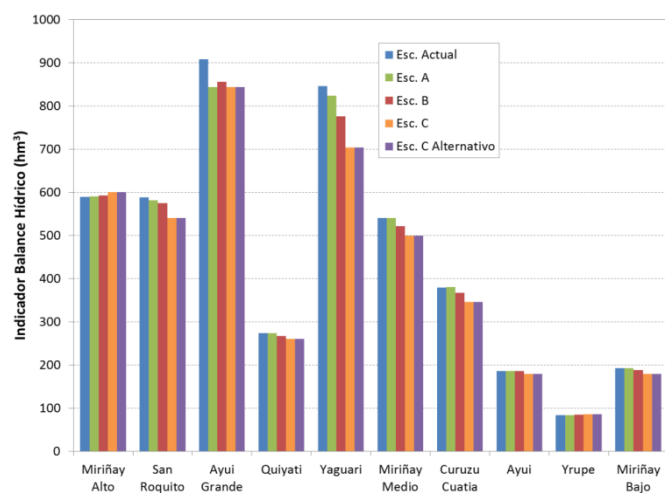


b) Área forestada

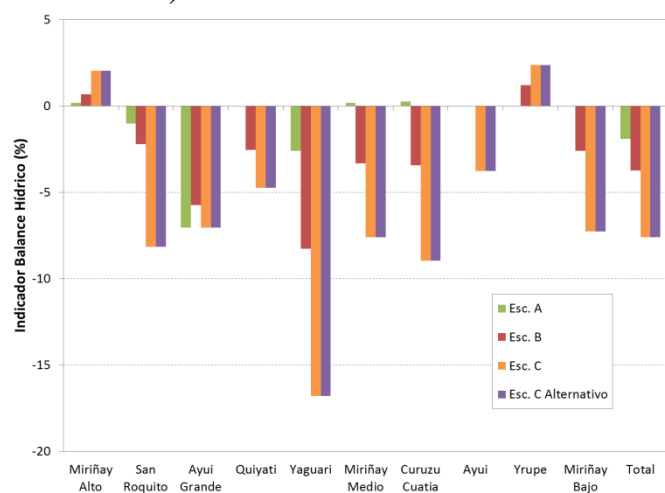


c) Área capturada por embalsamiento

Figura 8.- Áreas relativas intervenidas para escenarios futuros.



a) Indicador de balance hídrico



b) Variación respecto del escenario Actual

**Figura 9.-** Balance hídrico para escenarios futuros.

La Figura 10 resume los cambios operados entre los escenarios Actual y futuros en términos de los aumentos relativos de área agrícola, de área forestal, de área capturada por los embalses (indicador del volumen embalsado) y de indicador de balance hídrico. Para el escenario A (Figura 10a) se observa que:

- Las disminuciones del indicador de balance hídrico (San Roquito, Ayuí Grande y Yaguari) se deben al incremento de la cantidad de presas.
- Los pequeños incrementos para 3 de las subcuencas (Miriñay Alto, Miriñay Medio y Curuzú Cuatía) se deben al incremento del área agrícola.
- En dos subcuencas (Ayuí y Miriñay Bajo) los efectos contrapuestos de la agriculturización y la forestación se compensan.
- El gran incremento de la forestación en una subcuenca (Quitayí) no es suficiente como para producir un cambio notable en el indicador de balance hídrico.

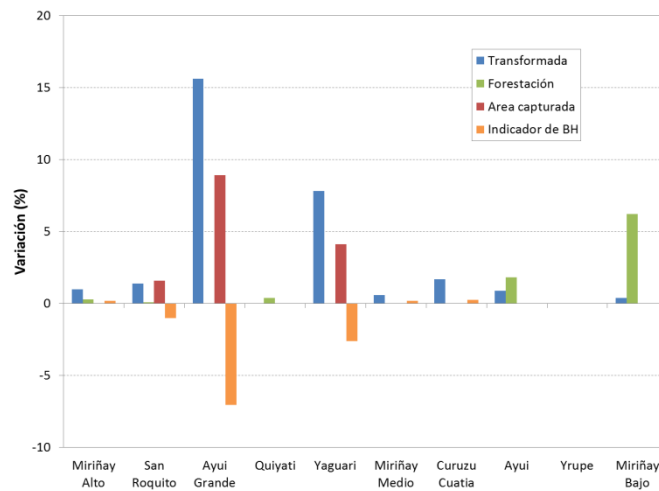
Para el escenario B (Figura 10b) se observa que:

- Las disminuciones del indicador de balance hídrico para 7 subcuencas (San Roquito, Ayuí Grande, Quiyati, Yaguari, Miriñay Medio, Curuzú Cuatía y Miriñay Bajo) se deben al incremento de la cantidad de presas y, en algunas, al aumento del área forestada.

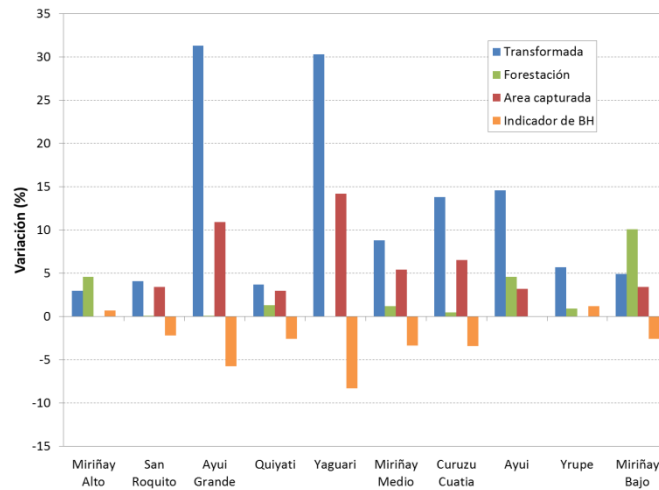


- Los incrementos algo menores en magnitud para otras 2 subcuencas (Miriñay Alto e Yrupé) se deben al incremento del área agrícola.

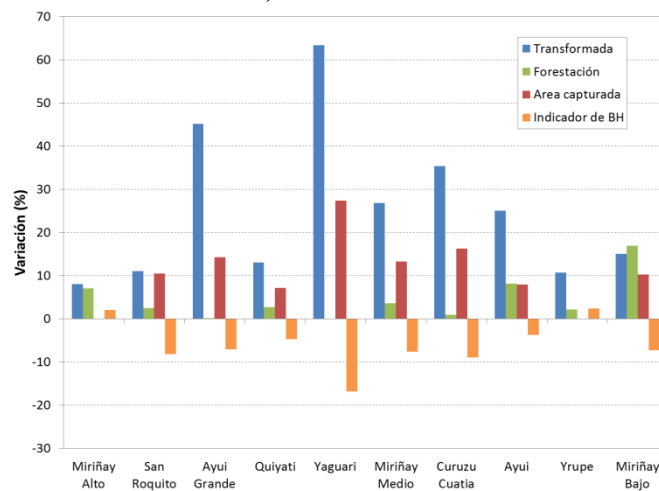
Para los escenarios C y C Alternativo (Figura 10c) se observa una respuesta cualitativamente igual que para el escenario B, sólo que más intensa.



a) Escenario A



b) Escenario B



c) Escenarios C y C Alternativo

Figura 10.- Variaciones de los escenarios futuros respecto del Actual.

## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una metodología basada en la modelación hidrológica que permite establecer la influencia que el cambio de uso de suelo por el incremento de la actividad agrícola produce sobre el balance hídrico anual. En particular, permite determinar el impacto acumulado de distintas intervenciones, capturando eventuales efectos cascada.

En relación al balance hídrico para el problema específico estudiado, la metodología ha permitido establecer que el desarrollo agro-forestal proyectado a corto, mediano y largo plazo en la cuenca del río Miriñay tendrá consecuencias relativamente menores en el balance hídrico anual. En general, habrá una disminución en los volúmenes medios anuales escurridos desde cada subcuenca, con reducciones relativas que no alcanzarán el 10% en la gran mayoría de las subcuencas. Esas reducciones no pondrán en riesgo la sustentabilidad de los ambientes naturales en torno al cauce del río Miriñay. También se determinó que el cambio en el balance hídrico ha sido relativamente menor debido al desarrollo agro-forestal actual respecto de la situación natural.

Si bien no se ha encarado el ejercicio, podrían generarse eventualmente series temporales de precipitación y evapotranspiración potencial representativas de escenarios de Cambio Climático.

## REFERENCIAS

- Alarcón, M.F., Insaurrealde, J.A.** (2011). "Recursos hídricos y aprovechamiento de la cuenca del río Miriñay, provincia de Corrientes, Argentina", *Contribuciones Científicas GÆA* (Sociedad Argentina de Estudios Geográficos), Vol. 23. 21-36.
- Alarcón, M.F.** (2013). "Aproximación al análisis de la capacidad de acogida del territorio para el desarrollo de la actividad agrícola: el caso de la cuenca del río Miriñay, provincia de Corrientes (Argentina)", *XIV EGAL*, Perú.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.** (2006). "Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*, Roma.
- Bennett, T.H. and Peters, J.C.** (2000). "Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)", *Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, Water Resources 2000*, Rollin H. Hotchkiss, Michael Glade - Editors, July 30 – August 2, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Jorgensen, G.S., Solomon, K.H. and Cervinka, V.** (1993). *Agroforestry systems for on-farm drain water management*, Fresno, CA: California State University, Center for Irrigation Technology.
- López Avendaño, J.M.** (2007). *Irrigación y Drenaje. Unidad III: Necesidades Hídricas de los Cultivos*. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Sinaloa, Mexico.
- Ven Te Chow** (1994). *Hidrología Aplicada*, Maidment Mays.
- Zamanillo, E.A.** (2009). *Tormentas de diseño para la Provincia de Entre Ríos*, Dirección de Hidráulica de Entre Ríos y Facultad Regional Concordia de la Universidad Tecnológica Nacional.