



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería Agrícola

Programa de Magister en Ingeniería Agrícola con Mención en Recursos Hídricos

Evaluación de la vulnerabilidad climática de la Cuenca del Rio Limarí usando un modelo semidistribuido



JORGE ANDRES ESPINOSA MARIN

CHILLAN-CHILE

2011

Profesor Guía: .Dr. José Luis Arumí Ribera

Departamento de Recursos Hídricos,

Facultad de Ingeniería Agrícola

Universidad de Concepción

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DE LA CUENCA DEL
RIO LIMARÍ USANDO UN MODELO SEMIDISTRIBUIDO SWAT**

COMISION EVALUADORA

Profesor Guía

José Luís Arumí Rivera
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Profesor Co-Guía



Diego Rivera Salazar
Ingeniero Civil, Doctor
Profesor Titular

Evaluador Externo

Alejandra Stehr Gesche
Ingeniera Ambiental, Doctora
Profesora Asistente

Evaluador Externo

Hamil Uribe Cifuentes
Ingeniero Civil, Doctor
Instituto Nacional de
Investigaciones
Agropecuarias

Director (s) de Posgrado

Mario Lillo Saavedra
Ingeniero Civil, Doctor
Profesor Titular

AGRADECIMIENTO

El autor deja constancia expresa de sus sinceros agradecimientos a todos y cada una de las personas, quienes de alguna forma colaboraron en la implementación, desarrollo y conclusión de esta tesis.

A mi Director:

Ph.D. José Luis Arumí Rivera por su apoyo incondicional y guía en el transcurso de la investigación.

A mis Asesores:

Dr. Hamil Uribe Cifuentes, Dr. Diego Rivera Salazar, Dra. Alejandra Stehr, por su constante esfuerzo en los aportes realizados para que esta investigación tenga un feliz término.

Al proyecto “Evaluación de los Cambios en la Productividad del Agua frente a Diferentes Escenarios Climáticos en Distintas Regiones del Cono Sur” el cual es financiado por el FONTAGRO Y PROCISUR

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA - Quilamapu) por poner a disposición las instalaciones donde se realizó toda la investigación.

A Dios y mi familia Celia, Christian, Silvia, Elías, Martina, por siempre ser la fuerza y el apoyo en los más duros momentos, gracias por sus palabras de ánimo.

A mi hija, Erín Danahe Espinosa Cabezas, aunque no te tengo a mi lado eres la luz, fuerza y energía que me ayuda a levantarme todos los días y ser mejor, en especial para ti, es esta nueva meta concluida.

A mi Padre Elías Arturo Espinosa Chiriboga, por que se que desde el cielo me cuidas me ayudas y me bendices.

A mis Abuelos Eduardo Marín y Teresa Vera, se que sus oraciones siempre me ayudaron en todo mi camino recorrido.

*Lánzate a conquistar las cimas en
ellas está dispuesta para ti la*

“libertad”

(Anónimo)



INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCION	3
MATERIALES Y METODOS.....	5
Área de estudio	5
Materiales	6
El modelo SWAT	7
Metodología	8
Taxonomía de suelos.....	8
Generación de geomorfología de suelos	8
Calibración y Validación de la modelación Hidrológica	9
Generación de escenarios	9
Índices de Vulnerabilidad	10
RESULTADOS	12
Delimitación de subcuencas.....	12
Calibración y validación del modelo SWAT	12
Análisis de vulnerabilidad.....	15
DISCUSION DE LOS RESULTADOS	18
CONCLUSIONES	19
LITERATURA CITADA.....	21

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ubicación de la Cuenca hidrográfica del Limarí con las subcuencas en estudio.....	7
Fig. 2. Calibración y Validación (resultados mensuales) para las subcuencas del río Limarí.....	14
Fig. 3. Gráficos de dispersión para caudal simulado respecto al caudal observado en subcuencas del río Limarí. (a) trimestre: octubre, noviembre, diciembre. (b) trimestre: enero, febrero, marzo.....	14
Fig. 4. Vulnerabilidad promedio para las diferentes subcuencas en estudio del río Limarí.....	16
Fig. 5. (a) Caudal promedio anual en los distintos años para las diferentes subcuencas en estudio, (b) Índices de vulnerabilidad en los distintos años para las subcuencas en estudio del río Limarí.....	17

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clase, Rango y descripción de pendientes del área de estudio.....	8
Tabla 2. Categorías del índice de vulnerabilidad.....	11
Tabla 3. Subcuencas en estudio del río Limarí con sus respectivas aéreas de cultivo..	12
Tabla 4. Indicadores estadísticos (caudales medios mensuales) para las etapas de calibración y validación para las diferentes subcuencas del río Limarí.	13



VULNERABILIDAD DEL RECURSO HIDRICO RESPECTO A ACTIVIDADES
AGRICOLAS EN DIFERENTES SUBCUENCAS DEL RIO LIMARÍ

VULNERABILITY OF WATER RESOURCES AS TO AGRICULTURAL
ACTIVITIES IN DIFFERENT SUBBASIN OF THE LIMARÍ RIVER

Jorge Espinosa^{1*}, Hamil Uribe², José Arumí¹, Diego Rivera¹, Alejandra Stehr³

RESUMEN

La cuenca del Río Limarí ha experimentado constante incremento en la superficie de producción agrícola, lo que ha ocasionado alteraciones en el comportamiento de la oferta y demanda del recurso hídrico, sin olvidar la incerteza existente por la variabilidad climática y cambio climático. Por lo anterior se deben tomar medidas para que el sistema pueda adaptarse a estos cambios o tomar medidas que las puedan frenar, por estas razones es necesario el uso de herramientas, que permitan la toma de decisiones, los modelos hidrológicos, son adecuados para representar la realidad y así poder simular el efecto de cambios inducidos (escenarios) en la disponibilidad de agua ante la presión del incremento de la superficie agrícola. El objetivo de este trabajo será analizar la vulnerabilidad en la respuesta hidrológica de una cuenca frente a un escenario de incremento en la superficie agrícola. Los resultados obtenidos indican que las subcuencas en estudio presentan vulnerabilidad moderada a media ante el incremento de la superficie de cultivo, que puede verse incrementada en los diferentes años con déficit hídricos mayores.

Palabras Claves: SWAT, balance hídrico, escenarios de cambio, evapotranspiración.

ABSTRACT

The watershed Limarí river has experimented a constant increment in the surface agricultural, which has led to changes in the behavior of supply and demand of water resources, not to mention the uncertainty existing for the climate variability and climate change, therefore steps should be taken so that the system can adapt to these changes or measures that can halt, for these reasons it is necessary to use tools that allow take decision, the hydrological models, are adequate to represent reality so we can simulate the effect of induced changes (scenarios) on the availability of water under pressure from increased agricultural area. The objective of this work is to analyze the vulnerability in watershed hydrological response against a backdrop of increasing the agricultural area. The results indicate that the sub watersheds under study present the a moderate to medium vulnerability to the increase in cultivation area, which can be increased in different years with higher water deficit.

Key words: SWAT, water balance, change scenarios, evapotranspiration.



INTRODUCCION

La gestión de los recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas es importante, dado que la escasez de agua puede causar desequilibrio entre los procesos biofísicos y sociales. Por lo anterior es necesario evaluar y cuantificar estas alteraciones para determinar la vulnerabilidad del sistema, vinculado: al medio ambiente, hábitat de flora y fauna, aspectos socio-culturales y las posibilidades de interacción entre ellos, (FAO, 2005).

El concepto de vulnerabilidad, se define actualmente como “la condición en la cual los asentamientos humanos o actividades antrópicas se encuentran en peligro, en virtud de su proximidad a una amenaza o exposición a un evento de riesgo (fenómeno natural)”. Por esta razón reducir la “vulnerabilidad” implica reducir el “riesgo” y reducir el “riesgo” implica reducir la probabilidad de posibles “desastres”. (FAO, 2005). Por otra parte, instituciones como el Departamento de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas (DHA por sus siglas en inglés) consideran vulnerabilidad a un sistema con un grado de pérdida (de 0 % a 100%) resultado de un fenómeno potencialmente dañino (DHA, 1992)

Así la vulnerabilidad está determinada por la habilidad de un sistema para anticiparse, resistir y recobrase de un evento específico. Varios estudios de vulnerabilidad, advierten los efectos de la escases de agua en sistemas frágiles y sus consecuencias en el ciclo hidrológico, (Vicuña, et al., 2008; AEET, 2008; Ravindranath et al, 2011; Mikko et al 2005; Secunda et al, 1998; Takeuchi, 2009). También se hace referencia a las consecuencias del crecimiento urbano no planificado y de la expansión de la frontera agrícola, sobre el uso de los recursos hídricos y su consecuencia en un modelo de desarrollo ecológicamente insostenible (Pérez - Carrera et al. 2010).

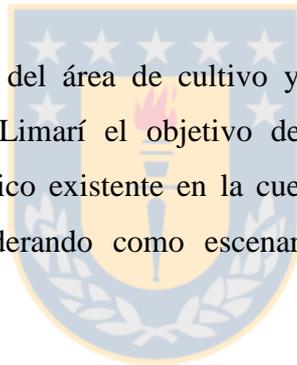
El sistema hidrográfico formado por el río Limarí y sus afluentes es el más importante del Norte Chico desde el punto de vista agrícola, pues sus aguas riegan más de 70.000 ha, incluyendo aquellas que se sirven de los embalses La Paloma, Cogotí y Recoleta (DGA, 2004). Esta cuenca forma el sistema interconectado de embalses más grande de Chile, permitiendo una adecuada regulación y manejo del recurso hídrico. Como resultado de su operación se tiene el desarrollo económico con vocación exportadora lo cual tiende a provocar un desequilibrio entre la oferta y la demanda del agua por su

incremento en la superficie de producción, lo que atenta contra la sostenibilidad del sistema (Ferrando, 2002).

Esta realidad se ve reflejada en el catastro frutícola efectuado en la región de Coquimbo, en el año 2005 por el Centro de Información de Recursos Naturales, donde indica que existe 21.462 hectáreas de cultivo para ese año lo que significa un incremento del 51.7% respecto a la última medición ejecutada el año 1999 (CIREN, 2005).

En la actualidad se pueden encontrar varios estudios de cambio climático aplicados a la cuenca del Río Limarí, respecto a la disponibilidad del agua para consumo, considerando diferentes escenarios de temperatura, precipitación y emisión de gases, los que intentan explicar cuáles serían los cambios futuros y de acuerdo a estos, las medidas de adaptación se deberían aplicar para evitar riesgos y desastres además de cuantificar la vulnerabilidad del sistema (DGA. 2004, Alfaro, et al., 2002, Vicuña., et al., 2008, Parga, F. 2002).

Dado el incremento constante del área de cultivo y la importancia económica que representa la cuenca del río Limarí el objetivo de este estudio es cuantificar la vulnerabilidad del recurso hídrico existente en la cuenca del Río Limarí mediante la modelación hidrológica considerando como escenario futuro el incremento de la superficie agrícola en un 15 %.



MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

La cuenca del río Limarí (Figura 1), se ubica en la Región de Coquimbo, se extiende aproximadamente entre los $30^{\circ} 15'$ y $31^{\circ} 20'$ de latitud sur, abarca una superficie aproximada de 11.800 km^2 . La cuenca conformada por la unión de los ríos Grande y Hurtado, los cuales nacen en partes de la cordillera donde las cumbres alcanzan en promedio hasta los 4500 m y reciben una abundante precipitación nival, que puede ir desde los 300 a más de 650 mm promedio anual (MOP, 2004). La cuenca tiene un régimen pluvio – nival en el semestre de Abril – Septiembre y el aporte durante el resto del año está dado por el flujo base y los deshielos producidos en las subcuencas altas sin determinarse aun la proporción relativa de estos componentes.

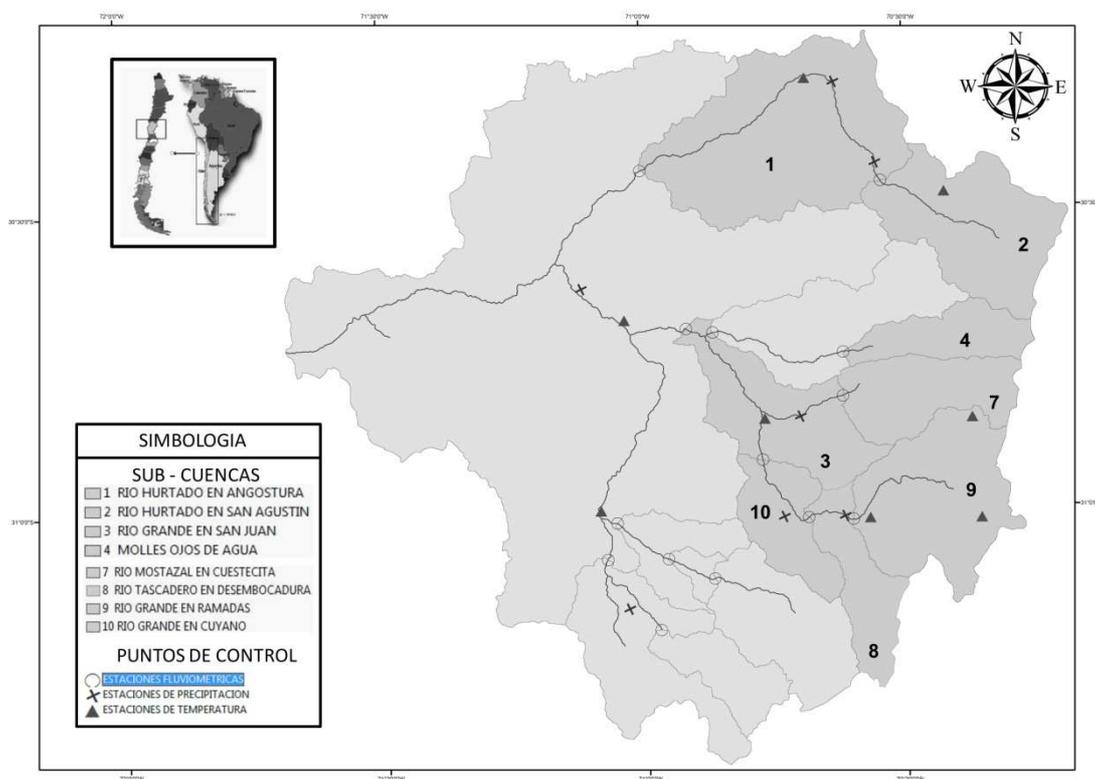


Fig. 1. Ubicación de la Cuenca hidrográfica del Limarí con las subcuencas en estudio.

Fig.1. Location the watershed Limarí river and it's subbasins.

El río Hurtado constituye el único y gran dren de la parte norte de la cuenca del Limarí. En su curso inferior se encuentra embalse Recoleta, con capacidad útil de 100 millones de m^3 . El río Grande recibe una serie de afluentes, entre los cuales cabe mencionar el río Rapel, río Mostazal y el río Guatulame. El escurrimiento del Guatulame está regulado

por el embalse Cogotí de 150 millones de m³ de capacidad y en la confluencia del río Guatulame con el río Grande se encuentra el embalse la Paloma con un volumen de regulación de 750 millones de m³. A partir de la confluencia de ambos toma el nombre de río Limarí, el que luego de recorrer alrededor de 60 km desemboca al mar en la localidad denominada Punta Limarí. (MOP, 2004).

EL principal uso consuntivo del agua en la cuenca del Limarí es para riego, con aproximadamente 7398 usuarios del agua, los cuales administrativamente conforman 647 organizaciones (633 Comunidades de agua, 8 Juntas de Vigilancia y 6 Asociaciones de Canalistas) que tienen por objetivo tomar las aguas del canal matriz y repartirlas entre los usuarios titulares de los derechos a demás de construir, explorar y conservar el recurso hídrico (León et al., 2006). La demanda de a riego en la cuenca correspondiente al año 1997 fue de 724 millones de m³ / año, considerando la asignación única de derechos de agua es de 1 L/s para una hectárea por usuario. Considerando que en el futuro se proyecta un aumento en la tecnología y eficiencia de los sistemas de riego de frutales y viñas pisqueras se puede estimar que para el año 2017 la demanda alcanzaría los 747 millones de m³ / año. (DGA, 2005).

Entre los cultivos frutícolas encontrados destacan por la superficie de cultivo el almendro (*Prunus amygdalus L*), cítricos (*Citrus spp.*), nogal (*Juglans Regia*), vid (*Vitis nifera*), durazno (*Prunus pérsica*), olivo (*Olea europea*), palta (*Persea americana*).

Materiales

En la cuenca del Limarí la Dirección General de Aguas (DGA) de Chile posee una red de monitoreo hidrometeorológico compuesto, de precipitación (12), temperatura (10) y fluviometría (15), la ubicación se presenta en la figura 1, luego de ser evaluada la información disponible se estableció como periodo de análisis los años 1978 a 2008, pues este periodo de tiempo posee la mayor calidad de información y periodos comunes para las variables antes mencionadas.

La información de series de suelos abarca un 25 % del área total, por lo que se generó, los tipos de suelo para el área faltante a partir de información base como es: la geomorfología de suelos, modelo digital de terreno SRTM 90M versión 4.1 (CGIAR, 2011), el documento agrologico para la IV Región (CIREN, 1997) y el estudio frutícola realizado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 2005).

El modelo SWAT

Basado en el clima, las características topográficas de la cuenca del río Limarí y la disponibilidad de datos de ingreso, se optó por la utilización de un modelo semidistribuido. Para este propósito SWAT es un modelo adecuado, dado que fue desarrollado por el departamento de Agricultura de los EEUU (USDA) para evaluar el impacto del uso de la tierra y el clima en el balance hídrico y es ampliamente usado y validado en varias escalas espacio temporales. (Hernández et al, 2000; Stehr et al 2008, Stehr et al 2009, Stehr et al 2010a, Stehr et al 2010b, Abu El-Nasr et al., 2005; Eckhardt 2005; Gosain et al., 2005; Govender & Everson 2005; Cao et al., 2006; Tripathi et al., 2006). Por otra parte (Muttiah and Wurbs, 2002) usaron y validaron SWAT en regiones de clima semiárido.

La documentación teórica del modelo aplicado en detalle se podrá encontrar en la guía de usuario versión 2005 (Neitsch *et al*, 2005a; 2005b), incluyendo, documentación sobre los parámetros y la guía de uso de la interface gráfica se encuentra en Winchell et al., (2010)

SWAT es un modelo semidistribuido, físicamente basado, que tiene procesos, como: escorrentía, flujo lateral, cobertura nival, infiltración, etc (Chaponniere, et al. 2007). Como principio de cálculo considera la conservación de la masa (balance de agua, sedimentos y contaminantes) a escala diaria. (Samper, 2008).

El modelo se basa en la ecuación general de balance hídrico

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{dias} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Donde: SW_t es el contenido de agua final (mm), SW_0 el contenido inicial de agua, R_{dias} la Precipitación, Q_{surf} escorrentía superficial, E_a la evapotranspiración, W_{seep} agua almacenada en el suelo no saturado, Q_{gw} el flujo base.

La subdivisión de la cuenca contempla la posibilidad de dividir una cuenca en subcuencas y éstas a su vez en Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU), que son zonas de parámetros homogéneos, en cuanto a tipos de suelo, usos de suelo y pendientes, permitiendo al modelo reflejar diferencias en evapotranspiración por tipos de suelos y cultivos, la escorrentía superficial calculada mediante el método de Curva Número, los sedimentos y los nutrientes transportados, cada parámetro es calculado por separado en cada HRU y se suman para tener el total de la cuenca. (Neitsch *et al*, 2005).

Metodología

Taxonomía de suelos

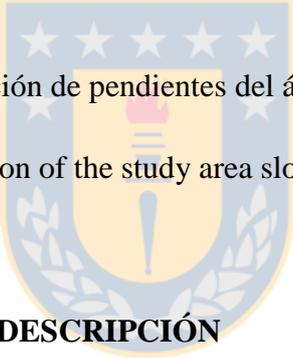
Para la definición de fases o variaciones de suelos se utilizan parámetros que se encuentran separados en rangos, los parámetros son: Profundidad del suelo, textura superficial, topografía, pedregosidad, rocosidad superficial, erosión, clases de drenaje, inundación, alcalinidad, salinidad. El criterio de clasificación se obtendrá del estudio agrologico de la IV región (CIREN, 1997).

Generación de geomorfología de suelos

La geomorfología es el estudio de las formas de superficie terrestre y tiene por objeto clasificar y explicar todas las formas de relieve (VILLOTA, 1991). Permite conocer su pendiente, dentro del espacio geográfico, lo que determina que existan aéreas con similares potencialidades y se las pueda dotar de igual manejo (MORENO, 2001). El criterio de clasificación de pendientes simples se obtendrá del estudio agrologico de la IV región (CIREN, 1997)

Tabla 1. Clase, Rango y descripción de pendientes del área de estudio

Table 1. Class rank and description of the study area slopes.



CLASE	DESCRIPCIÓN	RANGO (%)
1	Plano a casi plano	0 – 1
2	Suave o ligeramente inclinado	1 – 3
3	Moderadamente inclinado	3 – 8
4	Fuertemente inclinado	8 – 15
5	Moderadamente escarpado	15 – 25
6	Escarpado	25 – 45
7	Muy escarpado	Mayor a 45

Calibración y Validación de la modelación Hidrológica

La calibración del modelo consistió en ajustar los datos observados y simulados, mediante el cambio de los parámetros de mayor influencia, para las cuencas en estudio se realizaron análisis de sensibilidad obteniendo los siguientes parámetros a calibrar y fueron flujo lateral, agua subterránea, escorrentía superficial, balance de agua (Van Grienseven et al., 2006; Galván, 2007).

La validación del modelo consistió en medir la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación de caudales calculados y observados en un periodo diferente al de la calibración.(Wagener, et al.,2004)

El desempeño del modelo fue evaluado mediante los índices de Nash-Sutcliffe, Gupta – Kling y el coeficiente de determinación de Pearson`s.

El coeficiente de eficiencia (Nash and Sutcliffe, 1970) determina la eficiencia del modelo, variancia producida del flujo observado y el producido por la simulación, la mejor simulación se encuentra cuando el valor es 1.

El coeficiente de eficiencia de Gupta – Kling es la modificación del coeficiente Nash-Sutcliffe (Gupta et al., 2009). Y el coeficiente de determinación de Pearson`s, es una medida abarca la relación al cuadrado de la dispersión combinada de dos series punto a punto. (Akaike, 1974).

Los eventos de lluvia y caudales son representativos en toda la cuenca, la Dirección Meteorológica de Chile menciona en sus publicaciones en línea que: en el siglo XX, los eventos de El Niño se presentan en los años 1976, 1982 y 1986, con una precipitación deficitaria en un 33% y en los años 1992 y 1997 la precipitación es superior a la normal en un 27% (Escobar & Aceituno, 1998). Por este antecedente la calibración y validación del modelo se realizara en el periodo de años de 1985 a 1992 siendo los cuatro primeros años el periodo de calibración (1985 – 1988) y la validación será en los 4 años siguientes (1989 - 1992).

Generación de escenarios

En el periodo 1962 – 1998, la mayor parte del crecimiento en la producción agrícola se debió a la revolución verde. En los países desarrollados se espera mantener este incremento asociado al aumento de la productividad (69%), intensidad del cultivo (12%) y aumento de aéreas de cultivos (19%). La mayor parte de la producción agrícola

será en áreas regadas donde tres cuartas partes se encontrara en países en vías de desarrollo. Durante el periodo mencionado el regadío creció a nivel mundial un 2 % anual, resultando durante de ese periodo un incremento de 100 millones de hectáreas lo que indica que el área de riego se duplicó. Este ritmo de crecimiento de las áreas de producción agrícola no continuará por muchas razones. La mayoría de analistas estiman que la tasa de incremento será mucho menor, en el periodo 1998 – 2030, la FAO determina que en ciertos países existirá un incremento 0.6 % de tasa anual, lo que representa aproximadamente un 23 % de incremento del área de riego con fines productivos, para 47 países entre ellos los países sudamericanos ubicados al Océano Pacífico (FAO, 2002).

En la cuenca del Limarí, cuando se constituyeron los derechos de agua en el año 1928, una acción correspondía a la cantidad de agua necesaria para regar un cultivo tipo en una superficie de una hectárea (actualmente una acción representa 1 L/s). A, la fecha han ocurrido pocas transacciones de agua con derechos definitivos, especialmente porque el agua es escasa y tiene un alto costo. Sin embargo desde que el código de Agua (1981) fue aprobado han existido de parte de los pequeños agricultores y comuneros venta de sus derechos, (León et al., 2006) siendo el mercado de agua con derechos eventuales (periodo de 1 año) los que llegan a tener alta aceptación. Por esta razón se genera el traspaso de importantes volúmenes de agua entre las asociaciones, que pueden variar en un rango del 14% al 45% dependiendo de la temporada, siendo las mayores transacciones de agua en los periodos con déficit altos de agua donde se expresa los eventos La Niña. (Vicuña et al., 2001)

De acuerdo al análisis sobre las demandas de agua para riego y su incremento según la superficie cultivada(FAO, 2002), las condiciones sobre el mercado dinámico del agua que existe en la cuenca del Limarí (Domper, 2009 & Vicuña et al., 2001), el catastro frutícola (CIREN, 2005) y la sociabilización con expertos (comunicación personal, Ovidio Melo, 2011) se plantea un escenario en el cual se incrementará la superficie de producción agrícola en un 15 % y se evaluará el efecto sobre los caudales anuales disponibles en las subcuencas.

Índices de Vulnerabilidad

Con el fin de evaluar el efecto entre la oferta hídrica y las condiciones de demanda para las distintas subcuencas, con el escenario planteado, fueron calculados índices de

vulnerabilidad (ecuación 2). Donde se compara la diferencia existente del caudal anual promedio histórico vs el caudal anual promedio obtenido del escenario planteado en cada una de las subcuencas en estudio. La clasificación empleada para categorizar este índice se encuentra recomendado por la Organización de Naciones Unidas (IDEAM. ONU. MDGIF., 2009), que es una adaptación de la metodología propuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM,2008).

$$IV = \frac{(S-E)}{S} * 100 \quad (2)$$

Donde, IV es el índice de vulnerabilidad; S es el valor de condición histórica con el que el modelo fue calibrado y validado; E son los valores de esorrentía obtenidos con el escenario de incremento de superficie agrícola.

El índice obtenido por subcuenca, representa la posición de cada área en función de la vulnerabilidad, los indicadores utilizados y su peso en la evaluación se los podrá identificar de acuerdo a la clasificación propuesta (tabla 2).

Tabla 2. Categorías del índice de vulnerabilidad.

Table 2. Categories for the vulnerability index.

CATEGORIA	PORCENTAJE	SIGNIFICADO
BAJO	< 10%	No se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico, en términos de cantidad de agua
MODERADO	10 - 20 %	La disponibilidad de agua se puede convertir en un factor limitador del desarrollo. Se debe implementar un mejor sistema de monitoreo, desarrollar proyecciones de recurso a corto y largo plazo
MEDIO	20 - 40%	La oferta hídrica llega al máximo para atender en forma adecuada la demanda hídrica. Es necesario el ordenamiento territorial de la cuenca e implementar corrección inmediata en la reglamentación de las corrientes y usos de agua. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia.
ALTO	> 40%	Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima en intervenir y controlar la oferta y demanda. Es insuficiente la oferta hídrica para atender la demanda de agua por sectores productivos y se restringe el desarrollo económico. Se requiere fuerte inversión económica para mejorar la eficiencia del sistema en los sectores productivos y abastecimientos de agua potable.

RESULTADOS

Delimitación de subcuencas

Se delimitaron 15 subcuencas, de las cuales dada la disponibilidad de información se presentan resultados para 7 de ellas. Cabe mencionar que la delimitación de las subcuencas se realizó considerando las estaciones fluviométricas que existen la zona de estudio (figura 1 y tabla 3).

Tabla 3. Subcuencas en estudio del río Limarí con sus respectivas áreas de cultivo.

Table 3. Subbasins of the study the Limarí River with their respective growing areas

SUB-CUENCAS	ESTACION FLUVIOMETRICA	AREA (km ²)	SUPERFICIE CULTIVADA (ha)
1	RIO HURTADO EN ANGOSTURA	1138.24	1528
2	RIO HURTADO EN SAN AGUSTI	6.15	150
3	RIO GRANDE EN SAN JUAN	512.77	222
4	MOLLES OJOS DE AGUA	0.25	60
7	RIO MOSTAZAL EN CUESTECITA	391.73	631
9	RIO TASCADERO DESEMBOCADURA	691.61	160
10	RIO GRANDE EN RAMADAS	293.78	371

Calibración y validación del modelo SWAT

Para evaluar el comportamiento del modelo en la fase de calibración y validación se utilizaron los test hidrológicos antes mencionados. La tabla 4 muestra los valores obtenidos al aplicar los distintos índices estadísticos, mientras que la figura 3 presenta el análisis gráfico de las series de caudales observadas versus las simuladas. Se aprecia la concordancia entre los caudales observados y los caudales simulados. Los resultados antes descritos indican un buen desempeño general del modelo lo cual se ve representado en cada una de las subcuencas en estudio, en general los resultados obtenidos son satisfactorios.

Tabla 4. Indicadores estadísticos (caudales medios mensuales) para las etapas de calibración y validación para las diferentes subcuencas del río Limarí.

Tabla 4. Performance indicators for calibration and validation stages for different river basins Limarí

	CUENCA 1		CUENCA 2		CUENCA 3		CUENCA 4		CUENCA 7		CUENCA 9		CUENCA10	
	Calibración	Validación												
R²	0.92	0.79	0.88	0.72	0.90	0.87	0.81	0.73	0.91	0.88	0.77	0.96	0.74	0.85
NASH	0.91	0.78	0.79	0.63	0.84	0.86	0.88	0.85	0.83	0.81	0.73	0.96	0.82	0.82
KGE	0.89	0.88	0.84	0.89	0.73	0.86	0.80	0.76	0.77	0.62	0.89	0.94	0.84	0.82

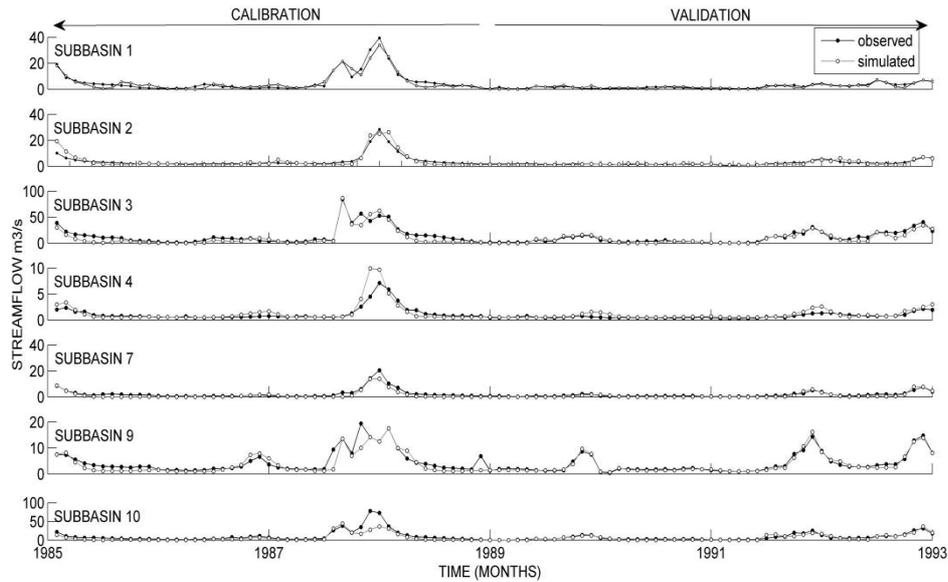


Fig. 2. Calibración y Validación (resultados mensuales) para las subcuencas del río Limarí.

Fig. 2. Calibration and Validation (monthly results) for the Limarí river basins.

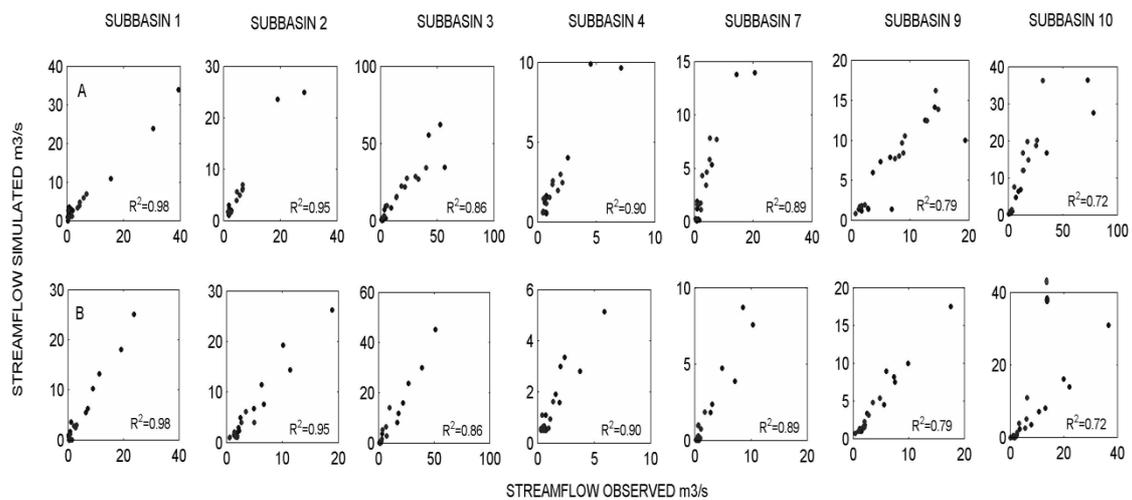


Fig. 3. Gráficos de dispersión para caudal simulado respecto al caudal observado en subcuencas del río Limarí. (a) trimestre: octubre, noviembre, diciembre. (b) trimestre: enero, febrero, marzo

Fig. 3. Scatter plots for simulated flows (calibration and validation) against observed flows for the Limari's subbasins. (a) Quarter: October, November, December. (b) Quarter: January, February, March.

En la figura 3_a se puede apreciar la variabilidad existente entre los valores observados y simulados, calibrados y validados respectivamente, en el trimestre (octubre, noviembre, diciembre) existe buena simulación de los caudales, cabe mencionar que en esta temporada la demanda hídrica incrementa progresivamente, por la evapotranspiración, ya que los diferentes cultivos existentes en la zona y en su gran mayoría al ser de hoja caduca usan el fotoperiodo o el incremento de la temperatura para predecir la llegada de la primavera y comenzar la temporada de producción por ende aumenta la evapotranspiración. El modelo tiene un mejor desempeño en el trimestre de estiaje o verano (Figura 3_b) donde se incrementa la demanda del recurso hídrico ya que la producción agrícola encuentra su máximo de producción.

Se debe mencionar que en los trimestres que corresponden a otoño e invierno las demandas del recurso hídrico bajan, la evapotranspiración disminuye paulatinamente ya que las especies vegetales comienzan su etapa de dormancia predictiva que tiende a estar íntimamente relacionada con las condiciones ambientales y ocurre cuando un organismo entra en la fase de dormancia antes de la llegada de las condiciones adversas (invierno), se debe mencionar que la finalidad de esta investigación es la evaluación del modelo en el periodo de primavera y verano, ya que su buen funcionamiento dará una clara visión sobre las demandas de agua que ocurren en este periodo.

Análisis de vulnerabilidad

Se puede apreciar que las diferentes cuencas se encuentran en una situación de vulnerabilidad ante la presión del incremento de la superficie agrícola, las cuencas denominadas 4 y 7 se encuentran en una categoría media de acuerdo a la categorización de las clases de vulnerabilidad que se observa en la tabla 2, donde la oferta hídrica definitivamente tiene problemas para satisfacer a la demanda y es necesario realizar correcciones inmediatas de uso de agua, Las subcuencas 1,2,3,9 y 10 se clasifican como vulnerabilidad moderada donde la disponibilidad del recurso hídrico se puede convertir en un factor limitador del desarrollo sea de tipo humano o productivo. Por esta razón si se asume que la variabilidad climática durante el periodo 1999 – 2008 se mantendría similar al periodo 2009 – 2020 con el incremento de superficie agrícola en un 15%, algunas modalidades de producción y desarrollo tienen el potencial de aumentar la vulnerabilidad, Por esta razón se necesitan medidas de corrección para que el desarrollo sostenible pueda contribuir a reducir esa vulnerabilidad.

La representación anual de los índices de vulnerabilidad y de los caudales obtenidos con el escenario planteado en cada una de las subcuencas en estudio se pueden apreciar en la figura 6, donde se puede apreciar que los índices de vulnerabilidad incrementan en los años donde existe déficit del recurso hídrico, el periodo evaluado corresponde a 1981 – 2008.

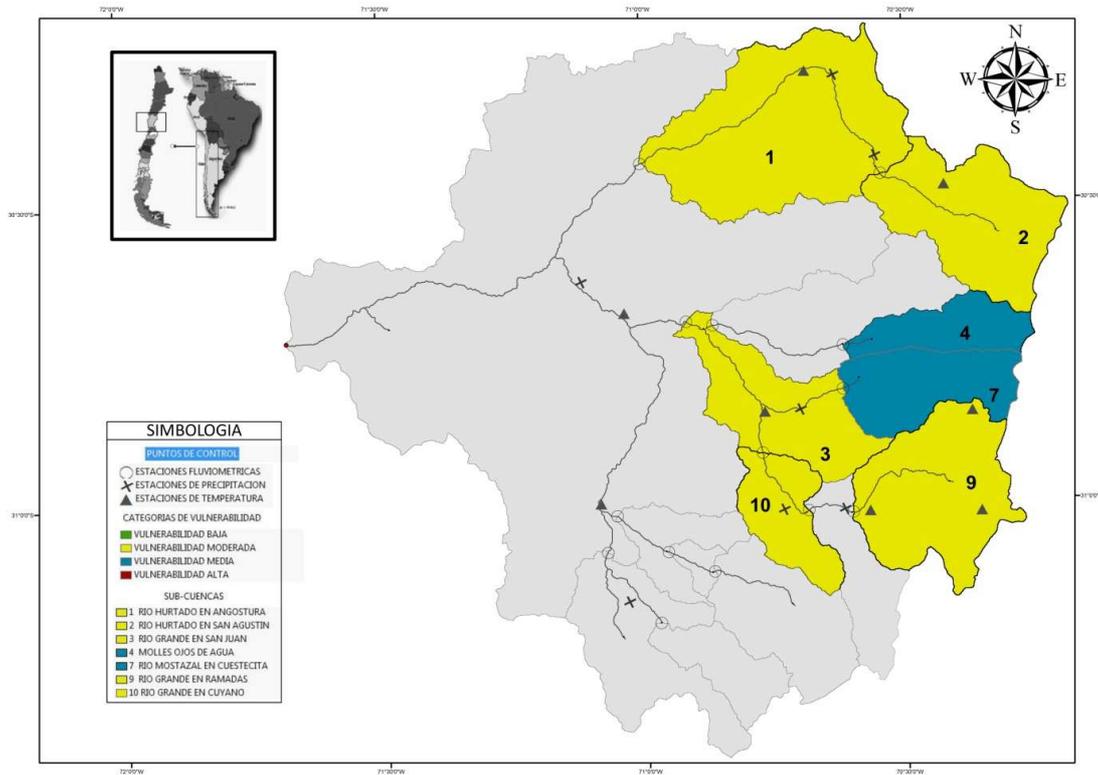


Fig. 4. Vulnerabilidad promedio para las diferentes subcuencas en estudio del río Limarí

Fig. 4. Average vulnerability for the different river basins of the Limarí

En la Figura 4, se puede observar la categorización de vulnerabilidad promedio obtenida para las diferentes subcuencas del río Limarí, las cuales se clasificaron al realizar la comparación de los caudales del modelo calibrado y validado vs. el caudal obtenido del escenario planteado.

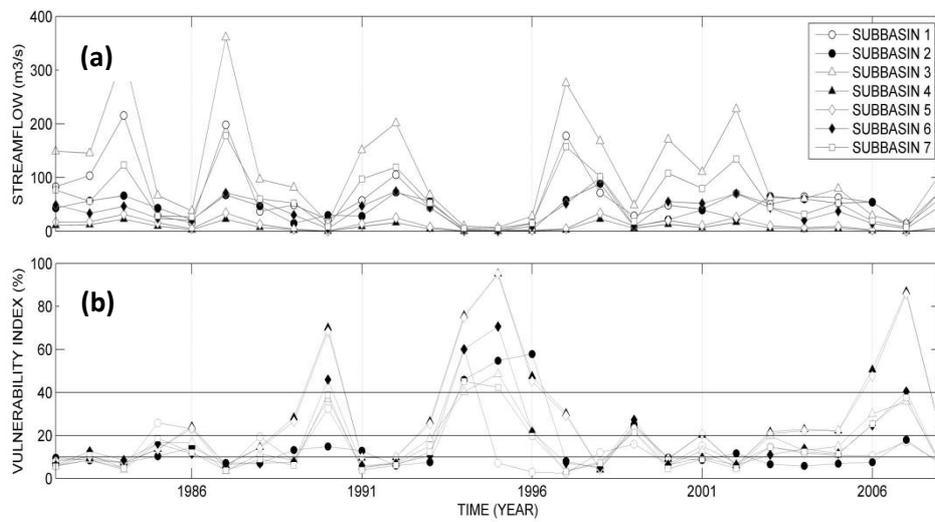


Fig. 5. (a) Caudal promedio anual en los distintos años para las diferentes subcuencas en estudio, (b) Índices de vulnerabilidad en los distintos años para las subcuencas en estudio del río Limarí.

Fig. 5. (a) Average annual flow in different years for different subbasins in study, (b) Index of vulnerability in different years for the Limarí river subbasins under study.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

La vulnerabilidad del recurso hídrico ante la presión de incremento de superficie en las diferentes subcuencas, es variable en el tiempo (figura. 5) y está íntimamente relacionado a la presencia de años secos y húmedos. Este índice se puede ver incrementado como respuesta a un año seco o verse mermado ante la presencia de un año húmedo, lo que concuerda con el mercado de agua que puede variar en los volúmenes de traspaso de agua entre las asociaciones de canalistas en un rango del 14% al 40% en periodos secos como medida estratégica de adaptación. Estas diferencias de los trasposos de agua son consecuencia de la incertidumbre existente con respecto a la variabilidad del clima, como se menciono anteriormente y a detalle, las 7 subcuencas en estudio se encuentran en vulnerabilidad moderada a media según la clasificación propuesta, Es importante señalar que el tiempo de adaptación de un sistema a nuevas condiciones será mayor si las medidas de corrección son pausadas, la rapidez con que el sistema pueda reaccionar, puede considerarse como una medida de capacidad adaptiva, un caso extremo se considera cuando el sistema no puede adaptarse o las medidas correctivas tardaron mucho tiempo por lo cual todo el sistema tenga que cambiar o definitivamente extinguirse (Conde, 2003)

En general la cuenca del Limarí es vulnerable a los posibles incrementos de superficie cultivada y afectada en mayor grado por la variabilidad del clima, que puede forzar la oferta de agua con la demanda existente. Como se menciono anteriormente siendo verdad que no existen o son mínimas las asignaciones permanentes de agua, también se menciona que todavía existe venta de acciones de agua definitivas de los agricultores menores o comuneros, lo cual es aprovechado para incrementar superficie de cultivo.

El modelo SWAT constituye una buena herramienta para reproducir registros de caudales aunque lógicamente la incertidumbre en los resultados puede ser disminuida en medida de que se mejore la calidad de los datos en la información de partida, por lo que se recomienda instalar estaciones meteorológicas en la parte alta de la cuenca en la parte alta es decir sobre los 2500 m para poder obtener información sobre: temperatura precipitación, heliofanía, velocidad de viento. Es necesario mencionar que la cuenca depende netamente del aporte nival por esta razón si existe un mejor control de información sobre la cuenca existirá una visión más amplia sobre lo que sucede en sus diferentes procesos hidrológicos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con respecto a los impactos hidrológicos producidos por el escenario formulado de acuerdo al constante aumento en la superficie de cultivo, evidenciado en el transcurso del tiempo en la cuenca de Limarí, con la aplicación del modelo semidistribuido SWAT calibrado y validado para las diferentes subcuencas, indican que existe vulnerabilidad ante la presión de incremento del área de cultivo y se puede evidenciar en términos de reducción de los caudales para satisfacer las demandas del recurso hídrico que puede estar asociada al incremento de la evapotranspiración, en la etapa de producción de los diferentes cultivos que se desarrollan en estas áreas.

Por tanto, se requiere establecer estrategias de adaptación que permitan continuar el desarrollo de cultivos, se destaca la importancia del riego y la necesidad de mejorar la eficiencia de los usos del agua entre los requisitos para disminuir la vulnerabilidad a los eventos extremos más frecuentes.

En este estudio se presentó a la vulnerabilidad como un enfoque que permite a entender y definir este concepto como la adaptación que debe tener el sistema, sin embargo al momento de diseñar medidas o estrategias de adaptación, se debe tener en cuenta que en su aplicabilidad, influirán distintos factores, como, conflictos de intereses, así como también diferentes o contradictorias visiones o aspiraciones a futuro lo cual influirá directamente sobre el tiempo de reacción del sistema ante condiciones adversas.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se realizó en el marco del proyecto “Evaluación de los Cambios en la Productividad del Agua frente a Diferentes Escenarios Climáticos en Distintas Regiones del Cono Sur” el cual es financiado por el FONTAGRO Y PROCISUR, se quiere dar especial reconocimiento a las personas del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias sede Quilamapu, así como a todas las personas que colaboraron de una forma u otra y no hayan sido mencionados explícitamente.



LITERATURA CITADA

- Abu El-Nasr, A., Arnold, J. G., Feyen, J. & Berlamont, J. (2005) Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrol. Processes* **19**, 573-587.
- AEET Asociación Española de Ecología Terrestre, Tierras secas, desertificación y recursos hídricos, *Ecosistemas* 17 (1): 1 - 4
- Akaike, H. (1974) 'A new look at the statistical model identification', *IEEE transactions on Automotive Control*, AC-19, pp 716 – 723.
- Alfaro C & C, Honores. (2002) Análisis de la disponibilidad del recurso hídrico superficial en los cauces controlados de las cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Obras Civiles. Facultad de Ingeniería.- Universidad de La Serena. La Serena.
- Arnold, J. G. & P. M. Allen.(1999) "Automated methods for estimating base flow and ground water recharge from stream flow records." *Journal of American Water Resources Association* 35(2): 411 - 424.
- Arnold, J. G. Srinivasan, R. Muttiah, R.S. Williams, J. R. (2007) Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model Application. *Journal of the American Water Resources Association*. 8 Jun 2007. Pages 73 – 89
- Cáceres, D., Soto, G., Silvetti, F., Bisio, C. (2010) La expansión de la agricultura industrial en Argentina Central. Su impacto en las estrategias campesinas *Cuadernos de Desarrollo Rural*, vol. 7: 91-119
- Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T. & Fenemor, A. (2006) Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrol. Processes* **20**, 1057–1073.
- CGIAR [en línea] The consortium for Spatial Information CGIAR- CSI <<http://srtm.csi.cgiar.org/>>
- Chaponniere, A. Boulet, G. Chehbouni, A. Aresmouk, M. (2007) Understanding hydrological processes whit scarce data in mountain environment. *Hydrological Processes* 21: 0 – 0.

- CIREN, (1997) Estudio Agrológico IV Región, Descripción de suelos Materiales y Símbolos, Información Recursos Naturales, Publicación 116, Tomo 1
- CIREN, (2005) Catastro Frutícola, Principales resultados, IV Región, Septiembre (REVISTA)
- Conde, C. (2003) Cambio y Variabilidad Climáticos. Dos Estudios de Caso en México. Tesis Doctoral. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México, pp. 1-23.
- Conde, C. (2005) Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: Descripción de un estudio de caso y los retos de las investigaciones actuales, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.157-171
- DHA. (1992) Internationally Agreed Glossary of Basic Terms related to Disaster Management. Ginebra, 81 pp. Disponible en: [http://www.reliefweb.int/rw/lib.nsf/db900SID/LGEL-5EQNZV/\\$FILE/dha-glossary-1992.pdf?OpenElement](http://www.reliefweb.int/rw/lib.nsf/db900SID/LGEL-5EQNZV/$FILE/dha-glossary-1992.pdf?OpenElement)
- Eckhardt, K. (2005) How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrol. Processes **19**, 507-515.
- Escobar, F. Aceituno, P. (1998) Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile Central durante el invierno. Instituto Francés de Estudios Andinos, revista Bulletin de l'IFEA, 27 (3): 753 – 759.
- FAO (2002). Agua y Cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- FAO (2005). Estudio de vulnerabilidad y riesgo para actividades productivas y erosión por tipo de cultivo en la micro cuenca de Piuray –Ccorimarca. Proyecto regional Ordenamiento Territorial Rural Sostenible. Documento de Campo n° 2, Santiago, Chile.
- Ferrando, F. Cuenca del Río Limarí, Chile Semiárido: Aspectos de la oferta y Demanda de Agua. Revista de Geografía Norte Grande, N° 30. 2002. pag 23 - 44

- Galván, L. Olias, M. Fernández de Villarán, R. Domingo – Santos J. M. (2007) Application of SWAT hydrological model to the Meca river watershed (Huelva, Spain). *Geogaceta*, 42
- Gosain, A. K., Rao, S., Srinivasan, R. & Reddy, N. G. (2005). Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrol. Processes* **19**, 673-682.
- Govender, M. & Everson, C. S. (2005) Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. *Hydrol. Processes* **19**, 683-692.
- Gupta S. C. Larson W. E. (1979) Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research* 15(6): 1633 -1635
- Gupta, H.V. Kling, H. Yilmaz, K.K. and Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, Vol 377, pp 80-91.
- Hernandez, M. Miller, S. Goodrich, DC. Goff, BF. Kepner, WG. Edmonds, CM. Jones, KB. (2000) Modeling runoff response to land cover rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment* 64: 285–298.
- IDEAM. ONU. MDGIF.,(2009) Indicadores, tendencias y escenarios hidrológicos para el cambio climático, Programa conjunto de integración de ecosistemas y adaptación al cambio climático. Junio 2009. 12-28
- Knisel, W. G. (1980) CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Rept. No. 26.
- León, A., E. Montaña, R. Fuster, E. Abraham, M. Aravena, R. Garay, H. Insten, M. Lemos, P. León, H. Moya, G. Pastor, M. Salomón, E. Torres, L. Torres y N. Ureta. (2006) Riego y pobreza rural: dos estudios de caso en la región semiárida de Chile y Argentina. *Eval. Usos del Agua en Tierras Secas de Iberoamérica*, 12: 65-92.

- Mikko, J. & Sykes, S. (2002) Recharge Estimation for Transient Ground Water Modeling. *Ground Water* 40 (6) 638-648
- MOP, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, (2004) Diagnostico de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. 131 pp.
- MORENO, J. (2001) Zonificación agroecológica de la cuenca baja del río Guayas. Tesis Ing. Agr. Quito (Ec): Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas. 151p
- Muttiah, RS. Wurbs, RA. (2002) Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model. *Journal of Hydrology* 256: 264–285.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., (1970) River flow forecasting through conceptual models, part 1—a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3), 282–290.
- Neitsch, S. L., J. C. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King (2002^b). Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Neitsch, S. L., J. C. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King (2002^a). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Neitsch, S. L., J. C. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King (2002^b). Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Parga, F. León, A. Vargas, X. Fuster, R. (2002) El Índice de Pobreza Hídrica Aplicado a la Cuenca del Río Limarí en Chile Semiárido.
- Ravidranath, N. Rao, S. Sharma, N. Nair, M. Gopalakrishnan, Rao, A, Malaviya, S. Tiwari R. Sagadevan, A. Munis, M. Krishna, N. Bala, G. (2011) Climate change vulnerability profiles for North East India. *Current Science*, Vol. 101,
- Samper, J. Alvares, D. (2009) Evaluación de los recursos hídricos en la Cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelización semidistribuida con GIS – BALAN. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*, Vol IX

- Secunda, S. Collin, M. Melloul, J. (1998) Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region, *Journal of Environmental Management*. 54 (1): 39 - 57
- Stehr, A. (2008). Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua bajo escenarios de cambio climático para dos subcuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana. 115 pp.
- Stehr, A., Aguayo, M., Link, O., Parra, O., Romero, F. & Alcayaga, H. (2010) Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14: 1963–1977.
- Stehr, A., Debels, P., Arumí, J.L., Alcayaga, H & Romero, F. (2010) Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático, experiencia de dos cuencas del centro-sur Chileno. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1 (4): 37-58.
- Stehr, A., Debels, P., Arumí, J.L., Romero, F. & Alcayaga, H. (2009) Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and MODIS imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin. *Hydrological Sciences Journal*, 54 (6): 1053-1067
- Stehr, A., Debels, P., Romero, F. & Alcayaga, H. (2008) Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal*, 53 (3): 588-601
- Takeuchi, K. (2009) Increasing vulnerability to extreme floods and societal needs of hydrological forecasting *Vulnérabilité croissante aux crues extrêmes et demandes sociales en prévision hydrologique*. *Hydrological Sciences Journal*. 46 (1): 869 - 881
- Tripathi, M. P., Raghuvanshi, N. S. & Rao, G. P. (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrol. Processes* **20**, 1137–1156.

- Van Griensven, A., Meixner, T., Grundwald, S., Bishop, T., Sirinivasan, R. (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal Hydrological*. 324: 10-23.
- Vicuña, S. Cristi, O. Azevedo, L. Baltar, A. (2001) Mercado de agua para irrigación: una aplicación al sistema paloma de la cuenca del Limarí, Chile. Gobierno de Chile; Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Agua, Vida y Desarrollo. Santiago de Chile, IICA, oct. (2001). p.1-12, Ilus.
- Vicuña, S. Garreaud, R. McPhee, J. (2008). Climate Changes Impacts on the Hydrology of a Snowmelt Driven Basin in Semiarid Chile, *Climate Change*
- Villota, H. (1991) Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras, Instituto Geográfico “Agustin Codazzi”, Subdirección de Docencia e Investigación, Primera parte. Santafe de Bogota , D.C. 212 p.
- Wagener, T. Wheeler, H.S. y Gupta H.V. (2004) *Rainfall – Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Cathment*, Imperial College Press, Londres, 306 p.

