

Índice de vulnerabilidad del recurso hídrico con fines de riego en la cuenca hidrográfica del río Naranjo

Index of vulnerability of water resources for irrigation in the basin of Naranjo River

Yoandris García Hidalgo. Facultad de Agronomía, Universidad de Las Tunas, yoandrisgh@ult.edu.cu

Resumen

El análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Naranjo, es un estudio técnico de diagnóstico que aporta información básica y estratégica para el plan de gestión integral del recurso hídrico. Para el estudio, se tomaron seis puntos representativos de la cuenca. La vulnerabilidad se definió en base al empleo de indicadores del régimen hidrológico, identifica y confirma aspectos críticos como la baja capacidad de retención y regulación hídrica, el stress hídrico por disponibilidad per-cápita de agua. La calidad se definió en base a los criterios de FAO y otros indicadores específicos para el riego. El índice de la vulnerabilidad por desabastecimiento se ha incrementado de moderada a alta por la muy baja capacidad de regulación y retención hídrica y el uso moderado del recurso. Las aguas son no aptas para el riego de los cultivos agrícolas, tienen restricciones ligeras a moderadas. Existe peligro de alcalinización de los suelos producto de las concentraciones de bicarbonato en las aguas. Por otra parte el sodio de las aguas puede pasar a la solución del suelo y sustituir al calcio y el magnesio causando la degradación de los suelos. La vulnerabilidad podría acentuarse con el cambio climático, por efecto de la posible reducción en la oferta y por una mayor demanda de agua de las actividades agrícolas de la zona.

Palabras clave: Vulnerabilidad, aptitud para el riego, retención hídrica, stress hídrico cuenca río Naranjo

Abstract

Vulnerability analysis of the Naranjo River basin is a technical diagnostic study that provides basic and strategic information for the integrated management plan of water resources. For the study, six representative points of the basin were taken. Vulnerability is defined based on the use of indicators of the hydrological regime, identifies and confirms critical aspects such as low retention and water regulation, water stress by per capita availability of water. Quality was defined based on the criteria of FAO and other specific indicators for irrigation. The index of vulnerability for scarcity has increased from moderate to high for very low capacity for regulation and water retention and moderate use of the resource. The water is unfit for irrigation of agricultural crops, have slight to moderate restrictions. Risk of soil alkalization product of the concentrations of bicarbonate in the water. Furthermore sodium water can pass into soil solution and replace the calcium and magnesium causing soil degradation. The vulnerability could increase with climate change, due to the potential reduction in supply and increased demand for water for agricultural activities in the area.

Key words: Vulnerability, suitability for irrigation, water retention, water stress Naranjo River Basin

Introducción

El agua es un elemento fundamental para la vida de los seres humanos, está presente en todas las actividades que realizan y hasta hoy no se conoce otra sustancia que pueda sustituirla, por esa razón, se considera que es el recurso que definirá el desarrollo sostenible.

Hay evidencia que los recursos hídricos son vulnerables al cambio climático y que las consecuencias sobre la sociedad y los ecosistemas dependen de las medidas de adaptación (IPCC, 2007; 2008).

El estrés hídrico y los problemas de calidad del agua son los eventos adversos más probables a escala global (IPCC, 2007). Se estima además, una mayor demanda de agua para el riego en los climas cálidos, lo cual puede generar un incremento de la competencia por el uso entre los distintos sectores (Magrin *et.al.*, 2007; Rosenzweig *et.al.*, 2004).

La calidad de las aguas, junto a la cantidad, es uno de los indicadores del componente sistemas ambientales para calcular el índice de sostenibilidad ambiental que considera la habilidad de los países para proteger el medio ambiente en las próximas décadas (Chaves y Alipaz, 2007). Esos indicadores son identificados por las Naciones Unidas para definir el desarrollo sostenible. De ahí la importancia de su estudio en las cuencas hidrográficas.

Es necesario, por tanto, analizar la vulnerabilidad de los recursos hídricos, para cualificar el grado de fragilidad de la fuente con respecto al abastecimiento y a la amenaza de sequía cuando se presentan períodos con condiciones climáticas extremas (IPCC, 2007; Sharma, 2009). La vulnerabilidad se puede abordar evaluando la susceptibilidad de los sistemas hídricos para conservar y mantener su régimen hidrológico actual y determinando la vulnerabilidad de los sectores usuarios del recurso, ante la amenaza de cambios sustanciales en el régimen hidrológico (Salazar, 2008). Esta investigación tiene como objetivo realizar una evaluación de la vulnerabilidad del recurso hídrico con fines de riego en la cuenca hidrográfica del río Naranjo.

Materiales y métodos

La zona de estudio se localiza entre las coordenadas: 20° 39' 00"-21° 01' 00" latitud norte y 76° 36' 30"-76° 52' 30" longitud oeste, en el municipio Majibacoa, provincia Las Tunas, Cuba. Figura I. Su superficie es de 412,8 km², por lo que representa el 7,8 % de la cuenca del río Cauto de la cual es tributaria.

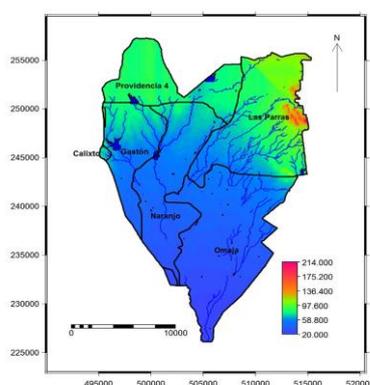


Figura I. Cuenca hidrográfica del río Naranjo

La vulnerabilidad del recurso hídrico fue analizada considerando la susceptibilidad de la cuenca para conservar y mantener el régimen hidrológico actual ante posibles alteraciones por variabilidad climática o por la acción antrópica. Se emplearon los indicadores del régimen hidrológico, sugeridos por el IDEAM, (2010).

Indicadores evaluados

Los indicadores evaluados fueron: índice de retención y regulación hídrica, índice de aridez, el índice de stress hídrico relativo y los indicadores de calidad del agua según las directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego definidos por Ayres y Westcot (1987). La metodología para el cálculo de cada uno de los índices se describe a continuación:

Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH): mide la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de caudales; la interpretación se presenta en la Tabla I. Se calcula a partir de la curva de duración de caudales medios diarios, según la ecuación (IDEAM, 2010):

$$IRH = VP/V_t$$

EC: 1

VP: Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio

V_t: Volumen total representado por el área bajo la curva.

Tabla I: Calificación del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

IRH	Calificación cualitativa	Descripción
>0,85	Muy alta	Muy Alta retención y regulación de Humedad
0,75-0,85	Alta	Alta retención y regulación de humedad
0,65-0,75	Moderada	Media retención y regulación de humedad
0,50-0,65	Baja	Baja retención y regulación de humedad
<0,5	Muy Baja	Muy baja retención y regulación de humedad

Índice de Aridez: representa la dinámica superficial del suelo y evidencia los lugares con déficit o excedentes de agua; es determinado a partir de la evapotranspiración potencial y real, empleando la ecuación (2); la interpretación se presenta en la Tabla II (IDEAM, 2010):

$$I_a = \frac{ETP-ETR}{ETP} \quad \text{EC:2}$$

Donde:

I_a : Índice de aridez

ETP: Evaporación potencial (mm)

ETR: Evaporación real (mm)

Tabla II: Calificación del Índice de aridez

Índice de Aridez	Calificación cualitativa	Descripción
< 0,15	Altos excedentes	Altos excedentes de agua
0,15- 0,19	Excedentes	Excedentes de agua
0,20 – 0,29	Moderado y excedentes	Moderado y excedentes de agua
0,30 – 0,39	Moderado	Moderado
0,40 – 0,49	Bajo	Moderado y deficitario de agua
0,50-0,59	Deficitario	Deficitario de agua
>0,60	Altamente deficitario	Altamente deficitario de agua

Índice de stress hídrico relativo: El programa mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO, ha definido una serie de indicadores para medir el nivel de estrés sobre el recurso que incluye el índice de stress hídrico relativo también conocido como demanda de agua relativa (RWSI)- Tabla III, establece la demanda disponible para uso industrial, doméstico y de agricultura. Se calcula a partir de la siguiente expresión (UNESCO, 2009):

$$RWSI = \frac{D + I + A}{Q} \quad \text{EC: 3}$$

Donde:

Q: suministro de agua- km³/año

D: Demanda de agua para uso doméstico- km³/año

I: Demanda de agua para uso industrial- km³/año

A: Demanda de agua para la agricultura - km³/año

Tabla III: Umbrales del índice de stress hídrico

Índice de Escasez	Calificación cualitativa	Observaciones
> 0,4	Alto	Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico. Es insuficiente la oferta hídrica para atender la alta demanda de agua por los sectores productivos y se restringe el desarrollo económico. Se requieren fuertes inversiones para mejorar la eficiencia de utilización en los sectores productivos
0,2 – 0,4	Medio	La oferta hídrica llega al límite máximo para atender la demanda. Es necesario el ordenamiento de la cuenca y asignar prioridades a los distintos usos.
0,10- 0,2	Moderado	La disponibilidad de agua se puede convertir en factor limitante del desarrollo. Se debe implementar un mejor sistema de monitoreo y seguimiento a largo plazo
<0,1	Bajo	No se experimental presiones sobre el recurso hídrico en términos de cantidad de agua

(UNESCO, 2009; IDEAM, 2008)

Indicadores de calidad de las aguas para el riego

Para determinar la aptitud del agua para el riego se utilizaron los siguientes criterios:

1. Diagrama de Wilcox: para determinar la clasificación de las aguas de acuerdo a sus contenidos de sales solubles totales y de sodio.

2. Salinidad efectiva (SE)¹:

a) Si el $Ca^{2+} > CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$ entonces:

$$SE = \sum (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$$

b) Si el $Ca^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$ pero $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ entonces:

$$SE = \sum Ca^{2+}$$

c) Si el $Ca^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^-$ pero $Ca^{2+} + Mg^{2+} > CO_3^{2-} + HCO_3^-$ entonces:

$$SE = \sum (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

d) Si el $Ca^{2+} + Mg^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^-$ entonces:

$$SE = \sum (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

3. Salinidad potencial (SP):

$$SP = Cl^- + \frac{SO_4^{2-}}{2}$$

4. Relación de Adsorción de Sodio corregida (SARx):

$$SARx = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

5. Porcentaje de Sodio Posible (PSP):

$$PSP = \frac{Na^+}{SE} * 100$$

¹ En todos los casos las concentraciones de los iones se expresan en me.l⁻¹.

6. Coeficiente de irrigación (Ka):

- a) $Na < Cl^-$; el coeficiente viene dado por la expresión: $Ka = \frac{288}{5Cl^-}$
- b) $Cl^- + SO_4^{2-} > Na^+ > Cl^-$ el coeficiente vendrá expresado por: $Ka = \frac{288}{Na^+ + 4Cl^-}$
- c) $rNa^+ > rCl^- + rSO_4^{2-}$ el coeficiente viene dado por: $Ka = \frac{288}{10Na^+ - 5Cl^- + 9SO_4^{2-}}$

7. Índice de saturación de Langelier (IL):

$$IL = pH_{real} - pH_c$$

pH_c : es un valor teórico calculado del pH del agua de riego en contacto con calcio y en equilibrio con el CO_2 de suelo. Se halla en función de los cationes calcio, magnesio y sodio, y los aniones carbonato y bicarbonato (Fuentes, 2003).

Resultados y discusión

Análisis de Vulnerabilidad

La vulnerabilidad del recurso hídrico fue evaluada considerando la susceptibilidad de la cuenca para conservar y mantener el régimen hidrológico. Para interpretar y analizar los procesos hidrológicos y estimar la vulnerabilidad de la cuenca, se emplean indicadores que permiten caracterizar el régimen hidrológico para el período 1990-2013.

Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

El alto coeficiente de variación de las series de caudal que fluctúa desde el 59% en la Red Cal 419, hasta el 91 % en la Red Cal 429, se demuestra la baja capacidad de regulación hídrica de la fuente. El IRH calculado con los caudales simulados (Q Simulados) es ligeramente mayor que el obtenido con los caudales observados (Q Observados).

Tabla IV: Índice de retención y regulación hídrica- IRH. 1990-2013.

RED CAL	IRH (Q Observados)			IRH (Q Simulados)			Categoría IRH < 0,5
	RH promedio	IRHp50	IRH INT	IRH promedio	IRHp50	IRHINT.	
419	0,34	0,25	0,31	0,41	0,30	0,36	Muy bajo
420	0,36	0,22	0,34	0,35	0,23	0,32	Muy bajo
424	0,43	0,32	0,38	0,42	0,30	0,37	Muy bajo
425	0,37	0,26	0,33	0,42	0,31	0,37	Muy bajo
429	0,31	0,24	0,41	0,45	0,30	0,38	Muy bajo

Índice de Aridez

Para el período 1990-2013, los valores medios del índice de aridez, determinados a partir de la evapotranspiración potencial y real se presentan en la Tabla V. En las secciones media-alta y baja de la cuenca se tienen excedentes de aguas; mientras que en secciones altas y media son moderados y con excedentes de agua. El índice de aridez varía de 0,20 a 0,18.

Tabla V. Índice de Aridez 1990-2013

RED - CAL	Índice de Aridez		
	Valor promedio	CV	Categoría
419	0,18	37%	Excedentes
420	0,19	36%	Excedentes
424	0,19	35%	Excedentes
425	0,20	35%	Moderado y excedentes
429	0,20	35%	Moderado y excedentes

Índice de stress hídrico relativo

Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico en tres de la redes en estudio. Estas zonas de producción de cultivos varios son exigentes de alta demanda de agua, demostrando estos resultados la insuficiente oferta hídrica para atender la alta demanda de agua para estos sectores productivos. Este indicador ha influido en gran medida en la reducción del crecimiento vegetativo y por la duración y el momento de aplicación del riego, siendo más sensible durante la fase de crecimiento activo.

Las categorías medio, se identifican en dos zonas. La oferta hídrica llega al límite máximo para atender la demanda. Es necesario el ordenamiento de la cuenca y asignar prioridades a los distintos usos en especial las aguas con fines agrícolas.

Tabla VI. Índice de stress hídrico relativo.

RED - CAL	Índice de Escasez	Categoría
419	0.5	Alto
420	0.6	Alto
RED - CAL	Índice de Escasez	Categoría
424	0.4	Medio
425	0.3	Medio
429	0.5	Alto

Indicadores de calidad del agua (Criterios generales de la FAO).

En la Tabla VII se puede apreciar la composición físico-química de las aguas de las fuentes estudiadas en la cuenca del río Naranjo. Las filas Húmedo y Seco identifican las fechas de muestreo.

Tabla VII. Composición físico-química de las aguas para uso agrícola en la cuenca del río Naranjo.

Variables	Unidades	Período	Muestras					
			I	II	III	IV	V	VI
pH	U	Húmedo	7,52	7,54	7,85	8,03	7,99	7,32
		Seco	8,11	8,25	8,33	8,32	8,05	7,79
Conductividad Eléctrica	dS/m ⁻¹	Húmedo	2,96	2,98	0,71	0,92	0,92	5,51
		Seco	3,81	2,96	1,35	1,15	1,14	1,84
Calcio	me.l ⁻¹	Húmedo	5,80	5,90	1,85	1,75	1,75	28,60
		Seco	4,45	7,05	2,00	2,30	2,00	3,65
Magnesio	me.l ⁻¹	Húmedo	8,43	8,35	0,91	1,82	1,82	19,09
		Seco	4,38	8,51	1,49	1,57	1,32	6,03

Variables	Unidades	Período	Muestras					
			I	II	III	IV	V	VI
Sodio	me.l ⁻¹	Húmedo	18,09	18,61	4,39	5,35	5,35	10,17
		Seco	32,26	12,43	10,22	8,57	11,87	8,57
Potasio	me.l ⁻¹	Húmedo	0,03	0,03	0,20	0,13	0,13	0,15
		Seco	0,03	0,10	0,10	0,15	0,10	0,05
Carbonatos	me.l ⁻¹	Húmedo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Seco	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato	me.l ⁻¹	Húmedo	12,38	12,43	4,59	4,30	4,30	4,87
		Seco	16,18	8,46	8,30	5,21	8,43	6,82
Sulfato	me.l ⁻¹	Húmedo	3,88	3,98	0,58	1,29	1,29	4,63
		Seco	7,54	3,15	1,40	1,63	1,42	2,00
Cloruro	me.l ⁻¹	Húmedo	8,90	12,20	1,94	3,38	3,49	34,87
		Seco	15,10	16,45	4,17	4,73	4,17	9,30

Indicadores de aptitud de las aguas para el riego

Los criterios analizados en el punto anterior restringen el uso de estas aguas para el riego, sin embargo, se hizo un análisis más detallado con el empleo de otros indicadores y criterios más específicos para ver cuán perjudicial puede ser el uso agrícola de este recurso, los resultados se muestran en la Tabla III.

Tabla III. Indicadores de la aptitud de las aguas para utilizarlas en el riego.

Variables	Unidades	Período	Muestras					
			I	II	III	IV	V	VI
Salinidad Efectiva	me.l ⁻¹	Húmedo	12,38	12,43	5,30	7,17	7,17	9,50
		Seco	8,83	8,46	3,49	3,87	3,32	6,82
Salinidad Potencial	me.l ⁻¹	Húmedo	10,84	14,19	2,23	4,03	4,14	37,19
		Seco	18,87	18,02	4,87	5,54	4,88	10,30
RASx	U	Húmedo	8,2	8,4	4,4	4,4	4,4	2,7
		Seco	19,7	5,4	9,6	7,3	11,5	4,4
Porcentaje de Sodio Posible	%	Húmedo	146	150	83	75	75	107
		Seco	79	45	75	69	78	47
Porcentaje de Sodio Soluble	%	Húmedo	56	57	62	61	61	18
		Seco	79	45	75	69	78	47
Índice de Langellier	U	Húmedo	1,1	1,1	0,4	0,6	0,6	0,9
		Seco	1,5	1,6	1,1	1,0	0,9	1,0

Salinidad

Los valores de SST y RAS son incluidos en el diagrama de Wilcox para clasificar las aguas con fines de riego. En la Figura II se puede observar que las fuentes superficiales son altamente salinas (C3) y las subterráneas son extremadamente salinas (C4), por tanto el peligro de salinización de los suelos al regar con estas aguas es alto o muy alto. En cuanto al sodio, las fuentes superficiales en el período húmedo tienen baja sodicidad (S1),

en el resto la sodicidad es media (S2) e incluso hay un caso de muy alta sodicidad (S4). Esto indica que los peligros de *alcalinización de los suelos* provocados por el sodio son medios.

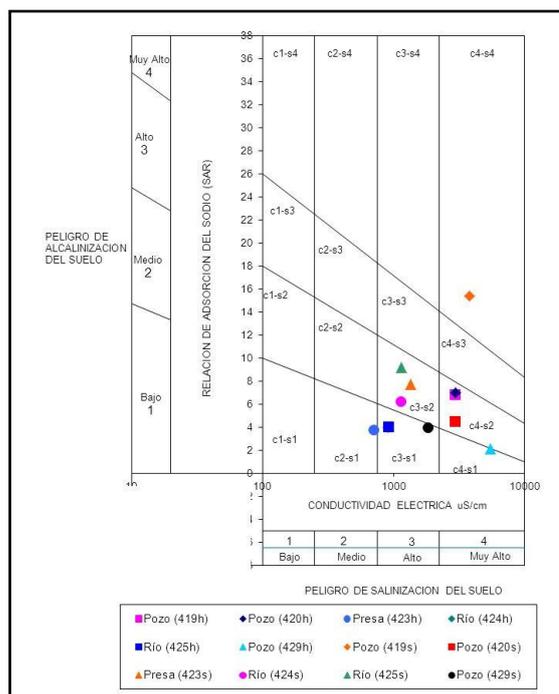


Figura II. Clasificación de las aguas de riego de la cuenca del río Narango según el diagrama de Wilcox.

Según la Salinidad efectiva (SE) estas aguas se clasifican como Condicionadas para su empleo en el riego (3 – 10 me.l⁻¹), ya que pueden pasar a formar parte del agua del suelo en forma de sales menos solubles como carbonato de calcio y magnesio o sulfato de calcio.

Por el criterio de Salinidad potencial (SP), que mide el peligro de los cloruros y sulfatos al actuar a bajos niveles de humedad y aumentar la presión osmótica, las fuentes subterráneas son No recomendables (>15 me.l⁻¹), mientras las superficiales están Condicionadas para el riego.

Efectos sobre la infiltración

Según el Porcentaje de sodio posible (PSP) las aguas están Condicionadas, pues en todos los casos el valor es superior al 50 %, existiendo peligro de sustitución del calcio y el magnesio del complejo de cambio por el sodio. El Porcentaje de sodio soluble (PSS) expresa la proporción de sodio y potasio respecto al total de cationes adsorbidos. Si ese porcentaje es muy alto el sodio puede alcanzar concentraciones elevadas en el complejo de cambio y provocar el deterioro físico de los suelos. Las aguas de fuentes superficiales son clasificadas como Dudosas (60 – 80%), mientras las subterráneas son Permisibles (40 – 60%).

Toxicidad

La magnitud de la toxicidad por la presencia de cloruros en las aguas es valorada en función del método de riego. Debido a que en las técnicas de riego por gravedad prácticamente no hay contacto del agua con zonas de transpiración más intensa (bordes y puntas de las hojas) los tenores asimilados son mayores, aun así las restricciones de uso son severas para las fuentes subterráneas y ligeras a moderadas para las superficiales. Si el riego es por aspersión en riesgo es mayor (severo) pues el agua se deposita en las hojas y puede provocar necrosis.

La toxicidad por sodio tiene un comportamiento similar a los cloruros. Los valores de RASx son en todos los casos superiores a 3,0 me.l⁻¹, a partir del cual se consideran ligeras a moderadas, si son superiores a 9,0 me.l⁻¹ pasan a la categoría de severas.

El riesgo de obstrucción de los sistemas de riego presurizados es alto (0,5 – 1,0) o muy alto (>1,0) según el Índice de Langellier. Este parámetro valora la posibilidad de precipitación del calcio en forma de carbonato cuando alcanza la saturación en presencia de bicarbonato (Fuentes, 2003) [9].

Conclusiones

La vulnerabilidad del recurso hídrico en relación a la oferta hídrica, estrés hídrico, reporta reducciones en la cuenca; se detecta el incremento, en algunas estaciones para el período evaluado, la cuenca del río Naranjo está sometida a stress hídrico basado en el índice de disponibilidad per cápita.

Los indicadores de calidad del agua evaluados arrojaron alta conductividad eléctrica que las hace extremadamente salinas, son no aptas para el riego.

La vulnerabilidad es alta, debido al muy bajo índice de retención y regulación del recurso hídrico y las presiones moderadas de uso con respecto a la oferta hídrica superficial disponible.

Referencias bibliográficas

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. *La calidad del agua en la agricultura*. Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje, 29 Rev. 1; 1987.

IDEAM Propuesta de indicadores del régimen hidrológico Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. Bogotá, Colombia. 2010.

FUENTES, J. L. *Técnicas de riego*. 4a edición revisada y ampliada ed. Madrid: Coedición Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Ediciones Mundi-Prensa. 2003.483 p.

IPCC. Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Ginebra, Suiza: Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático.2007.

IPCC. El Cambio Climático y el agua. Ginebra, Suiza. 2008.

IPCC. Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press. (2007).

Magrin, *et. al.* Latina America, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2007.

Rosenzweig, *et.al.* Water Resources for agriculture in a changing climate: International case studies. Global Environmental Change (2004).Vol 14 No 4 .

CHAVES, H.; ALIPAZ, S. (2007). An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. *Water Resources Management.*; (2007). 21:883-895.

Sharma. Application of climate information and predictions in water sector: capabilities. WCC-3. Geneve. (2009).