

**UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**



**Modelo dinámico de la cuenca baja del Río Bravo**

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores  
presentan los estudiantes:

Gabriel Pérez Pérez  
ID: 150444

Pablo Saavedra Chimal  
ID: 149935

Dr. Polioptro Fortunato Martínez Austria  
Director de tesis

San Andrés Cholula, Puebla, México.  
PRIMAVERA 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, primeramente, por haberme puesto en este camino, donde me ha enseñado que todo se puede lograr si es con esfuerzo y dedicación.

A mis padres, mi hermano y mi familia, que siempre me apoyaron y que me dejaron emprender este grandioso camino dentro de la universidad que, aunque lejos de casa, siempre estuvieron presentes y atentos al escucharme y alentarme en el día a día.

A mis amigos, que siempre estuvieron para apoyarme dentro y fuera de la universidad. Dentro de ellos, Pablo Saavedra Chimal, con quien comparto la investigación dentro del Programa de Honores y que finalmente, después de muchos análisis, investigaciones, desvelos y gran trabajo, llegó el momento de entregar esta tesis.

Al Dr. Polioptro F. Martínez Austria, que, junto con sus anécdotas de trabajo, datos curiosos y gran enseñanza, me guio dentro del camino de la investigación. El trabajar en conjunto por tres años significó para mí una gran oportunidad de aprender de alguien con el deseo y ganas de realizar las cosas como son y encontrar la “aguja en el pajar” para dar pie a la implementación de un cambio, como el exhibido dentro de esta tesis.

Finalmente, agradezco a la Universidad de las Américas Puebla, de la cual estoy orgulloso de pertenecer y donde he recibido una educación ejemplar para encaminarme hacia la etapa profesional con las herramientas necesarias para triunfar.

150444 - Gabriel Pérez Pérez

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por darme el privilegio de estar en donde debo de estar y por darme las herramientas para ser una persona exitosa.

Doy gracias a mis papás, por darme la oportunidad de estudiar en una universidad tan prestigiosa, pero, sobre todo, por estar al pendiente y brindarme su apoyo incondicional en todos y cada uno de los proyectos que tuve en mi vida universitaria.

De igual forma, agradezco a mis tres hermanos y a mi novia, por su complicidad y cariño, ya que hicieron que mi camino en la universidad fuera mucho más productivo y sencillo de lo que pudo haber sido.

Gracias a Gabriel Pérez Pérez, por ser el mejor compañero de tesis que pude haber tenido y por enseñarme a que dos personas brillantes trabajando juntas pueden lograr cosas increíbles.

Agradezco a nuestro mentor, el Dr. Polioptro F. Martínez Austria, por ser un vivo ejemplo de que el mundo se mueve y mejora gracias a las personas preparadas. Es una persona admirable en todos los sentidos y es un honor ser su alumno.

Gracias a todos mis amigos por permitirme aprender y crecer de la mano con ellos. Es muy emocionante pensar que seremos colegas en un futuro.

Y finalmente agradezco a la Universidad de las Américas Puebla por ser mi casa durante estos años de universidad y por facilitarme sus espléndidas instalaciones para desarrollarme como es debido.

149935 - Pablo Saavedra Chimal

## **RESUMEN**

Dentro de la cuenca del Río Bravo, se observa una problemática dentro de la distribución del agua, ya que los usos urbano, agrícola, industrial, entre otros, demandan una gran cantidad del recurso. Así también, factores exógenos como el cambio climático hacen la tarea más difícil al trastornar los periodos de lluvia, aumento de la temperatura, evaporación, etc.

Por medio de un análisis dinámico, se involucran las variables necesarias y participantes dentro de la cuenca Baja del Río Bravo para así analizar a futuro cercano el balance hídrico de la zona, observando la tendencia por la cual la zona se vería afectada.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. LA CUENCA BAJA DEL RÍO BRAVO.....	2
2.1 Descripción.....	2
2.2 Clima .....	8
Precipitación.....	9
Temperatura.....	11
Hidrología.....	12
Población .....	13
Aguas Subterráneas .....	14
2.3 Principales usos del agua: ciudades y sistemas de riego .....	15
Usos consuntivos .....	16
Uso Agrícola.....	18
Agua potable.....	19
Uso Industrial .....	20
Evaporación.....	22
2.4 Balance hídrico actual .....	23
2.5 Importancia social y/o económica de la región .....	24
2.6 Efectos esperados del cambio climático.....	26

3. MODELO DINÁMICO.....	28
3.1 Descripción del modelo dinámico desarrollado. ....	28
Anomalías de temperatura, láminas de riego y uso agrícola en general.....	30
Uso Público Urbano y crecimiento demográfico. ....	36
Reducción de disponibilidad natural, per cápita y demanda hídrica .....	41
Total de Usos Consuntivos .....	43
Balance Hídrico .....	45
4. RESULTADOS .....	47
4.1 Escenarios probados .....	47
Análisis de Escenario sin influencia del cambio climático .....	54
Análisis de Escenario con respecto al RCP 6.0.....	56
Análisis de Escenario con respecto al RCP 8.5 .....	58
Balance Hídrico .....	59
Disponibilidad per Cápita.....	60
Uso Público Urbano .....	62
Total de Usos Consuntivos .....	63
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	65
6. BIBLIOGRAFÍA.....	66



## 1. INTRODUCCIÓN

La zona de la cuenca Baja del Río Bravo, posee una problemática de relevancia en cuanto al recurso natural más importante del mundo: el agua. Factores como el aumento poblacional, el incremento en las dotaciones de distribución, necesidad y principalmente, el cambio climático, afectan el balance hídrico de la cuenca, mostrando resultados desfavorables. Para profundizar el tema, se decide analizar un periodo determinado como futuro cercano de 30 años.

Al analizar la problemática, se observa que se correlacionan distintos factores en el mismo sistema, convirtiéndolo en un sistema complejo y dinámico. Se denomina complejo por las diferentes temáticas que intervienen, como lo pueden ser el aumento poblacional, la demanda hídrica, el consumo de los sectores de producción y disminución del recurso debido a causas naturales o factores antropogénicos. Así también, se denomina dinámico porque intervienen elementos como los círculos causales, que afectan directamente al sistema al alimentarse mutuamente debido al crecimiento acelerado de alguna de sus partes.

Con esto, se pretende concientizar a la población de los diferentes escenarios que son posibles a ocurrir, así como de demostrar cuáles son las variables que más afectan en la disminución de agua de la cuenca y así tener herramientas estratégicas para solucionar el problema.



## **2. LA CUENCA BAJA DEL RÍO BRAVO**

### **2.1 Descripción**

En la antigüedad, al carecer de una infraestructura hidráulica eficiente para transportar recursos como el agua, las civilizaciones se asentaron cerca de fuentes seguras de agua, como los ríos y lagos que almacenan al mayor recurso utilizado por el hombre. Así también, con el desarrollo económico, el crecimiento de los asentamientos humanos, las zonas de riego y posteriormente el importante crecimiento de la industria, entre otras actividades, se generaron grandes asentamientos, cuyo desarrollo depende completamente del agua. Un ejemplo relevante, se encuentra en la región norte de México y sur de Estados Unidos, donde está ubicado el Río Bravo, el cual transporta agua que se emplea para consumo de ambos países y sus respectivas regiones fronterizas.

El Río Bravo o Grande ocupa el vigésimo lugar en longitud de los ríos del mundo, es el quinto río más largo de América del Norte y define el límite internacional entre los Estados Unidos y México. Debido a la asignación excesiva y al clima árido, la descarga fluvial del Río Bravo se reduce en tamaño a medida que fluye río abajo, lo que representa un gran desafío para gestionar los recursos hídricos transfronterizos entre los dos países.

El Río Grande, como se conoce en los Estados Unidos, o el Río Bravo, como se conoce en México, forma la frontera internacional entre los dos países para los 2,053 kilómetros del límite del río, que inicia en Ciudad Juárez, Chih./El Paso, Tx. y desemboca en el Golfo de México. Los dos principales afluentes, el Río Conchos y el Río Pecos, reviven el flujo superficial del Río Grande-Río Bravo después de que el río pasa a través del área llamada *Forgotten Rivers* al sur de El Paso, Texas. El río Conchos fluye desde la Sierra

Madre Occidental en México, lo que representa alrededor del 35 al 40% del flujo superficial en la cuenca inferior. Excepto por el deshielo en la cabecera de Colorado y el clima subtropical en la desembocadura cerca del Golfo de México, la mayor parte del río fluye a través de regiones áridas, incluido el desierto más grande de América del Norte, el Desierto Chihuahuense. Para gobernar la asignación del agua, Estados Unidos y México tienen dos tratados, firmados en 1906 y 1944, y varias regulaciones cooperativas referidas como *Minutes*. El crecimiento acelerado de la población, el consiguiente desarrollo económico y los cambios en el uso de la tierra están empujando los límites de la sostenibilidad y la calidad ambiental.

La cuenca del Río Bravo, desde su origen hasta su desembocadura se muestra en la figura 1, y se acostumbra dividirla en las siguientes subcuencas:

1. Cuenca Alta del Río Bravo.
2. Cuenca Cerrada.
3. Cuenca del Río Pecos.
4. Cuenca del Río Grande.

## Cuenca Baja del Río Bravo

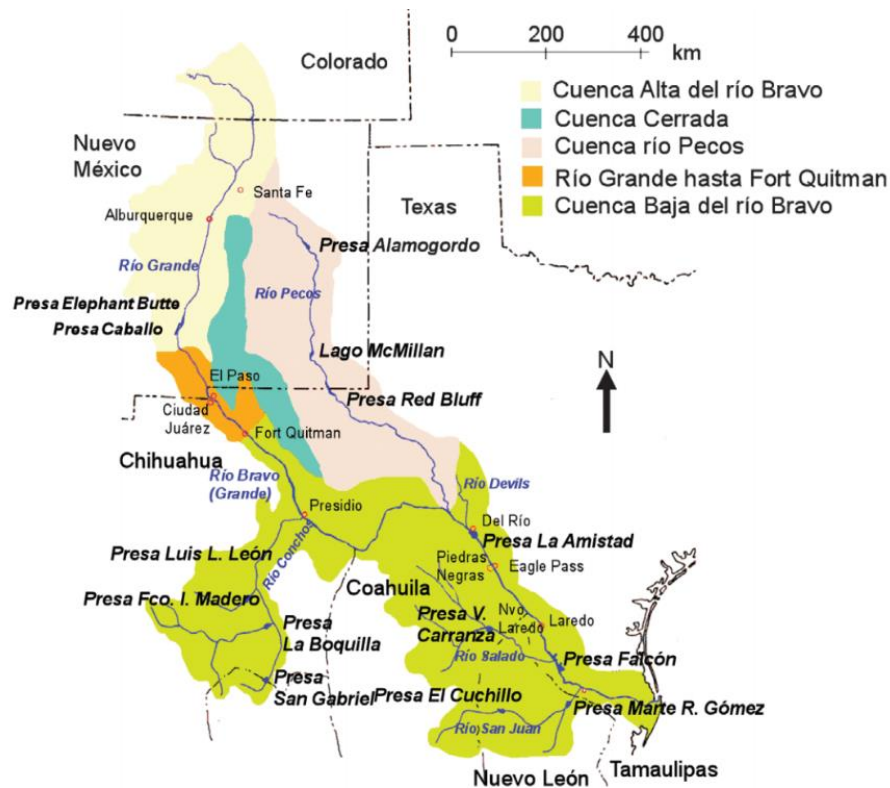


Figura 1 - Cuenca del Río Bravo. (Aparicio, et al. 2009)

De acuerdo al informe de las cuencas Hidrográficas de México, la cuenca transfronteriza del Río Bravo cubre una superficie total de aproximadamente 455,000 Km<sup>2</sup>, poco más de la mitad de esta superficie corresponde a Estados Unidos (230,427 Km<sup>2</sup>) y la otra parte (225,242 Km<sup>2</sup>) corresponde a México (Von der Meden, et. al., 2010).

En cuanto a los afluentes más importantes para la cuenca en la región estadounidense, se cuenta con la aportación del Río Pecos. Por su parte, la región mexicana cuenta con tres importantes afluentes como lo son los Ríos Conchos, Sabinas y San Juan.

Para la cuenca mexicana, el Río Bravo es considerado como el río más largo y de mayor cuenca del país, abarcando, en parte, cinco estados: Durango, Chihuahua, Coahuila,

Nuevo León y Tamaulipas. Por su parte, Estados Unidos lo ubica como el cuarto más largo de su territorio, abarcando tres estados: Colorado, Nuevo México y Texas (Von der Meden, et. al., 2010).

Como se ha mencionado antes, debido a la gran población que se asienta a nivel binacional y de manera cercana al río, además de las actividades productivas que se generan en la zona, es necesario, tanto disponer de zonas protegidas para su desarrollo natural y escurrimiento propio hacia el afluente o río principal; como concesionar los usos de agua y evitar la sobreexplotación del volumen de agua que posee el río. Los usos consuntivos abarcan las siguientes actividades:

- Consumo doméstico y municipal.
- Agricultura (riego).
- Ganadería (consumo).
- Extracción (minería e industria en general).

Se conoce que, a nivel binacional, del total de poco más de 350 áreas naturales protegidas, que abarcan el 26% del total de la cuenca del río, el 72% se encuentra en Estados Unidos (8.6 millones de Ha), y el 28% en México (3.3 millones de Ha) (Von der Meden, et. al., 2010).

Respecto de las concesiones otorgadas para México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) otorga un total de 9,200 millones de m<sup>3</sup> del agua que viaja por el Río Bravo, convirtiendo a la cuenca como la mayor zona concesionada del país, donde los títulos de concesión se reparten entre aguas superficiales (6,500) y aguas subterráneas (36,500). Así también, cabe destacar que el escurrimiento de la cuenca aguas debajo de la Presa Falcón (zona perteneciente a la Cuenca del Bajo Río Bravo), se reparte equitativamente para ambas

naciones (Von der Meden, et. al., 2010) conforme a lo establecido en el tratado firmado entre México y los Estados Unidos.

Como lo muestra la Figura 1, la cuenca mexicana del río Bravo contiene 3 subregiones: Cuenca Alta del Río Bravo, Cuenca Media del Río Bravo y Cuenca Baja del Río Bravo. Estas subdivisiones o subregiones hidrológicas se dividen en sus tributarios como se muestra a continuación (DOF, 2011), en la Tabla 1.

Subregión	División	Cuenca			Superficie Kilómetros cuadrados			
		No.	Nombres	Descripción				
ALTO BRAVO	Única	1	Río Bravo 1	Desde la Presa derivador internacional Ciudad Juárez hasta la EH Fort Quimán	3,579			
		2	Río Bravo 2	Desde la EH Fort Quimán hasta la EH Presidio	3,503			
	<b>Subtotal Alto Bravo</b>				<b>7,082</b>			
SESENTETRES	Conchos	3	Río Florido 1	Las cuencas hidrográficas que integran esta Subregión corresponden a las cuencas de los ríos señalados en el inciso c de la parte B del artículo 4 del Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944	1,150			
		4	Río Florido 2		1,584			
		5	Río Florido 3		4,661			
		6	Río Panal		1,159			
		7	Río Balleza		1,525			
		8	Río Conchos 1		19,478			
		9	Río San Pedro		10,461			
		10	Río Conchos 2		9,843			
		11	Río Cuviscar		395			
		12	Río Conchos 3		6,508			
		13	Río Conchos 4		9,006			
		A. Vacas	18		Arroyo de las Vacas	935		
		San Diego	19		Río San Diego	2,225		
	San Rodrigo	21	Río San Rodrigo	2,717				
	Escondido	23	Río Escondido	3,810				
	Salado	26	Río Sabinas	12,825				
		27	Río Nadadores	23,086				
		28	Río Salado	25,436				
		<b>Subtotal Seis Tributarios</b>				<b>136,804</b>		
		MEDIO BRAVO	Única	14	Río Bravo 3	Las cuencas hidrográficas que integran esta Subregión corresponden a aquellas drenadas por el cauce principal del Río Bravo tal como se señala en el inciso d de la parte B del artículo 4 del Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944	6,339	
	15			Río Bravo 4	16,400			
	16			Río Bravo 5	6,069			
	17			Río Bravo 6	259			
	20			Río Bravo 7	204			
	22			Río Bravo 8	375			
	24			Río Bravo 9	827			
	25			Río Bravo 10	6,172			
	29			Río Bravo 11	3,081			
<b>Subtotal Medio Bravo</b>				<b>39,726</b>				
BAJO BRAVO	Álamo			30	Río Álamo		Desde su origen hasta la EH Méjer	4,297
				31	Río Salinas		Desde su origen hasta la EH Tamole	12,440
	San Juan			32	Río Pesquería		Desde la EH Tamole hasta la EH Los Herreros	8,385
				33	Río San Juan 1		Desde su origen hasta la Presa El Cuchillo	9,147
		34	Río San Juan 2	Desde la EH Los Herreros y Presa El Cuchillo hasta la EH Los Álamos	1,334			
		35	Río San Juan 3	Desde la EH Los Álamos hasta la EH Camargo	2,987			
		Bravo Abajo Falcón	36	Río Bravo 12	Desde Presa Falcón y EH Méjer y Camargo hasta la EH Anzaitúas	2,679		
	37		Río Bravo 13	Desde la EH Anzaitúas hasta la EH Matamoros, Goib de México	1,394			
<b>Subtotal Bajo Bravo</b>				<b>433,663</b>				
<b>Total Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos</b>				<b>226,275</b>				

Tabla 1 - Descripción de las subregiones de la Cuenca del Bajo Bravo.

## 2.2 Clima

El clima en general en la cuenca es muy variado, si bien se caracteriza por ser un clima seco y que carece de nubosidad y precipitaciones. En perspectiva, en la zona aguas abajo de la presa Falcón, perteneciente a la subregión del Bajo Río Bravo, se conoce que el clima es subhúmedo, el cual oscila entre las temperaturas de 10 a 22°C (Aparicio, et. al., 2009)

En la Figura 2 se presenta el mapa climático de México, en el cual puede observarse que la mayor parte de la cuenca del río Bravo tiene climas áridos. Para el caso de la cuenca baja, objeto de estudio de este proyecto, la clasificación climática es BSh y Cwa en el sistema de Köppen. El primero corresponde a un clima seco de estepa con precipitaciones menores a 250 mm anuales, y el segundo (hacia el Golfo de México) a un clima templado cálido con lluvias en verano.

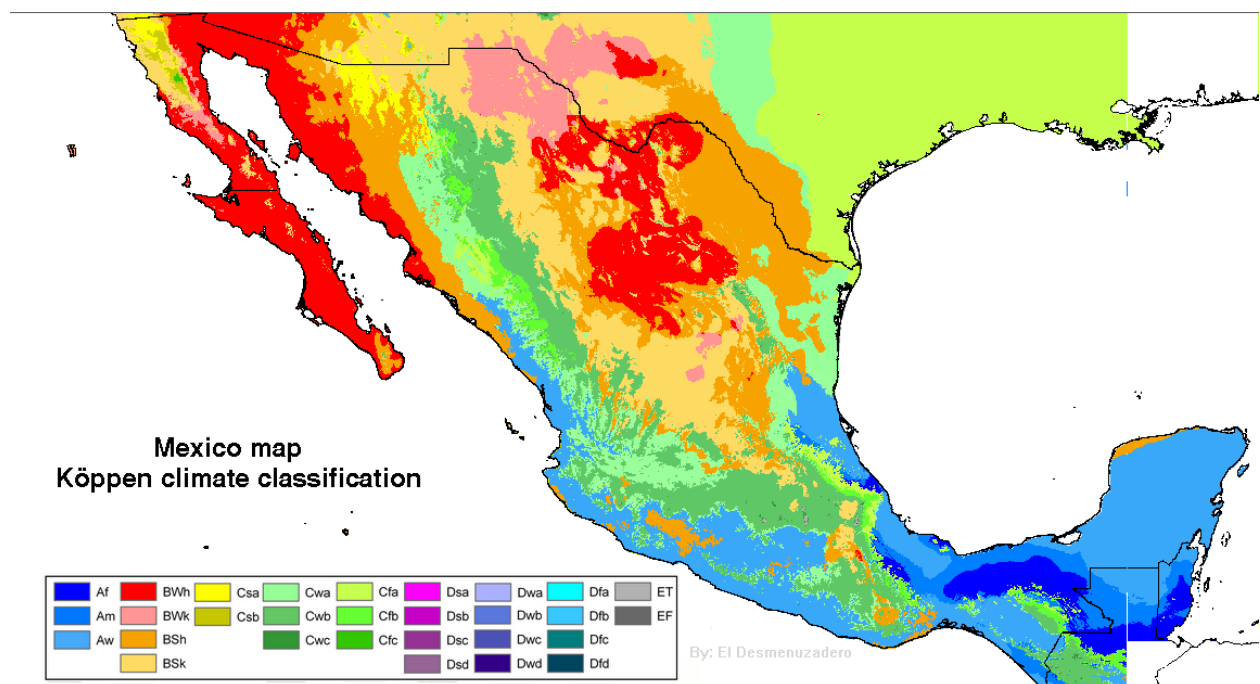


Figura 2 - Climas en la república mexicana, de acuerdo con la clasificación de Köppen (Wikimedia Commons).

En la Figura 3 se muestra la clasificación climática de la región usada por la CONAGUA para propósitos de planeación, y que exhibe mayor detalle de la variabilidad de climas en la cuenca.

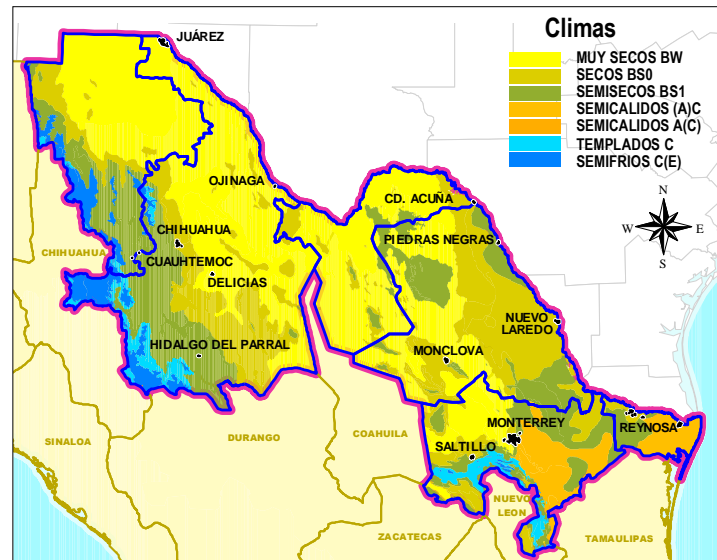


Figura 3 - Climas en la cuenca del río Bravo (CNA, 2003).

### ***Precipitación***

En la Figura 4 se muestra la normal de la lluvia en México, calculada en el periodo 1981-2010 (CONAGUA, 2016). Como puede observarse, la cuenca del Río Bravo tiene una alta variabilidad, cambiando de muy baja en su inicio en el estado de Chihuahua, a media en la desembocadura del río en el Golfo de México.

La precipitación general abarca, entonces, un rango entre los 169 a 1203 mm anuales en la cuenca, como puede observarse en la Figura 5. Particularmente, en la Tabla 2, se muestra la precipitación media por regiones hidrológicas en el periodo de 1941-2000.



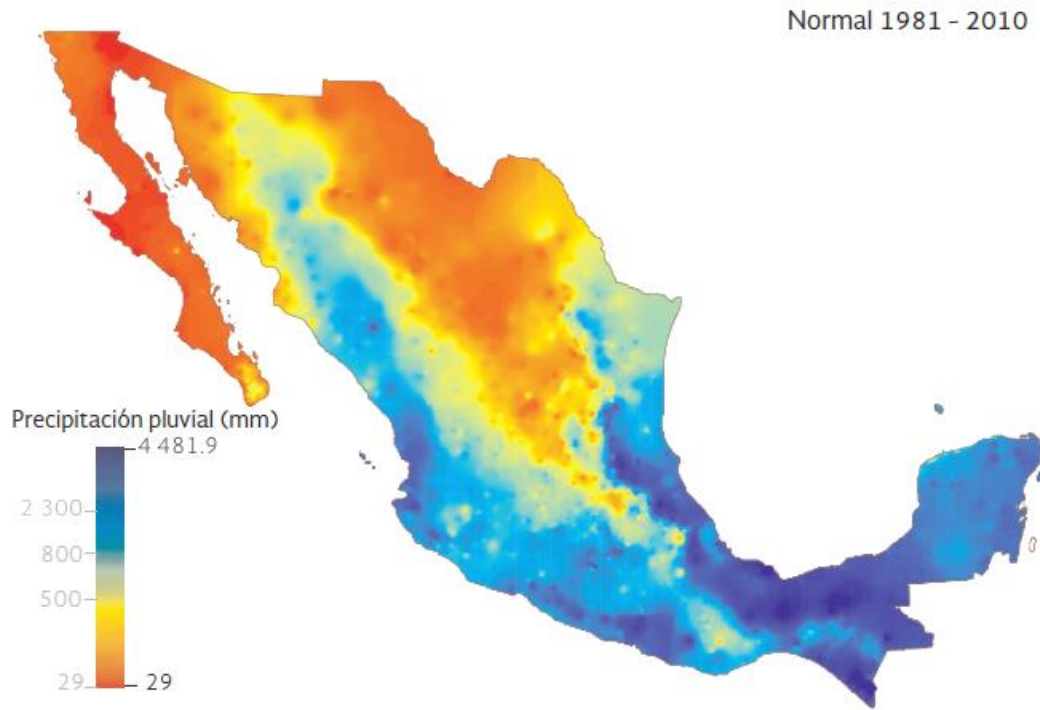


Figura 4 - Precipitación normal en la República Mexicana (CONAGUA, 2016)

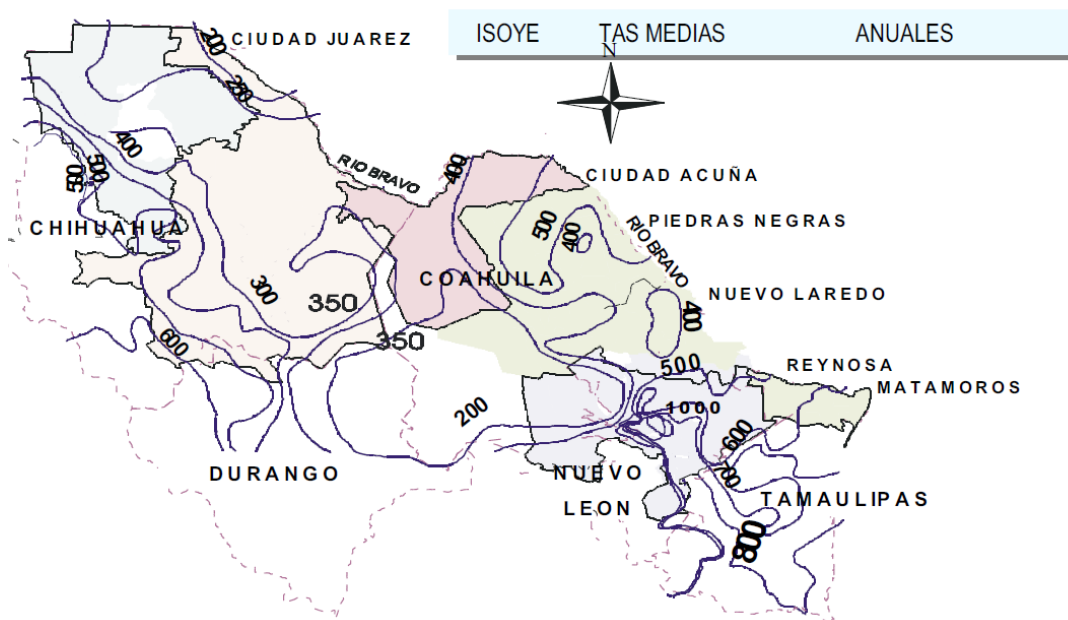


Figura 5 - (CNA, 2003)4. Isoyetas medias anuales en la región hidrológica.

En la Tabla 2, se puede observar que la parte Baja del Río Bravo es en la que se concentra la mayoría de la lluvia media anual en la cuenca y en la que se concentra en un área menor, lo que representa una gran ventaja en cuanto a la disponibilidad de los recursos, en una zona en la cual se concentran poblaciones e industrias de gran tamaño para ambos lados de la frontera.

<b>Precipitación M edia por Regiones H idrológicas 1941 - 2000</b>				
<b>Región hidro ló gica</b>	<b>Nom bre</b>	<b>Área</b>	<b>Lluvia M edia</b>	<b>Volu m en</b>
		<b>Km <sup>2</sup></b>	<b>m m</b>	<b>m ilbnes de m <sup>3</sup></b>
24 -A	Río Bravo (Conchos)	87,673	383	33,570,207
24 -B	Río Bravo (Am istad- Falón)	111,424	368	40,967,033
24 -C	Río Bravo (Bajo Río Bravo)	48,066	559	26,848,377
<b>Total</b>		<b>247,163</b>	<b>410 2</b>	<b>101,385,617</b>

Tabla 2 - Precipitación media por regiones en la cuenca del río Bravo. (Aparicio, et. al., 2009)

### ***Temperatura***

La temperatura mensual mínima normal, muestra que los meses con menor temperatura son los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, mientras que los de mayor temperatura corresponden a los meses de junio, julio y agosto. Con ayuda de los datos recopilados en el periodo de 1961 a 1990, se puede observar la distribución de temperaturas en algunas zonas de la cuenca, incluida la zona de Bajo Río Bravo (Aparicio, et. al., 2009)

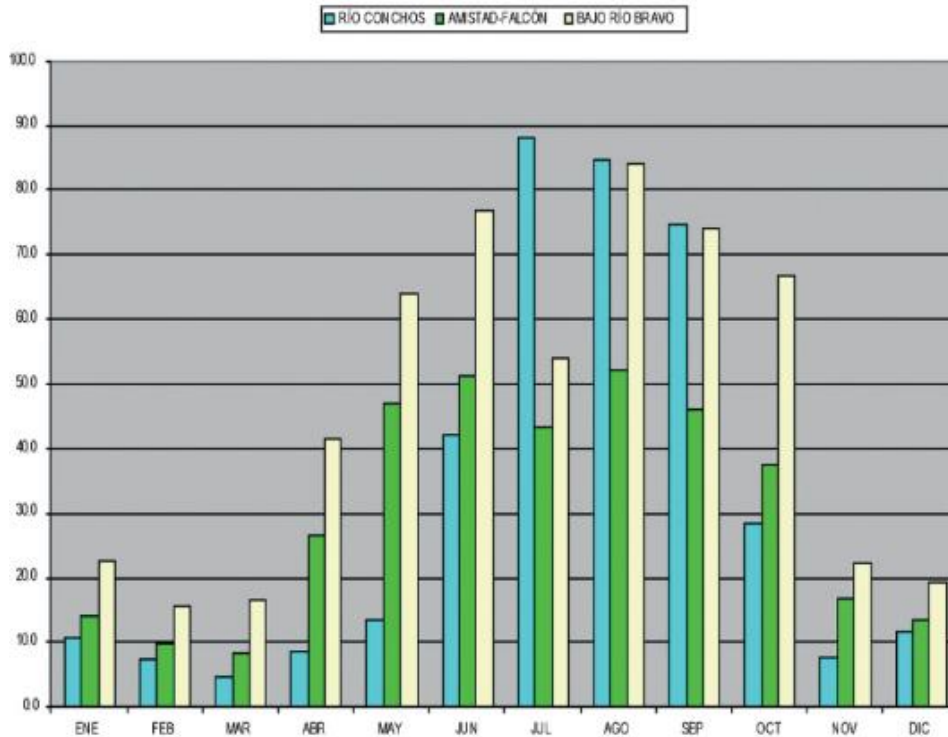


Figura 6 - Distribución mensual de la lluvia media anual (Aparicio, et. al., 2009)

### ***Hidrología***

El Plan Nacional Hidráulico 1981 estimó que del lado mexicano se generan 6,383 millones de m<sup>3</sup> de escurrimiento medio anual, de donde el río Conchos aporta 37%, el río San Juan 21%, y el colector principal y los no aforados 17%. Los demás afluentes aportan el 25% restante. Adicionalmente, con base en el Tratado de 1906, se reciben 74 millones de m<sup>3</sup> al año en Ciudad Juárez procedentes de los Estados Unidos a través del río Grande (Aparicio, et. al., 2009)

Por otra parte, la evaporación media anual sobre la cuenca es de 2,100 mm, donde, de acuerdo a la Figura 7 la zona norte del país es fuertemente asediada por las altas temperaturas y la falta de precipitaciones. Además, en la cuenca hay condiciones áridas y

semiáridas en la mayoría de la superficie, excepto en la zona sureste, en donde se tienen características sub-húmedas.

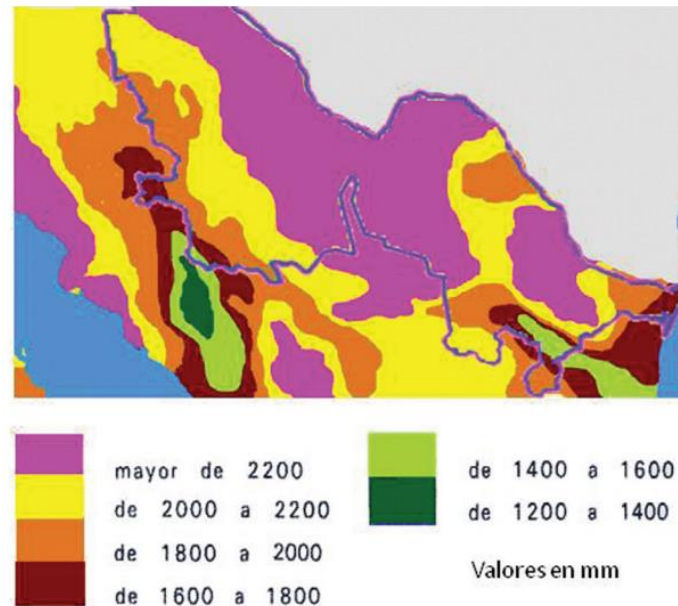


Figura 7 - Evaporación total anual, mm (Aparicio, et. al., 2009)

### ***Población***

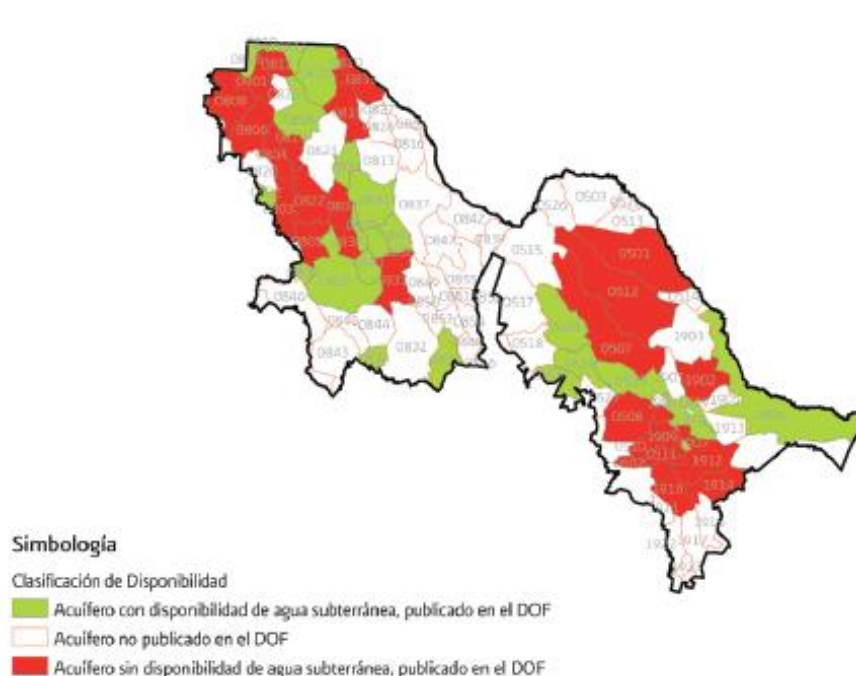
De acuerdo al censo de población y vivienda del año 2000, la región con mayor densidad poblacional urbana es aquella perteneciente al Bajo Bravo, donde el total poblacional es de poco más de 5 millones de habitantes. Como puede notarse, la población en la cuenca es predominantemente urbana (93% del total). En el caso de la subregión Bajo Río Bravo, el porcentaje de población urbana respecto del total es de 94%, la mayor parte de ella ubicada en las zonas metropolitanas de Monterrey y Saltillo.

Subregión Hidroológica	División	Población			Superficie (Km <sup>2</sup> )	Densidad Habitantes/ Km <sup>2</sup>
		Total	Rural	Urbana		
Alto Bravo	Única	1,237,754	16,662	1,221,092	7,082	175
<b>TotalSubregión Hidrológica</b>		<b>1,237,754</b>	<b>16,662</b>	<b>1,221,092</b>	<b>7,082</b>	<b>175</b>
Seis tributarios	Conchos	1,254,823	211,741	1,043,082	65,770	19
	Resto	576,881	46,324	530,557	71,034	8
<b>TotalSubregión Hidrológica</b>		<b>1,831,704</b>	<b>258,065</b>	<b>1,573,639</b>	<b>136,804</b>	<b>13</b>
Medio Bravo	Única	631,033	29,340	601,693	39,726	16
<b>TotalSubregión Hidrológica</b>		<b>631,033</b>	<b>29,340</b>	<b>601,693</b>	<b>39,726</b>	<b>16</b>
Bajo Bravo	Álamo	14,103	7,388	6,715	4,297	3
	San Juan	4,340,235	217,317	4,122,918	34,293	127
	Bravo Abajo Falcón	1,043,356	83,557	959,799	4,073	256
<b>TotalSubregión Hidrológica</b>		<b>5,397,694</b>	<b>308,262</b>	<b>5,089,432</b>	<b>42,663</b>	<b>127</b>
<b>TotalRegión Hidrológica</b>		<b>9,098,185</b>	<b>612,329</b>	<b>8,485,856</b>	<b>226,275</b>	<b>40</b>

Tabla 3 - Población total, urbana y rural por subregión hidrológica (DOF, 2011)

### *Aguas Subterráneas*

En la Figura 8 se muestra la situación de disponibilidad de aguas subterráneas en la cuenca mexicana del río Bravo. Como puede observarse, existe un número importante de acuíferos con sobreexplotación. Por otra parte, algunos de los acuíferos con disponibilidad, en particular los ubicados en el tramo bajo del río Bravo, aguas debajo de la presa Falcón y hasta la desembocadura, contienen agua con un alto grado de salinidad, lo que no permite usarlos directamente para la agricultura o el abastecimiento de agua potable; a menos de que se incorporen costosos sistemas de desalinización.



*Figura 8 - Acuíferos con disponibilidad y sobreexplotados en la cuenca del río Bravo (CONAGUA, 2012).*

El principal acuífero por su uso es el del Bolsón del Hueco, ubicado en ciudad Juárez-El Paso, que se encuentra fuertemente sobreexplotado, y que abastece de agua potable a ambas ciudades.

### **2.3 Principales usos del agua: ciudades y sistemas de riego**

El agua del Río Grande-Bravo ha sido usada desde tiempos prehispánicos y coloniales a través de canales de irrigación y acequias. Del total de agua utilizada actualmente del lado mexicano de la cuenca (9,234 millones de m<sup>3</sup>), el 53% proviene de aguas superficiales y el resto de aguas subterráneas. Los principales usos del agua en la cuenca son el agrícola (83.8%), el urbano (12.8%), el industrial (2.2%) y la generación de energía eléctrica (1.2%). Es de notar que en esta cuenca se hace un uso no consuntivo del 21% del total de agua utilizado, pues se emplea en la generación de energía.

Otro uso que se le ha dado a lo largo de la frontera al cauce del Río Grande-Bravo ha sido estabilizar el límite entre Estados Unidos y México a través de la construcción de diques.

Con respecto al uso público en México, de acuerdo al censo del 2005 un 96 % de la población de la cuenca tiene acceso a agua potable (98% población urbana y 72% de la población rural) y 93% al alcantarillado (96% de la población urbana y 65% de la población rural).

Esta cuenca cuenta con la mayor capacidad instalada de plantas potabilizadoras de agua y de tratamiento de agua usadas a nivel nacional. Existen 57 plantas con una capacidad instalada para potabilizar 26 m<sup>3</sup>/s de agua. No obstante, estas plantas operan al 60% (15 m<sup>3</sup>/s) de su capacidad. Por otra parte, existen 188 plantas, para el tratamiento de aguas residuales, con una capacidad de 28 m<sup>3</sup>/s en la práctica tratan hasta un 78% (Von der Meden, et. al., 2010).

En la Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos, hay escasez de agua en las zonas de mayor desarrollo económico y dinámica demográfica, lo que conduce a que, en la medida en la que el consumo aumenta, la disponibilidad de agua per cápita tienda a disminuir (Aparicio, et. al., 2009).

### ***Usos consuntivos***

Se estima que se requiere un volumen anual de 11,881.301 millones de metros cúbicos para cubrir las extracciones totales de agua en la región hidrológica. De este volumen 4,789.9 millones de metros cúbicos corresponden a los usos no consuntivos asociados con la energía eléctrica, por lo que este volumen es retornado en su totalidad hacia aguas abajo de sus sitios

de extracción (plantas hidroeléctricas) para ser aprovechados por otros usuarios. De esta manera sólo el resto, 7,091.4 millones de metros cúbicos corresponde a extracciones para usos consuntivos, de los que sin embargo también se retorna una parte al sistema como aguas residuales. Sin considerar el aprovechamiento no consuntivo, en la región el 84% del agua se destina para riego en la agricultura, mientras que el 16% restante es para otros usos, contra una relación de 69-31% reportada a escala mundial

En cuanto al origen del recurso 10,191.6 millones de metros cúbicos anuales del volumen total (85.8%), incluyendo los usos no consuntivos, se extraen de embalses, cauces y corrientes superficiales, mientras que sólo 1,689.7 millones de metros cúbicos anuales (14.2%) provienen de los acuíferos. Cabe señalar que un componente importante del volumen disponible para los aprovechamientos superficiales es el proveniente de los retornos de los volúmenes una vez empleados en las plantas hidroeléctricas localizadas en la región, así como volúmenes provenientes de las descargas de aguas residuales de las principales localidades de la Región Hidrológica, aunque gran parte de este abastecimiento haya tenido su origen en los acuíferos.

En total se estima que el volumen de retornos al sistema asciende a 5,142.8 millones de metros cúbicos anuales, lo cual es importante dado que en la región hidrológica sólo se generan escurrimientos naturales promedio del orden de 5,590 millones de metros cúbicos anuales (DOF, 2011).



### Uso Agrícola

Como se ha citado, el uso de agua para irrigación es el principal consumidor en la cuenca. En la Región Hidrológica, se tienen que regar 663,980 hectáreas, de las cuales casi un 60% está en distritos de riego y el resto en unidades de riego.

Distritos de Riego en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos							
Subregión Hidrológica	Distrito de Riego		Superficie	Superficie	Lámina	Superficie	Lámina
			Regable	Regada 1995		Regada 2001	
			Hectáreas	Hectáreas	metros	Hectáreas	metros
Seis Tributarios División Salado - Sabina División Conchos	4	Don Martín	29,589.00	6,724.00	1.7	0	0
	5	Delicias	79,555.00	11,187.00	1.2	25,158.00	1.8
	9	Valle de Juárez	20,816.00	17,742.00	1.4	10,380.00	1.8
	90	Bajo Río Conchos	10,715.00	5,513.00	2.6	5,362.00	1.9
	103	Río Florido	8,278.00	2,118.00	1.7	2,654.00	1.6
<b>Subtotal</b>			<b>148,953.00</b>	<b>43,284.00</b>		<b>43,554.00</b>	
Medio Bravo	6	Palestina	13,084.00	6,240.50	0.9	3,177.20	1.1
	50	Acuña Fabón	12,904.00	1,907.00	0.2	0	0
<b>Subtotal</b>			<b>25,988.00</b>	<b>8,147.50</b>		<b>3,177.20</b>	
Bajo Bravo División San Juan	25	Bajo Río Bravo	202,548.00	194,225.00	0.4	0	0
	26	Bajo San Juan	76,689.00	56,717.00	0.5	52,559.00	0.3
	31	Las Lajas	3,852.00	943	0.6	0	0
<b>Subtotal</b>			<b>283,089.00</b>	<b>251,885.00</b>		<b>52,559.00</b>	
<b>Total</b>			<b>458,030.00</b>	<b>303,316.50</b>		<b>99,290.20</b>	

Tabla 4 - Distritos de Riego en la Región Hidrológica Número 24 Bravo - Conchos.

El volumen de agua almacenada en las presas es aprovechado principalmente por los distritos de riego, así como una pequeña cantidad de volumen extraído de los pozos profundos. Las unidades de riego utilizan aguas superficiales y subterráneas en la misma medida (DOF, 2011).

Subregión Hidrológica	Estado	Número de unidades de riego	Superficie regable
			Hectáreas
<b>Alto Bravo</b> Amistad - Ojinaga	Chihuahua - Coahuila	23	2,400.00
<b>Seis Tributarios</b> Salado y Sabinas Conchos	Coahuila - Nuevo León	585	74,700.00
	Chihuahua - Durango	831	74,700.00
<b>Medio Bravo</b> Álamo	Nuevo León	2	3,100.00
<b>Bajo Bravo</b> San Juan	Tamaulipas	140	13,500.00
	Coahuila - Nuevo León	1,116	87,000.00
<b>Total</b>		<b>2,697</b>	<b>255,400.00</b>

Tabla 5 - Volumen de agua almacenada por Subregión Hidrológica.

Volumen de extracción destinados para uso agrícola en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos										
Subregión Hidrológica	División	Distritos de Riego			Unidades de Riego			Totales		
		Superficial	Subterránea	Total	Superficial	Subterránea	Total	Superficial	Subterránea	Total
M illo nes de m etros cúbicos										
<b>Alto Bravo</b>	Única	124.89	0.00	124.89	1.04	31.23	32.27	125.93	31.23	157.15
<b>Seis Tributarios</b>	Conchos	1393.22	230.30	1623.52	400.33	289.50	689.83	1793.55	519.80	2313.35
	A. Vacas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.13	0.00	0.13	0.13
	San Diego	43.04	0.00	43.04	2.45	0.45	2.90	45.49	0.45	45.94
	San Rodrigo	0.00	0.00	0.00	1.40	0.75	2.14	1.40	0.75	2.14
	Escondido	0.00	0.00	0.00	1.17	21.03	22.19	1.17	21.03	22.19
<b>Medio Bravo</b>	Salado	259.01	0.00	259.01	131.43	170.33	301.77	390.44	170.33	560.77
	Única	37.10	0.00	37.10	38.95	77.47	116.42	76.05	77.47	153.52
<b>Bajo Bravo</b>	Álamo	0.00	0.00	0.00	0.00	33.11	33.11	0.00	33.11	33.11
	San Juan	569.95	0.00	569.95	445.70	381.29	828.00	1016.66	381.86	1397.95
	Bravo abajo Fabón	1229.52	0.00	1229.52	0.00	33.86	33.86	1229.52	33.86	1263.39
<b>Total</b>		<b>3656.73</b>	<b>230.30</b>	<b>3887.03</b>	<b>1022.47</b>	<b>1039.15</b>	<b>2062.62</b>	<b>4680.19</b>	<b>1270.02</b>	<b>5949.64</b>

Tabla 6 - Volumen de extracción destinados para uso agrícola en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos

### Agua potable

La Subregión Hidrológica Bajo Bravo, es la que tiene un mayor uso público urbano.

Específicamente en la subcuenca del San Juan, con un 52.9% del volumen total de la región

hidrológica para este uso, y Bravo con el 20.2%. En ésta última, un tercio de 166.8 millones de metros cúbicos se pierden en su conducción al año desde Falcón hasta las localidades. Sin considerar San Juan, las pérdidas en promedio ascienden al 37% del volumen que se extrae para este sector.

El abastecimiento de agua potable para las ciudades que dependen del agua superficial como Monterrey y Chihuahua -ciudades grandes y conurbadas- es insuficiente, debido a las sequías que se presentan en toda la Región hidrológica. Saltillo tendrá problemas también en el futuro de abastecimiento de agua subterránea.

### ***Uso Industrial***

El abastecimiento de agua para la industria puede proveerse por medio de redes municipales o por fuentes independientes. El 94% de usuarios lo hacen por medio de redes municipales, sin embargo, ellos sólo extraen un 10.4 % del volumen de agua para uso industrial, el cual se estima es de 269.1 millones de metros cúbicos anuales. Así, el restante 89.6% del volumen total extraído para el sector es aprovechado por menos de 400 usuarios, los cuales cuentan con fuente propia para su abastecimiento.

En la Región Hidrológica del Río Bravo, las subregiones del Conchos y San Juan representan el 75.6% de las extracciones industriales totales (ver tabla 13).

<b>Uso industrial abastecido por los sistemas municipales en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos</b>		
<b>Subregión Hidrológica</b>	<b>Volumen Abastecido</b>	<b>%</b>
	<b>Millones de metros cúbicos anuales</b>	
<b>Alto Bravo</b>		
Amistad - Ojinaga	0.1	0.4
<b>Seis Tributarios</b>		
Salado y Sabinas	1.8	6.4
Conchos	10.8	38.6
<b>Medio Bravo</b>		
Álamo	0	0
<b>Bajo Bravo</b> San Juan	4.9	17.5
	10.4	37.1
<b>Total</b>	28	100

Tabla 7 - Uso industrial abastecido por los sistemas municipales en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos

El abastecimiento industrial con fuentes propias en las subregiones hidrológicas es de unos 360 millones de metros cúbicos. A pesar de que el número de usuarios es menor que el conectado a las redes municipales, requieren en su conjunto una extracción de agua mucho mayor, llegando a ser del orden de 241.1 millones de metros cúbicos. De este volumen, el 75.7% corresponde a aguas subterráneas (ver tabla 8).

Volumen de extracción para el uso industrial en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos				
Subregión Hidrológica	División	Aguas Superficiales	Aguas Subterráneas	Total
		Millones de metros cúbicos		
<b>Alto Bravo</b>	Única	0	1.524	1.524
<b>Seis Tributarios</b>	Conchos	2.838	23.948	26.786
	A. Vacas	0	0	0
	San Diego	0	0	0
	San Rodrigo	0	0	0.026
	Escondido	0.026	20.021	20.021
	Salado	0	18.25	18.935
<b>Medio Bravo</b>	Única	0.685	24.167	72.231
<b>Bajo Bravo</b>	Álamo	48.064	0	0
	San Juan	0	85.652	85.652
	Bravo abajo Falcón	7.004	8.892	15.928
<b>Total</b>		<b>58.62</b>	<b>182.454</b>	<b>241.1</b>

Tabla 8 - Volumen de extracción para el uso industrial en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos

### **Evaporación**

La evaporación en la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos es de 1,141.906 millones de m<sup>3</sup>/año y resulta una pérdida en el balance de la cuenca.

<b>Evaporación en cuerpos de agua en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos</b>		
<b>Subregión Hidrológica</b>	<b>División</b>	<b>Volumen en evaporado medio anual</b>
		<b>Millones de metros cúbicos anuales</b>
<b>Alto Bravo</b>	Única	0.000
<b>Seis Tributarios</b>	Conchos	310.911
	A. Vacas	0.000
	San Diego	2.520
	San Rodrigo	2.851
	Escondido	0.000
	Salado	157.080
<b>Medio Bravo</b>	Única	329.915
<b>Bajo Bravo</b>	Álamo	36.000
	San Juan	302.630
	Bravo abajo Falcón	0.000
<b>Total</b>		<b>1141.907</b>

Tabla 9 - Evaporación en cuerpos de agua en la Región Hidrológica número 24 Bravo - Conchos

#### 2.4 Balance hídrico actual

Al comparar el agua superficial y subterránea, con las demandas, se aprecia un déficit en las subregiones San Juan y Bajo Bravo, mucho de ello producido por la evaporación en aumento.

Balances de agua en la cuenca del río Bravo					
Subregión de Planeación	Extracción	Consumo	Retorno	Agua Disponible	Diferencia
	Millones de m <sup>3</sup>				
Conchos - Máximo	2350	1857	488	4006	1656
Alto Bravo	71	56	15	169	98
Medio Bravo	2345	1893	436	3101	756
San Juan	2014	1417	592	1923	-91
Bajo Bravo	850	639	207	131	-719
<b>Total</b>	7630	5862	1738	9330	
<b>Gasto</b>	55.08				

Tabla 10 - Balances de agua en la cuenca del Río Bravo. (Aparicio, et. al., 2009)

## 2.5 Importancia social y/o económica de la región

Conforme al censo del año 2000, la Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos, tenía una población mayor de los 9 millones de habitantes, de los cuales el 48% se concentraban en la División San Juan, perteneciente a la Subregión Hidrológica Bajo Bravo, donde se localiza Monterrey, la tercera ciudad más grande del país.

Considerando como población urbana aquella que se concentra en centros con más de 2,500 habitantes, la población urbana de la región era de casi 8.5 millones de habitantes, de los cuales nuevamente el 48% se concentraba en la División San Juan.

Población y densidad de población en la Región Hidrológica número 24 Bravo – Conchos						
Subregión Hidrológica	División	Población			Superficie	Densidad
		Total	Rural	Urbana	Km <sup>2</sup>	Habitantes/Km <sup>2</sup>
Alto Bravo	Única	1,237,754	16,662	1,221,092	7,082	175
<b>Subtotal</b>		<b>1,237,754</b>	<b>16,662</b>	<b>1,221,092</b>	<b>7,082</b>	<b>175</b>
Seis Tributarios	Conchos	1,254,823	211,741	1,043,082	65,770	19
	Resto	576,881	46,324	530,557	71,034	8
<b>Subtotal</b>		<b>1,831,704</b>	<b>258,065</b>	<b>1,573,639</b>	<b>136,804</b>	<b>13</b>
Medio Bravo	Única	631,033	29,340	601,693	39,726	16
<b>Subtotal</b>		<b>631,033</b>	<b>29,340</b>	<b>601,693</b>	<b>39,726</b>	<b>16</b>
Bajo Bravo	Álamo	14,103	7,388	6,715	4,297	3
	San Juan	4,340,235	217,317	4,122,918	34,293	127
	Bravo abajo Falcón	1,043,356	83,557	959,799	4,073	256
<b>Subtotal</b>		<b>5,397,694</b>	<b>308,262</b>	<b>5,089,432</b>	<b>42,663</b>	<b>127</b>
<b>Total</b>		<b>9,098,185</b>	<b>612,329</b>	<b>8,485,856</b>	<b>226,275</b>	<b>40</b>

Tabla 11 - Población y densidad de población en la Región Hidrológica número 24 Bravo – Conchos (DOF, 2011)

Se estima que en la década del 2000 al 2010 la población crecerá en más de un millón de habitantes, pasando de 9'098,185 a 10'141,891 habitantes. Finalmente, las proyecciones hacen esperar una población de 11'640,052 habitantes para el 2025.

La densidad de población es de 40 habitantes por kilómetro cuadrado, menor a la media nacional de 46 habitantes por kilómetro cuadrado.

Sin embargo, existen grandes diferencias a nivel de subregión. La de mayor densidad se presenta en la Subregión Hidrológica Alto Bravo con 175 habitantes por kilómetro cuadrado, seguida por la Bajo Bravo con 127 habitantes por kilómetro cuadrado; en contraste la Subregión Hidrológica Seis Tributarios que sólo tiene una densidad de 13 habitantes por kilómetros cuadrados. La Tabla 11, muestra la densidad de población en la región hidrológica (DOF, 2011).



## **2.6 Efectos esperados del cambio climático.**

La temperatura y la precipitación del sur y del sudoeste de Estados Unidos, han tenido aumentos en los últimos años, tanto así que la región de la cuenca del Río Bravo se ha convertido en una de las regiones más vulnerables ante el cambio climático, ya que se han observado calentamientos con mayor rapidez en los últimos 40 años (Von der Meden, et. al., 2010).

En México, si la precipitación disminuye entre 70 mm. y 130 mm., y la temperatura aumenta entre 1.6°C y 2.0°C, se pronostica que las especies cambiarán en un 40% , además de que aumentarán las migraciones y las extinciones.

A nivel regional, la temperatura ha incrementado en 1°C desde 1970, con un calentamiento mayor al promedio mundial. Esto, a corto plazo provocará un aumento de lluvias intensas, sequías más severas y veranos más calurosos. Además, ha habido una disminución en la cantidad de nieve que hay en las Montañas Rocallosas, lugar de donde se surte de agua la parte alta del Río Grande (Von der Meden, et. al., 2010).

Al aumentar las lluvias intensas en periodos más cortos, el número de inundaciones en el país aumentará y el encajonamiento del cauce de los ríos será cada vez más estrecho y profundo, debido a la acumulación de sedimentos.

Sin embargo, los mayores impactos del cambio climático se esperan en las zonas agrícolas fronterizas, lo que se ve ilustrado en el estudio del INECC sobre escenarios con diferentes anomalías de temperatura del impacto del cambio climático. (Figuras 24 – 27).

Con una anomalía de 2°C, la evaporación podría incrementar en un 7%, el agua almacenada de las presas se reduciría en un 10% y se tendría que aumentar en 11% el

volumen de agua aplicado a los cultivos. En total habría una reducción de 20% en la disponibilidad del agua en la cuenca.

A pesar de los posibles escenarios negativos, existen varias áreas de oportunidad para satisfacer las demandas crecientes del agua en la cuenca del Río Grande-Bravo:

1. Aumentar 40% del agua potable y 20% de la tratada para satisfacer las demandas del consumo humano.
2. Optimizar el uso del agua en la agricultura a través del cambio de métodos por unos más eficientes.
3. Contabilizar el uso del agua superficial y subterráneo como un solo presupuesto de agua para asegurar su uso sustentable.
4. Monitorear física y químicamente los cuerpos de agua.
5. En los ríos de esta cuenca se debe asegurar la asignación efectiva e inmediata del uso ambiental del agua como una medida adaptativa clave ante el cambio climático.

Ante el cambio climático se hace todavía más importante realizar acciones concertadas en contra de la pérdida de suelo y agua (Von der Meden, et. al., 2010).

### **3. MODELO DINÁMICO**

#### **3.1 Descripción del modelo dinámico desarrollado.**

Habiendo estudiado a la cuenca, se puede observar que se tienen problemas en cuanto a estrés hídrico, sobreexplotación de aguas subterráneas y superficiales, y problemas como temperatura en la zona, deforestación en general, contaminación del agua y niveles altos que muestran una mala calidad del agua dentro de la cuenca.

Para analizar esta problemática, se ha decidido crear un modelo sistémico dinámico, el cual tome en cuenta variables, ecológicas, sociales, y variables exógenas, como el cambio climático. Es importante conocer el concepto del manejo integrado, el cual se define como “el manejo guiado por metas explícitas y ejecutado mediante políticas, protocolos y prácticas específicas diseñadas mediante acción participativa y adaptativa a través del monitoreo; la investigación y el aprendizaje colectivo, que basado en nuestro mejor entendimiento de las interacciones y procesos ecológicos, así como de las reglas de interacción social y los procesos de cooperación, conduce al ordenamiento, conservación uso y restauración sustentables de los socio ecosistemas, indispensables para el desarrollo humano.” (Manejo de cuencas, Christensen, et al., 2013)

El modelo dinámico está basado principalmente en obtener datos de la cantidad de agua que se acumula cada año al haber sido afectado por la utilización de la misma por los diferentes usos consuntivos, además de variables como la evaporación, causadas por la temperatura y el cambio climático.

De esta manera, el modelo proporciona información detallada de cuánta agua utiliza cada uso consuntivo de la zona y cuánta agua sobraré después de un año. Es importante

mencionar que se toma en cuenta la cantidad de agua que vuelve a entrar al sistema, por ejemplo, mediante la captación de aguas pluviales y fluviales, o de la que se utiliza para la generación de energía eléctrica.

Ahora bien, para obtener un mejor entendimiento del modelo, es importante mencionar las diferentes variables que se correlacionan dentro de éste. Primeramente, se muestra una imagen general del modelo, desarrollado en la plataforma Vensim.

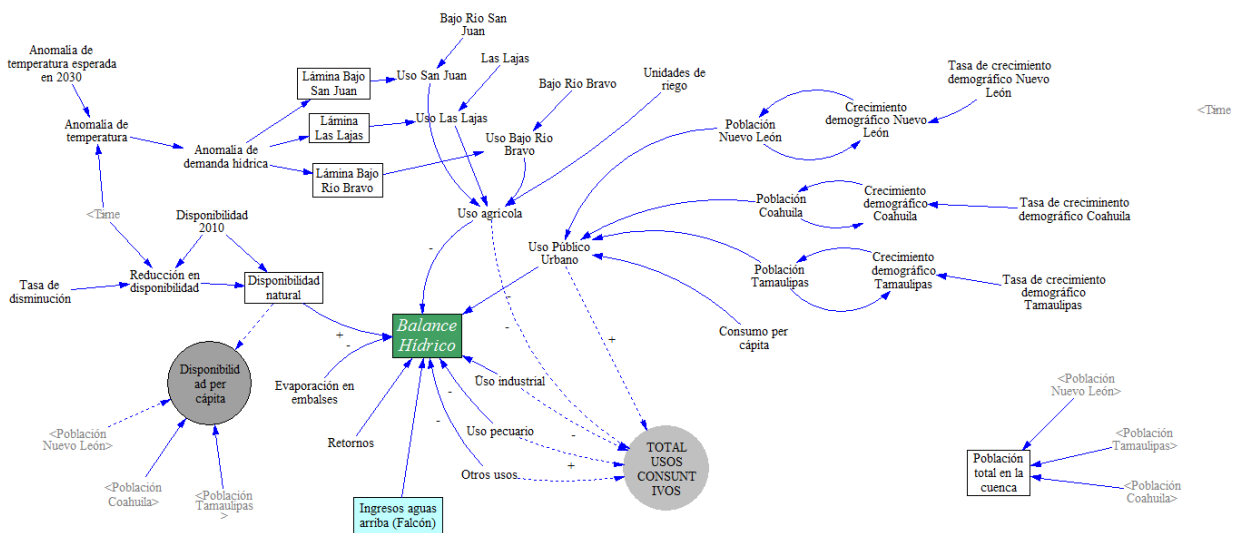


Figura 1 - Modelo dinámico de la cuenca analizado en Vensim

El modelo muestra una red compleja de diferentes variables, las cuáles se interrelacionan, llevando a cabo un análisis complejo de datos. Se puede observar que existen zonas en donde las variables convergen, y que se muestran como los datos más importantes para la recopilación de resultados, los cuales son:

- Balance Hídrico.
- Total de Usos Consuntivos.
- Disponibilidad de agua per cápita.
- Uso agrícola.

- Uso Público Urbano.

Se decide colocar como dato importante y de convergencia al uso agrícola y urbano ya que son los usos que más agua demandan anualmente y que crecen exponencialmente conforme al aumento poblacional. A su vez, estos participan directamente con el total de usos consuntivos, el cual toma en cuenta otros usos, como el industrial, entre otros.

Los demás datos principales son de clara importancia para el análisis de resultados ya que, el total de usos consuntivos muestra la cantidad de agua que anualmente se consume, lo cual genera un decremento en los niveles de reserva para el otro año. Esto, dependerá de la correlación con el clima y temperatura de la zona durante el año, lo cual afectará en gran medida tanto al balance hídrico como a la disponibilidad per cápita de los habitantes que reciben agua de la zona.

Para profundizar en la explicación del modelo, se tomarán en cuenta secciones de éste, para explicar sus diferentes variables y datos adicionales.

### *Anomalías de temperatura, láminas de riego y uso agrícola en general.*

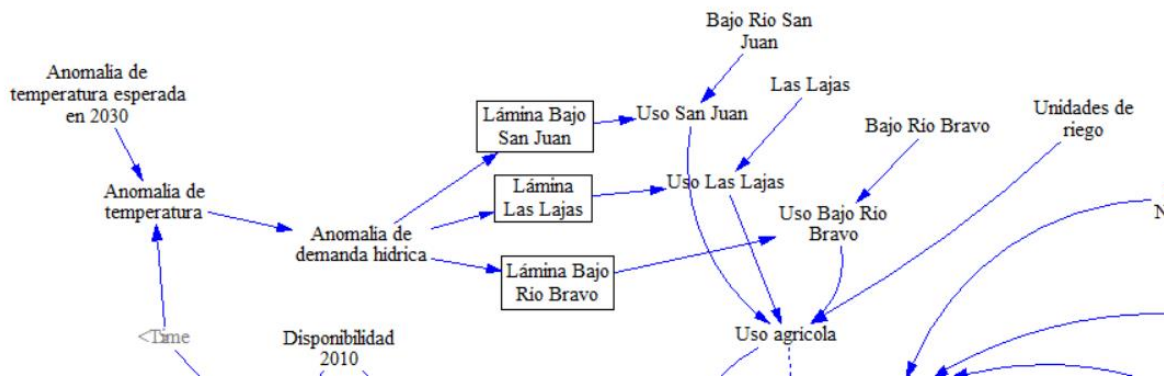


Figura 2 - Sección que analiza anomalías de temperatura, láminas de riego y disponibilidad natural.

La sección mostrada en la Figura 10 desarrolla cuatro variables de importancia, las cuales son:

- Anomalía de temperatura.
- Láminas de riego.
- Disponibilidad de agua por parte de los distritos de riego.
- Uso en los distritos de riego y uso total agrícola.

El modelo está realizado para obtener resultados dentro del futuro cercano, por lo que se escoge el año 2030, el cual está próximo. Para la obtención de la anomalía de la temperatura, se toma como base la obtenida de los escenarios analizados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). El INECC se basa en predicciones realizadas a futuro cercano y lejano, en características que afectan a las zonas del territorio mexicano, como lo son la temperatura y la precipitación medias. Para el análisis de la zona a estudiar con base en los datos y estadísticas del INECC, es necesario ubicar las celdas de interés dentro del denominado “Mapa Índice” para analizar los cambios conforme a un escenario planteado. De esta manera al haber seleccionado las celdas de interés, el INECC proporciona una nube de datos que correspondan a cada celda (tanto para rango de temperaturas como de precipitación) para su posterior análisis.

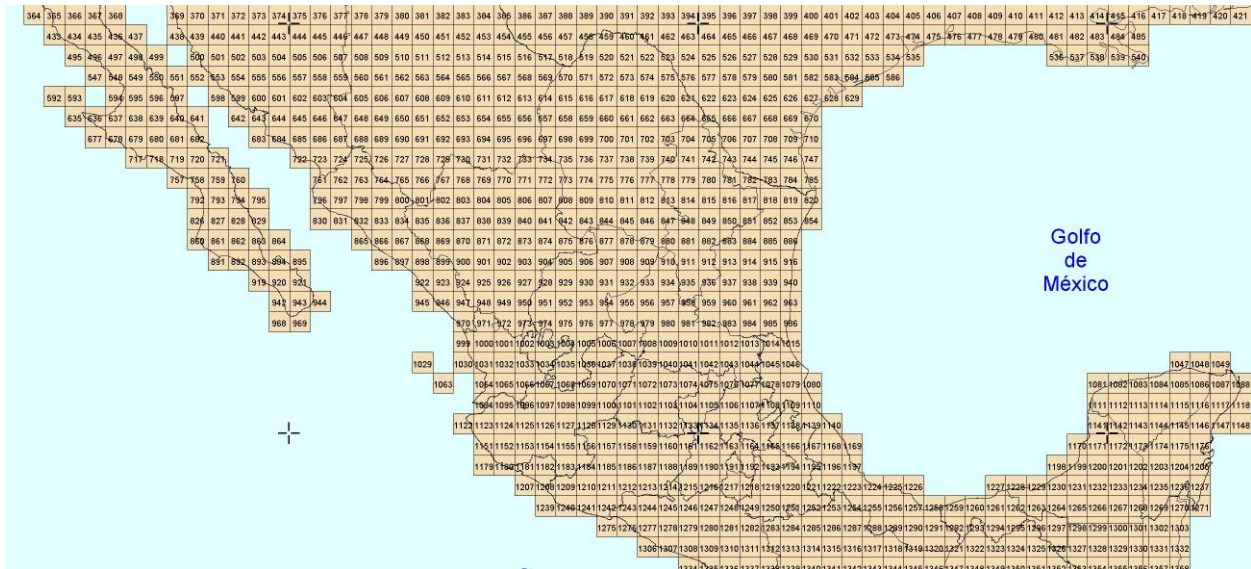


Figura 3 - Mapa índice que analiza una sección determinada del país para los diferentes escenarios. (Von der Meden, 2010)

Los datos del INECC muestran las variaciones de la celda mensualmente, ya que las condiciones varían conforme las estaciones del año y la zona. Por otra parte, el Instituto hace cálculos bajo posibles escenarios de cambio climático. Estos escenarios son denominados como Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés), las cuales tienen como objetivo mostrar escenarios basados en las posibles trayectorias que el cambio climático pudiera producir, de acuerdo con los esfuerzos para limitar los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, por ejemplo; el cual es uno de los principales factores dentro de la problemática del cambio climático.

Es así, que los RCP basados en la zona y de acuerdo con el INECC, se establecen en escenarios marcados en los rangos de 6.0 y 8.5. Estos escenarios marcan temperaturas altas, donde el RCP 6.0 marca un aumento gradual cercano al extremo, mientras que el RCP 8.5 contempla un escenario con un aumento importante en las temperaturas y produce problemas de precipitación escasa.

Ahora bien, al momento de analizar la anomalía de temperatura, ésta repercute en la anomalía de demanda hídrica, la cual es importante debido a que determina la cantidad de agua que los embalses necesitan proporcionar para el uso agrícola. De esta manera, es como se afecta a la demanda hídrica. En la siguiente figura se muestra la introducción de esta variable en el modelo en Vensim.

Variable Information

Name: Anomalía de demanda hídrica

Type: Auxiliary Sub-Type: Normal

Units: adimensional Check Units  Supplementary

Group: .modelo bajo río bravo 1 d: Min: Max:

Equations:  $(0.0308 * \text{Anomalía de temperatura}) + 3e-017$

Figura 4 - Ecuación que analiza la anomalía de demanda hídrica.

Como lo muestra el modelo, la anomalía de demanda hídrica afecta directamente a las láminas de riego que se encuentran consideradas dentro del sistema (Figura 10), éstas son:

- Lámina Bajo San Juan: ubicada como el Distrito de Riego No. 26, en Tamaulipas.
- Lámina Las Lajas: ubicada como el Distrito de Riego No. 31, en Nuevo León.
- Lámina Bajo Río Bravo: ubicada como el Distrito de Riego No. 25, en Tamaulipas.

La lámina indica, en centímetros (cm.), la cantidad de agua concesionada que se le proporciona a cada distrito de riego, por cada hectárea. Ésta, varía de acuerdo con cada cultivo a producirse.

De acuerdo con el informe “Estadísticas Agrícolas 2013-2014”, los distritos de riego antes mencionados recibieron las láminas que se presentan a continuación.



Distrito de Riego		Lámina bruta media (cm)
25	Bajo Río Bravo, Tamaulipas	27
26	Bajo Río San Juan, Tamaulipas	48
31	Las Lajas, Nuevo León	56

Tabla 1 - Lámina media bruta por cada distrito de riego presente en el modelo. (CONAGUA, 2015)

Ahora bien, para modificar la lámina debido a la anomalía de demanda hídrica, es necesario utilizar la siguiente ecuación.

Variable Information

Name Lámina Bajo San Juan

Type Auxiliary Sub-Type Normal

Units m Check Units  Supplementary

Group .modelo bajo río bravo 1 d: Min Max

Equations  $0.5 \cdot (1 + \text{Anomalía de demanda hídrica})$

Figura 5 - Ecuación que analiza la lámina del Bajo San Juan.

La Figura 13 muestra la ecuación para la lámina del Bajo San Juan. Para modificar la ecuación solo basta cambiar la lámina en cm. de cada lámina bruta.

Por último, el objetivo principal de esta sección del modelo es cuantificar el uso agrícola, el cual varía principalmente cada mes, y que por efectos de la anomalía de demanda hídrica (antes modificada por la anomalía de temperatura) ésta se modifica. Para obtener el uso agrícola anual, es necesario conocer el uso de agua de cada distrito de riego. Para determinar el uso, es necesario conocer la lámina afectada por la demanda hídrica, además de obtener los datos de las superficies regables para cada distrito de riego.

De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación en su estudio técnico del año 2011, la subregión hidrológica del Bajo Bravo (División San Juan) muestra las siguientes superficies regables para cada distrito de riego:

Subregión Hidrológica	Distrito de Riego		Superficie Regable (hetáreas)
Bajo Bravo (División San Juan)	25	Bajo Río Bravo	202,548
	26	Bajo San Juan	76,689
	31	Las Lajas	3,852

Tabla 2 - Superficie Regable de la subregión hidrológica Bajo Bravo. (DOF, 2011)

De esta manera, la obtención del Uso Agrícola de cada Distrito de Riego se obtiene mediante la siguiente ecuación, en este caso para el distrito Las Lajas.

Variable Information

Name:

Type:  Sub-Type:

Units:    Supplementary

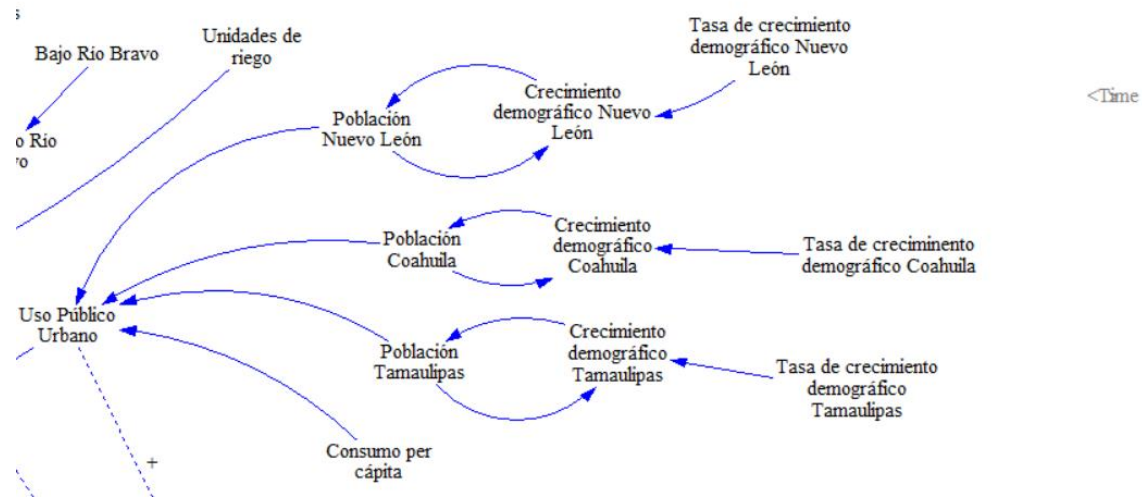
Group:  Min:  Max:

Equations:

Figura 6 - Ecuación para la obtención del uso de Las Lajas.

Finalmente, para obtener el Uso Agrícola los tres usos deben ser sumados, como se muestra en la Figura 10.

### *Uso Público Urbano y crecimiento demográfico.*



*Figura 7 - Sección del modelo que analiza el Uso Público Urbano.*

En este segmento del modelo, el uso público urbano se caracteriza principalmente mediante factores como:

- Población inicial de cada estado (considerando la población respectiva en la cuenca)
- Tasa de crecimiento demográfico por estado
- Consumo per cápita

Ya que dentro del modelo se desea obtener un análisis en cuanto a los recursos hídricos dentro del futuro cercano, el análisis tanto del modelo como los datos de población se basa en el año 2010, de esta manera el análisis colabora en mostrar lo que ocurriría en un periodo de 20 años en el futuro.

Ahora bien, dentro del uso público urbano, la cuenca del Bajo Bravo distribuye sus recursos hacia los siguientes estados:

- Tamaulipas.

- Nuevo León.
- Coahuila.

Dentro de estos estados no todos sus municipios son beneficiarios de la cuenca, es por esto, que se realiza un compendio de todos los municipios y entidades federativas que participan dentro de la cuenca del Bajo Bravo.

Estado	Municipios y Entidades Federativas que participan dentro de la cuenca del Bajo Bravo			
Nuevo León	Abasolo	Ciudad General Terán	Guadalupe	Pesquería
	Cadereyta Jiménez	Ciudad Sabinas Hidalgo	Higueras	Rayones
	Carmen	Ciudad Santa Catarina	Los Aldamas	Salinas Victoria
	China	Doctor Coss	Los Herreras	San Nicolás de los Garza
	Ciénega de Flores	Doctor González	Los Ramones	San Pedro Garza García
	Ciudad Apodaca	Galeana	Marín	Santiago
	Ciudad Benito Juárez	García	Melchor Ocampo	Villaldama
	Ciudad Cerralvo	General Bravo	Mina	
	Ciudad de Allende	General Treviño	Montemorelos	
	Ciudad General Escobedo	General Zuazua	Monterrey	
Coahuila	Castaños	Ramos Arizpe	Saltillo	General Cepeda
	Cuatro Ciénegas	Arteaga	Parras	
Tamaulipas	Miguel Alemán	Mier	Ciudad Río Bravo	Heroica Matamoros
	Ciudad Camargo	Ciudad Gustavo Díaz Ordaz	Reynosa	Valle Hermoso

Tabla 14 - Municipios y Entidades Federativas que participan en la cuenca del Bajo Bravo. (DOF, 2011)

En cuanto a crecimiento poblacional, el total de población que se predice para los municipios anteriormente mencionados se muestra en la siguiente tabla.

	Incremento Poblacional Esperado Anual		
Año	Nuevo León	Coahuila	Tamaulipas
2010	4,056,842	881,760	1,260,018
2011	4,106,415	896,952	1,279,505
2012	4,156,756	911,698	1,299,271
2013	4,209,927	925,884	1,318,650
2014	4,265,168	939,658	1,337,749
2015	4,321,573	953,049	1,356,528
2016	4,378,752	966,109	1,374,999
2017	4,436,525	978,902	1,393,208
2018	4,494,367	991,424	1,411,109
2019	4,551,842	1,003,657	1,428,653
2020	4,608,887	1,015,617	1,445,828
2021	4,665,535	1,027,348	1,462,745
2022	4,721,835	1,038,892	1,479,516
2023	4,777,616	1,050,232	1,496,084
2024	4,832,778	1,061,363	1,512,429
2025	4,887,226	1,072,270	1,528,525
2026	4,940,922	1,082,951	1,544,345
2027	4,993,848	1,093,412	1,559,879
2028	5,045,960	1,103,650	1,575,126
2029	5,097,207	1,113,659	1,590,065
2030	5,147,489	1,123,408	1,604,646

Tabla 15 - Incremento Poblacional Esperado Anual.

Refiriéndose a la tasa de crecimiento anual, los datos son los siguientes.

Año	Tasa de Crecimiento Poblacional (%)		
	Nuevo León	Coahuila	Tamaulipas
2010	1.2198	1.7229	1.54651
2011	1.2198	1.7229	1.54651
2012	1.22318	1.64404	1.54489
2013	1.27609	1.55603	1.49147
2014	1.30897	1.48767	1.44842
2015	1.3192	1.42505	1.40376
2016	1.31986	1.37035	1.36165
2017	1.31618	1.32423	1.32428
2018	1.30062	1.27913	1.28485
2019	1.27571	1.23388	1.2433
2020	1.25019	1.19165	1.2022
2021	1.22607	1.15505	1.17007
2022	1.20375	1.12365	1.14649
2023	1.17836	1.09158	1.11985
2024	1.15163	1.05988	1.09254
2025	1.12369	1.02762	1.06424
2026	1.09573	0.99606	1.03494
2027	1.06817	0.96603	1.00587
2028	1.04044	0.93637	0.97745
2029	1.01244	0.90682	0.94846
2030	0.98325	0.87546	0.91701

Tabla 16 – Tasas esperadas de Crecimiento Poblacional Anual.

Ahora bien, debido al crecimiento poblacional anual, se debe considerar una tasa de crecimiento por estado, considerando solamente los estados mencionados anteriormente para poder así, obtener un análisis marginal para la cuenca del Bajo Bravo. La tasa de crecimiento

es dependiente del tiempo, por lo que, a partir de un análisis predictivo de aumento poblacional, se obtiene la tasa de crecimiento. De esta manera, habiendo obtenido la tasa de crecimiento demográfico por estado y su población, se continúa a conocer el crecimiento demográfico de la zona.

Variable Information	
Name	Crecimiento demográfico Coahuila
Type	Auxiliary
Sub-Type	Normal
Units	<input type="text"/> Check Units <input type="checkbox"/> Supplementary
Group	.modelo bajo río bravo 1 d: Min <input type="text"/> Max <input type="text"/>
Equations	Población Coahuila*Tasa de crecimiento demográfico Coahuila

Figura 16 - Ecuación para la evaluación del crecimiento demográfica en Coahuila. Modelo Vensim.

La Figura 16 muestra una fórmula donde se consideran tanto la población como la tasa de crecimiento (aplicable para los tres estados participantes en el modelo). Con ayuda del modelo, se puede observar que el crecimiento demográfico entra en un círculo causal que implica que, al crecer, ya sea la población o la tasa de crecimiento, este afecta directamente a la otra, alimentándose mutuamente, generando, por consiguiente, un crecimiento más acelerado de la región.

Para la obtención de la cantidad de agua que necesita la región del Bajo Bravo, es necesario considerar el parámetro de dotación de agua, la cual se identifica por la cantidad de agua que cada poblador utiliza por día. Para efectos de este modelo, se determinó una dotación promedio de 250 litros/hab/día. De esta manera, habiendo obtenido el consumo por persona, denominado consumo per cápita, se procede a obtener el uso público urbano, el cual se expresa a continuación de manera gráfica.

Variable Information	
Name	Uso Público Urbano
Type	Auxiliary
Sub-Type	Normal
Units	millones de m3
Check Units	<input type="checkbox"/>
Supplementary	<input type="checkbox"/>
Group	.modelo bajo río bravo 1 d:
Min	
Max	
Equations	$((\text{Población Nuevo León} + \text{Población Coahuila} + \text{Población Tamaulipas}) * \text{Consumo per cápita}) / 1e+006$

Figura 17 - Ecuación para la obtención del Uso Público Urbano.

### *Reducción de disponibilidad natural, per cápita y demanda hídrica*

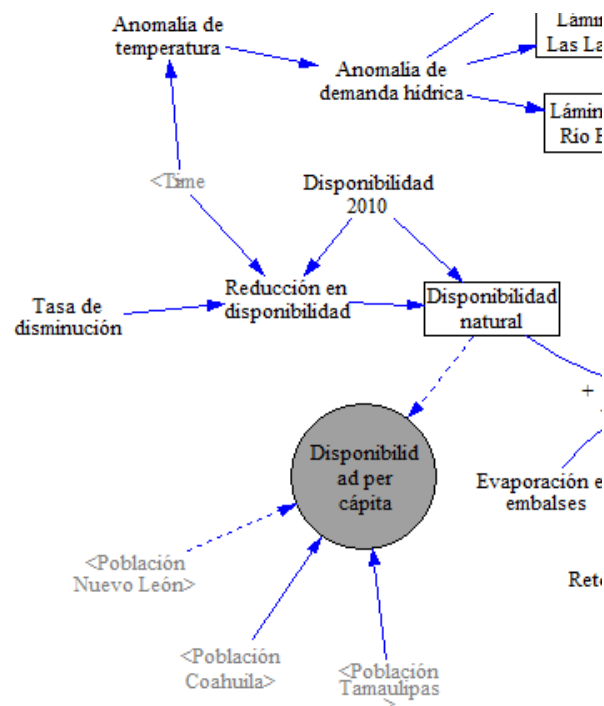


Figura 18 - Modelo Vensim, sección encargada para analizar la disponibilidad del agua y demanda hídrica.

Dentro de esta parte del modelo, se puede observar un dato principal, que es la disponibilidad de agua, el cual depende de una variable importante como lo es la tasa de disminución en cuanto a disponibilidad hídrica.

La disponibilidad de agua se divide en dos zonas. La primera, indica la disponibilidad inicial del agua para poder analizar la cuenca mediante el modelo y, como es de recordarse,



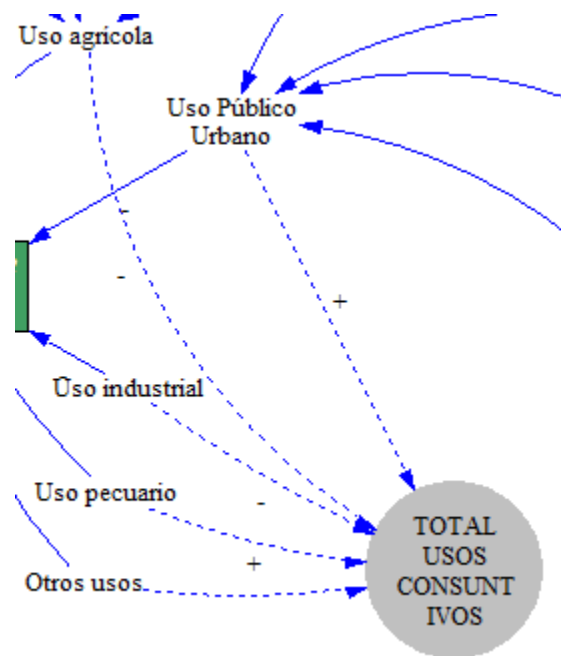
el modelo comienza con los datos de la cuenca referidos al año 2010. La disponibilidad inicial se observa en el modelo como “Disponibilidad 2010”, la cual participa activamente en la reducción de disponibilidad y la disponibilidad natural. Es necesario observar el cambio en la “Reducción de Disponibilidad” mediante el uso de una ecuación, en donde aplique el factor de reducción obtenido (y colocado en la variable de “Tasa de disminución”) a partir de los escenarios planteados anteriormente. Adicionalmente, se debe aplicar el factor tiempo, el cual varía hasta un rango de 20 años, y, por último, retomar la disponibilidad inicial.

Variable Information	
Name	Reducción en disponibilidad
Type	Auxiliary
Sub-Type	Normal
Units	millones de metros cúbicos
	<input type="checkbox"/> Check Units <input type="checkbox"/> Supplementary
Group	.modelo bajo río bravo 1 d:
Min	
Max	
Equations	Disponibilidad 2010*Tasa de disminución*Time

Figura 19 - Ecuación para analizar la reducción en disponibilidad dentro de la cuenca.

Como lo muestra el modelo, la reducción en disponibilidad participa junto a la disponibilidad inicial para la obtención de la “Disponibilidad natural”. Ésta, a su vez, afecta directamente a la disponibilidad per cápita de la población que utiliza el agua, la cual debe ser mayor al consumo per cápita para evitar así problemas como escasez de agua.

### *Total de Usos Consuntivos*



*Figura 20 - Análisis del Total de Usos Consuntivos. Modelo Vensim.*

Así como el uso agrícola y el uso público urbano tienen gran relevancia dentro de la demanda hídrica, también existen otros sectores, los cuales se encuentran presentes dentro del desarrollo y necesidades de la población en general. Sus datos de demanda son obtenidos a partir de la extracción de agua. Mediante la siguiente tabla se puede observar el volumen de extracción en la región.

<b>Volúmenes de extracción anual de aguas superficiales en la zona del Bajo Bravo (División Álamo, San Juan y Bravo (Abajo Falcón)</b>	
<b>Uso</b>	<b>Volumen (millones de metros cúbicos)</b>
Industrial	7.004
Pecuario	0.708
Otros	35.914

Tabla 17 - Volúmenes de extracción anual de aguas subterráneas. (DOF, 2011)

De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación, los usos agrícolas y el público urbano utilizan el 98.4% del agua concesionada, por lo que existe un importante 1.6% de agua, el cual es expresado en la tabla anterior. A pesar de que en porcentaje indique una cantidad baja, esta significa alrededor de 44 millones de metros cúbicos de agua, los cuales son importantes dentro de la repartición del recurso vital.

**Balance Hídrico**

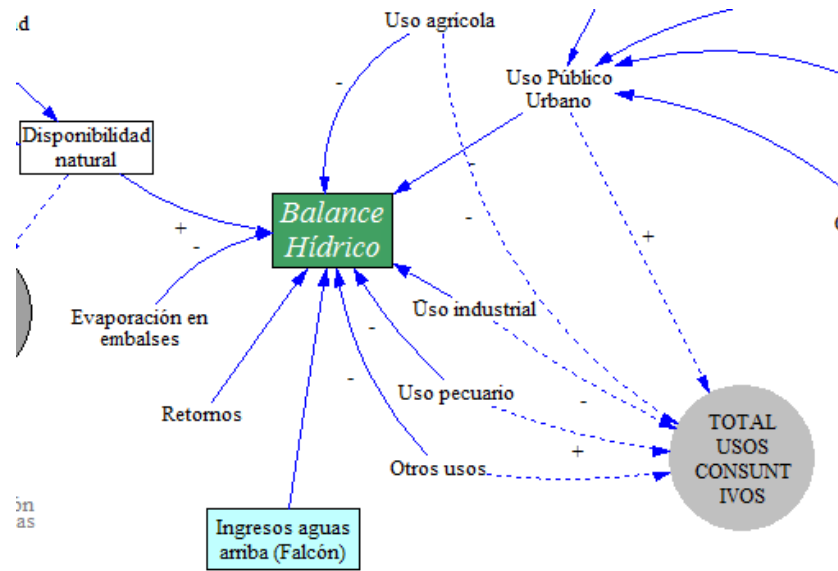


Figura 21 - Análisis del Balance Hídrico. Modelo Vensim.

En esta última parte del modelo, se puede observar un conjunto de flechas, las cuales, como se muestra en la imagen, presentan signos matemáticos, los cuales atribuyen el significado de propiedades de atribución o extracción.

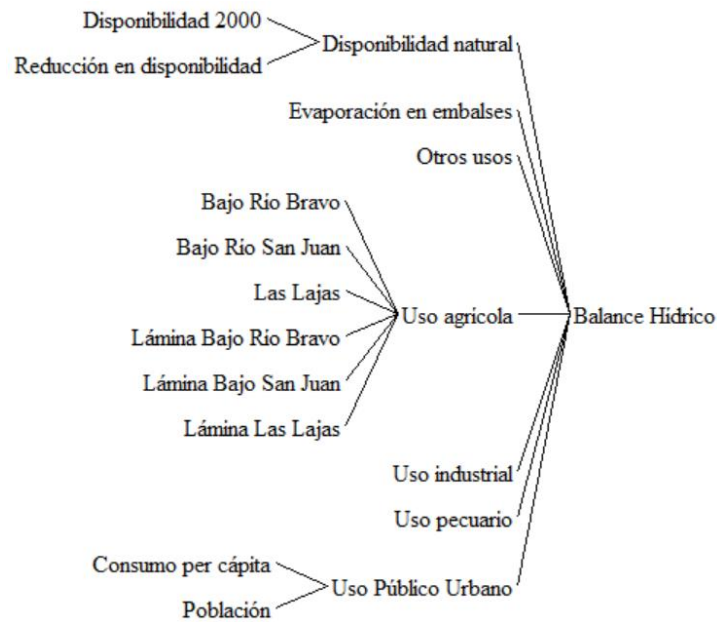


Figura 22 - Árbol de causas para el balance hídrico.

Mediante el árbol de causas mostrado en la figura anterior, se pueden observar 7 grupos que participan dentro del balance hídrico. Los datos relacionados a usos consuntivos (uso agrícola, uso industrial, uso pecuario, uso público urbano y otros usos), así como la evaporación de embalses, pertenecen a la propiedad de extracción de recursos. Por otra parte, la disponibilidad natural, el ingreso aguas arriba (Presa Falcón) y los retornos, pertenecen a la propiedad de atribución de recursos hídricos.

Variable Information		Edit a	
Name	Balance Hidrico	All	
Type	Auxiliary	Sub-Type	Normal
Units	millones de m3	Check Units	<input type="checkbox"/> Supplementary
Group	.modelo bajo río bravo 1 d:	Min	Max
Equations	Disponibilidad natural-Usos agrícolas-Usos industriales-Usos Públicos Urbanos-Usos pecuarios-Otros usos-Evaporación en embalses+Retornos+Ingresos aguas arriba (Falcón)"		

Figura 23 - Ecuación del Balance Hídrico.

La ecuación presentada anteriormente en la figura presenta la forma en la que se podrá obtener la disponibilidad de uso del agua. El análisis del balance hídrico, podrá acercarse a un análisis general de la zona, en la cual se puede observar cómo es que el balance incrementa o disminuye anualmente, cómo es que afecta el cambio climático y las variables de crecimiento y consumo per cápita.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Escenarios probados

La interpretación de datos del modelo proporciona la parte medular dentro del entendimiento de su funcionamiento, más no indica el análisis del mismo. Dentro del modelo, se consideran dos RCP a analizar, tanto en la temperatura media como la precipitación promedio. Los RCP a analizar dentro del modelo son:

- RCP 6.0

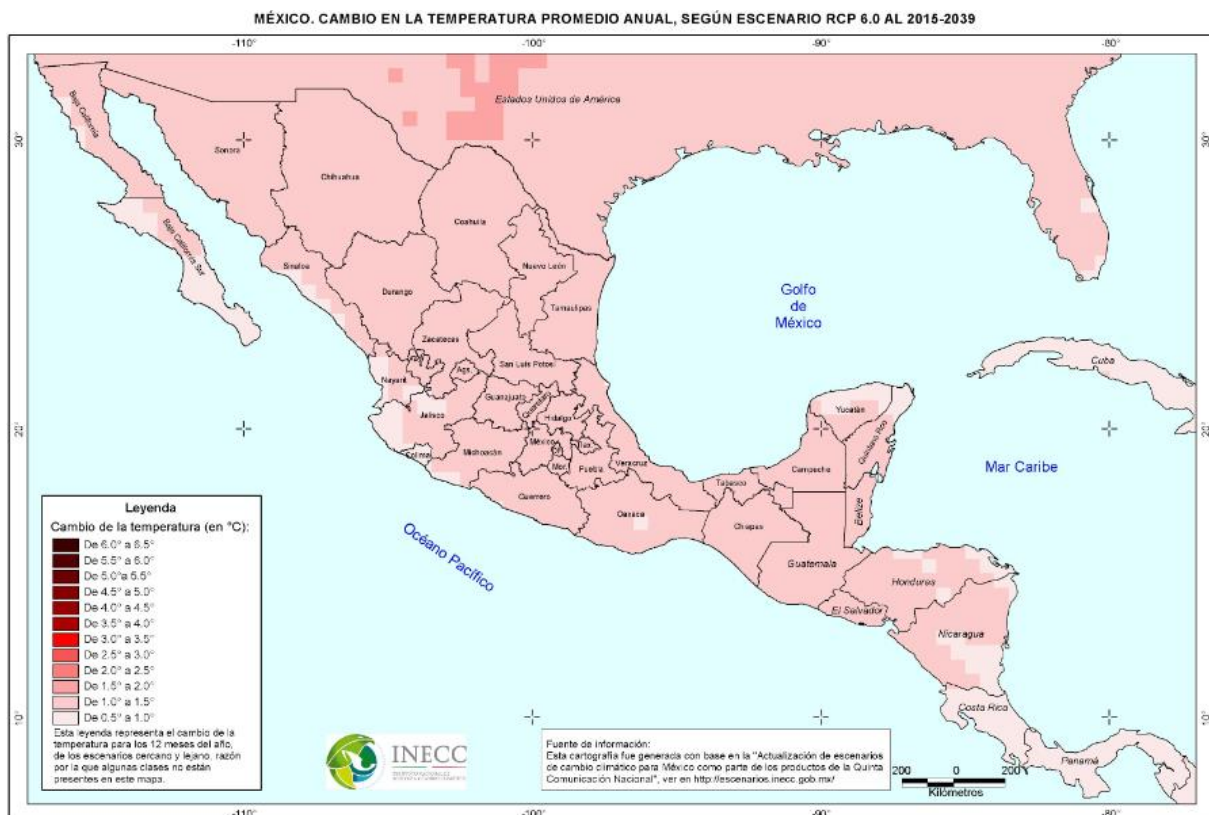


Figura 24 - Cambio en la temperatura promedio anual en RCP 6.0. (Von der Meden, et. al., 2010)

De acuerdo con la figura anterior, se puede observar que, para la región del Bajo Bravo, se predice un incremento en temperatura dentro del rango de 1.0 °C a 1.5°C.



*Figura 25 - Cambio en la precipitación promedio anual en RCP 6.0. (Von der Meden, et. al., 2010)*

De acuerdo con la figura anterior, se puede observar que, para la región del Bajo Bravo, se predice un decremento en la precipitación dentro del rango de 0% a 20%.

- RCP 8.5

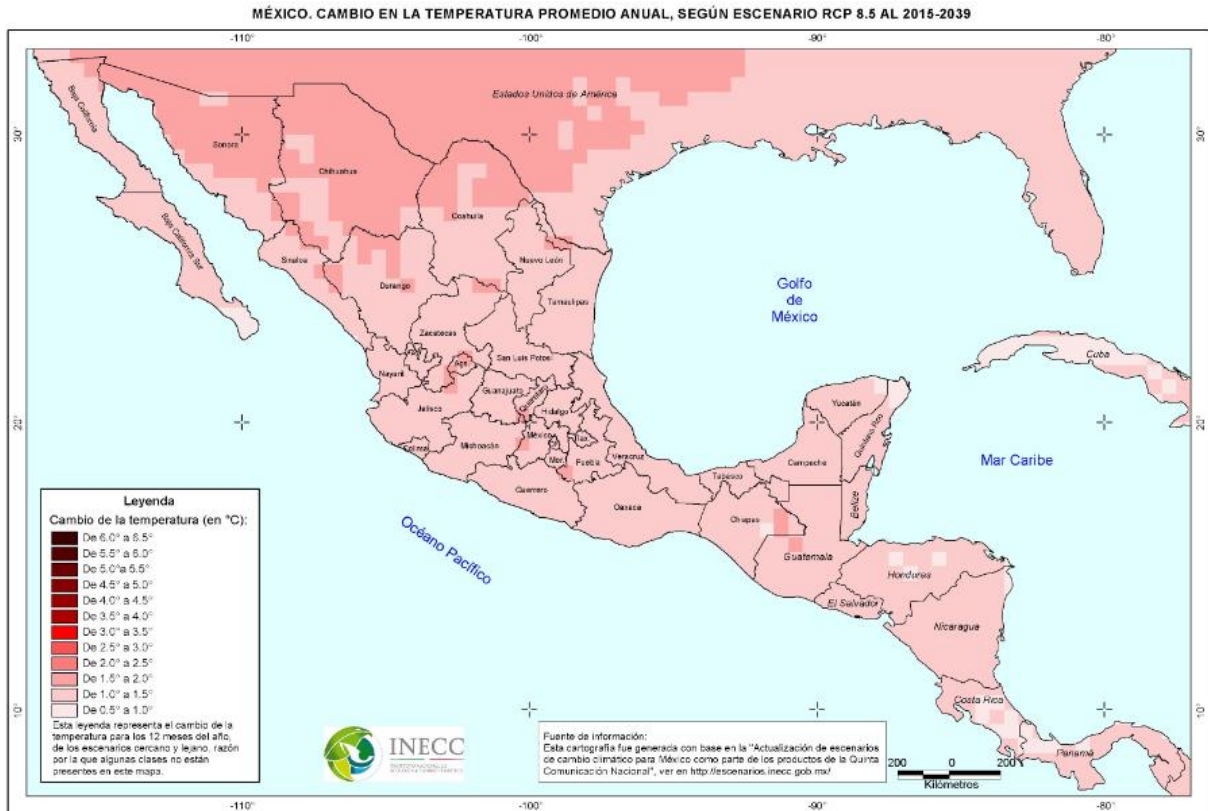


Figura 26 - Cambio en la temperatura promedio anual en RCP 8.5. (Von der Meden, et. al., 2010)

De acuerdo con la figura anterior, el cambio de temperatura media anual se aumentaría en un rango de 1.0°C a 2.5°C.



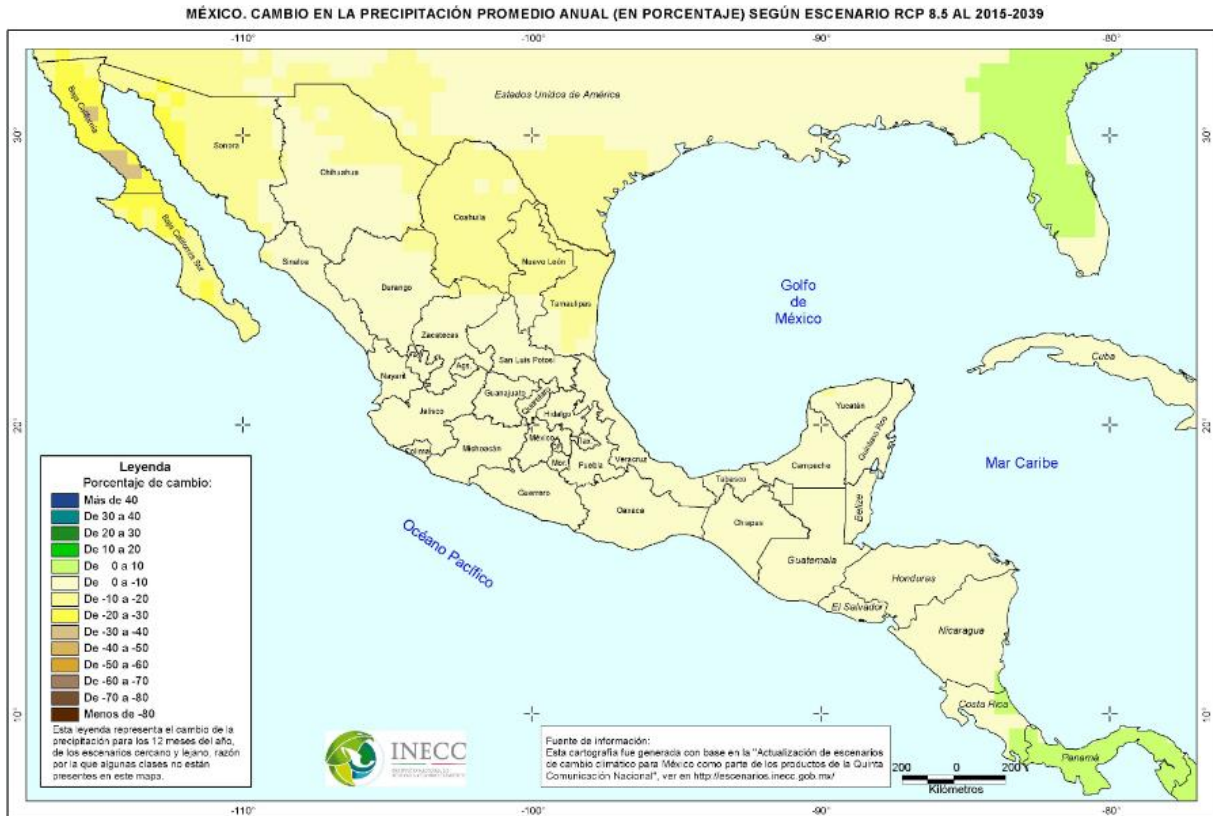


Figura 27 - Cambio en la precipitación promedio anual en RCP 8.5. (Von der Meden, et. al., 2010)

Por otro lado, de acuerdo con la figura anterior, el decremento en cuanto a precipitación media anual sería en un rango de 0% a 20%.

Al observar los rangos tan amplios tanto de incremento de temperatura media como en decremento de la precipitación media, se precisa en observar a detalle las zonas consideradas, para lo cual se emplea el mapa índice (mencionado en la Anomalía de demanda hídrica del capítulo anterior), considerando solamente las celdas de la malla que son de importancia dentro del análisis de la cuenca del Bajo Río Bravo.

620	621	622	623	624	625	626	627
663	664	665	666	667	668	669	670
703	704	705	706	707	708	709	710
740	741	742	743	744	745	746	747
778	779	780	781	782	783	784	785
813	814	815	816	817	818	819	820
847	848	849	850	851	852	853	854
880	881	882	883	884	885	886	
910	911	912	913	914	915	916	
934	935	936	937	938	939	940	

*Figura 28 - Sección aproximada de las celdas utilizadas del mapa índice para obtener el análisis de la cuenca. (Von der Meden, et. al., 2010)*

De esta manera, se procede a extraer la información de la nube de datos proporcionada por el INECC y necesaria para la zona del Bajo Bravo, presentada en la figura anterior. Al realizar la selección de las celdas, se procede a obtener un análisis más preciso para el incremento de la temperatura y decremento en la precipitación media.

	Escenarios planteados					
	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
No. de celda	Incremento en temperatura media anual (°C)			Decremento en precipitación media anual (%)		
620	1.50	1.43	1.53	-12.6	-15.2	-9.9
621	1.48	1.39	1.54	-12.3	-13.8	-10.5
663	1.48	1.39	1.52	-12.6	-14.8	-10.5
664	1.45	1.36	1.50	-12.8	-14.3	-10.9
665	1.44	1.35	1.49	-12.8	-13.0	-11.3
702	1.46	1.40	1.42	-12.5	-15.9	-11.0
703	1.43	1.36	1.43	-12.2	-15.2	-10.8
704	1.41	1.34	1.44	-13.0	-13.7	-11.5
705	1.41	1.32	1.47	-13.2	-13.1	-11.8
738	1.45	1.37	1.44	-10.5	-13.9	-10.8
739	1.45	1.38	1.45	-11.1	-15.3	-11.8
740	1.44	1.40	1.44	-11.1	-14.2	-10.8
741	1.42	1.37	1.44	-11.7	-13.4	-11.2
742	1.40	1.33	1.46	-12.2	-12.7	-11.1
743	1.36	1.28	1.45	-12.0	-11.3	-11.7
777	1.41	1.34	1.42	-10.3	-14.3	-11.2
778	1.40	1.33	1.44	-11.0	-14.1	-11.3
779	1.39	1.35	1.43	-11.2	-11.2	-10.9
780	1.34	1.32	1.38	-12.3	-10.6	-11.2
781	1.38	1.27	1.50	-12.3	-10.6	-11.7
782	1.35	1.22	1.50	-12.1	-11.8	-12.0
812	1.40	1.31	1.45	-9.8	-12.6	-10.7
813	1.30	1.21	1.28	-9.4	-12.2	-10.2
814	1.40	1.32	1.46	-10.1	-10.0	-10.8
815	1.36	1.30	1.44	-10.9	-10.0	-10.9
816	1.34	1.23	1.43	-11.5	-10.4	-11.1
817	1.33	1.19	1.49	-11.8	-11.2	-11.9
818	1.23	1.16	1.39	-11.6	-12.1	-12.2
847	1.22	1.33	1.33	-9.5	-11.5	-10.2
848	1.24	1.31	1.34	-9.9	-9.9	-10.3
849	1.35	1.27	1.40	-10.0	-9.0	-10.8
850	1.31	1.22	1.38	-11.0	-9.3	-11.8
851	1.27	1.18	1.39	-11.7	-10.2	-12.7
880	1.27	1.19	1.37	-9.1	-11.1	-12.1
881	1.22	1.29	1.37	-9.4	-10.7	-10.5
882	1.29	1.18	1.39	-10.0	-9.1	-10.4
883	1.29	1.21	1.37	-10.3	-9.4	-11.5
911	1.23	1.20	1.35	-8.9	-9.8	-9.6
912	1.21	1.23	1.36	-9.5	-8.9	-9.5
935	1.27	1.12	1.40	-8.8	-9.4	-9.0
936	1.07	1.21	1.18	-10.0	-9.8	-9.7

Tabla 18 - Cambios analizados por cada escenario probado en el periodo 2015-2039. (Von der Meden, et. al., 2010)

En el modelo, tanto la anomalía de temperatura, como la tasa de disminución de la precipitación, toma un valor único como anomalía al final del periodo, por lo que se coloca el valor promedio, con lo cual se determinan los escenarios a probar. Estos se muestran a continuación.

	Cuenca del Bajo Río Bravo	
Escenarios planteados	Incremento promedio en la temperatura al final del periodo (°C)	Decremento anual promedio en laprecipitación (%)
RCP 6.0	1.22	-0.52
RCP 8.5	1.35	-0.568

Tabla 19 - Cambios en la temperatura y precipitación por RCP para el periodo 2015-2039. (DOF, 2011)

Debido a que la anomalía de temperatura y la tasa de disminución de la precipitación son dependientes en cuanto a la elección del escenario planteado; estos afectan de manera diferente dentro del análisis para cada caso.

### *Análisis de Escenario sin influencia del cambio climático*

En las gráficas siguientes se resumen los resultados de la simulación del modelo en Vensim bajo el escenario sin cambio climático. En este caso, la oferta no se modifica, pero la demanda si lo hace, debido al crecimiento de la población.

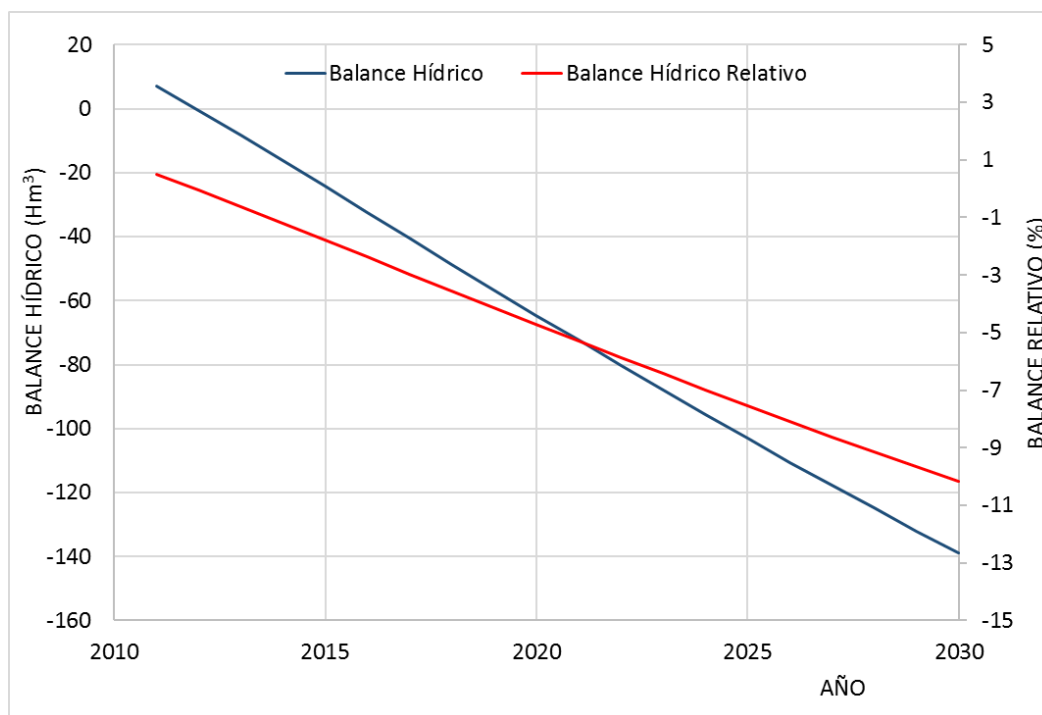


Figura 29 - Hídrico absoluto y relativo. Escenario base.

La Figura 29 muestra una gráfica que plantea el déficit de recursos hídricos casi en totalidad del periodo de análisis. Es importante recordar que la oferta no cambia, es decir, no hay afectaciones exógenas como el cambio climático. Se puede observar que al final del periodo de análisis se obtiene un balance negativo de poco menos de 140 millones de metros cúbicos de agua.

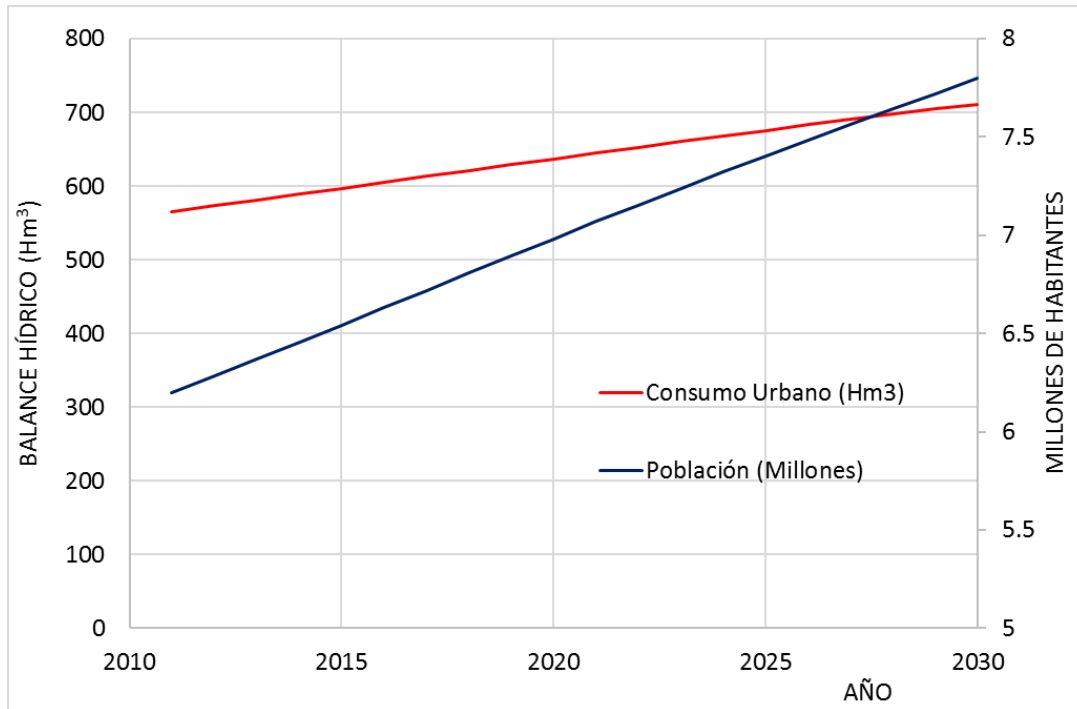


Figura 30 - Cambios en la población y demanda para uso público urbano. Escenario base.

La parte del Uso Público Urbano muestra que el crecimiento es demasiado acelerado, obteniendo un crecimiento de poco más de dos millones de habitantes dentro del periodo de 20 años.

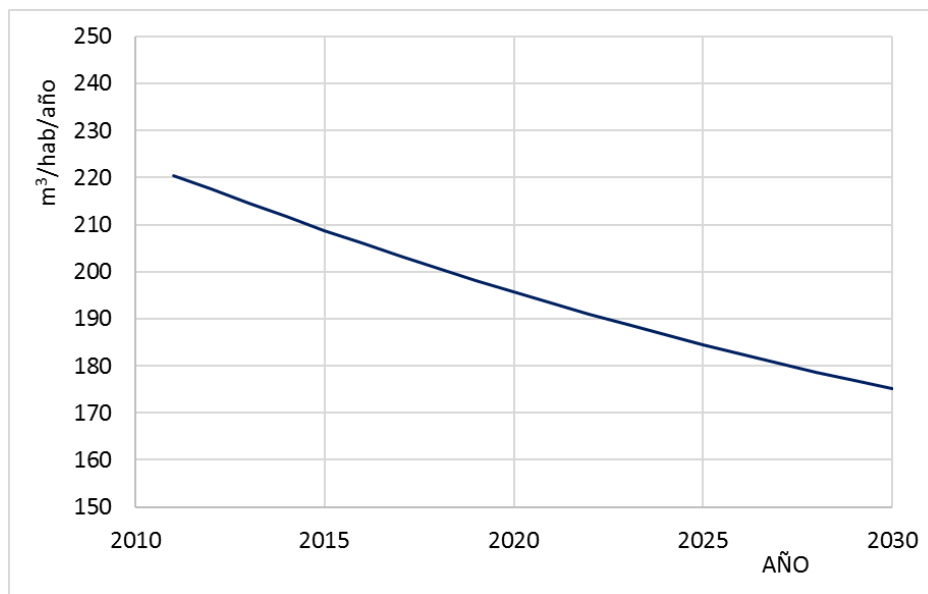


Figura 31 - Cambio en la disponibilidad per cápita. Escenario base.

Como puede observarse, en esta región de la cuenca del Río Bravo, debido a la concentración de población, el uso para abastecimiento urbano ya es una componente importante de la demanda, y continuará creciendo. Así, aún sin cambio climático, la disponibilidad per cápita es ya reducida y continuará disminuyendo a las tasas previstas de crecimiento demográfico.

### *Análisis de Escenario con respecto al RCP 6.0*

Dentro del análisis de RCP 6.0 se toma en cuenta un aumento en la temperatura media anual de  $1.22^{\circ}\text{C}$  al final del periodo, mientras que la reducción en la precipitación media anual es

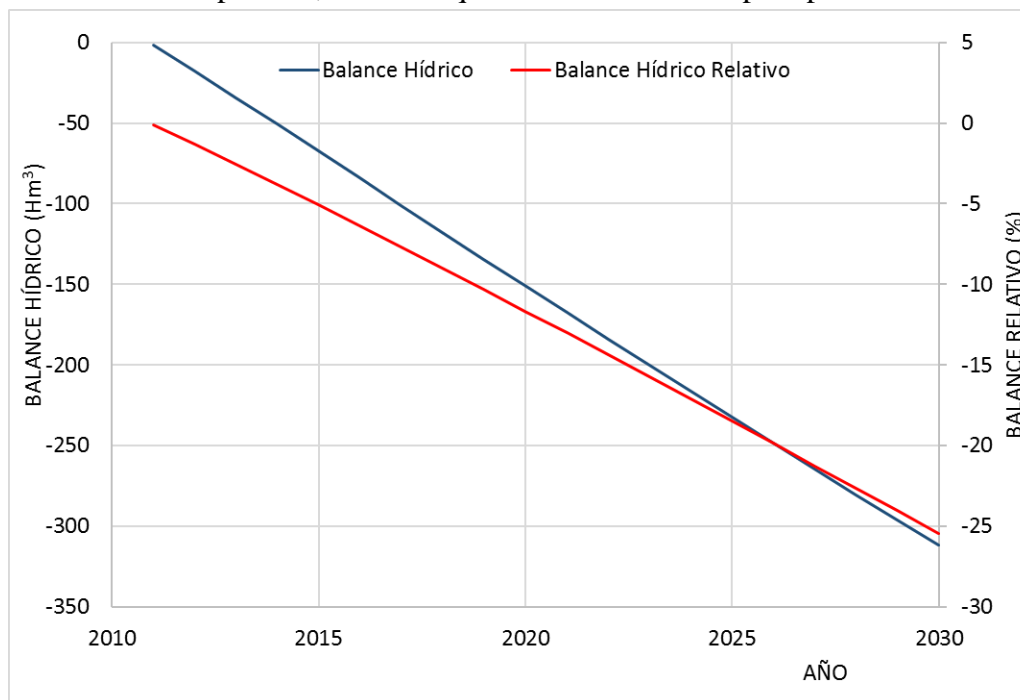


Figura 32 - Balance hídrico absoluto y relativo. Escenario RCP 6.0

de  $-0.52\%$ , acumulando una reducción total de  $11.92\%$  en la cuenca, equivalente a 71 milímetros. Los resultados obtenidos por medio del análisis dinámico del modelo arrojan las siguientes observaciones.

En comparación con los resultados obtenidos en el escenario base (Figura 29), el déficit es más pronunciado, al acabarse en un periodo más reducido de tiempo (menos de 5 años),

además de acumularse un balance hídrico negativo de poco más de 300 millones de metros cúbicos de agua.

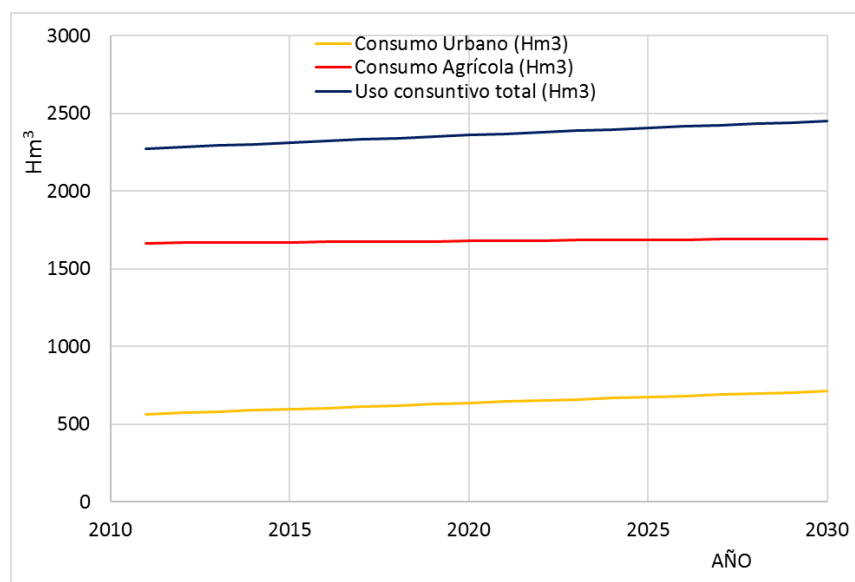


Figura 33 - Cambio en las demandas totales consuntivas, de riego y urbana. Escenario RCP 6.0.

El consumo combinado, mostrado en la Figura 33 indica que el consumo agrícola no cambia, mientras que el consumo urbano si presenta cambios. Lo anterior es debido a que el consumo agrícola se tomó como una variable fija, donde las dotaciones no cambiarían en proporción a la demanda, ya sea por cambio climático o cambio en las zonas de riego. En cambio, el consumo urbano es cambiante debido a las tasas de crecimiento, que afectan directamente a la demanda hídrica y que en consecuencia se modificarían aspectos como la disponibilidad per cápita, reduciendo las dotaciones disponibles por persona conforme al paso de los años.



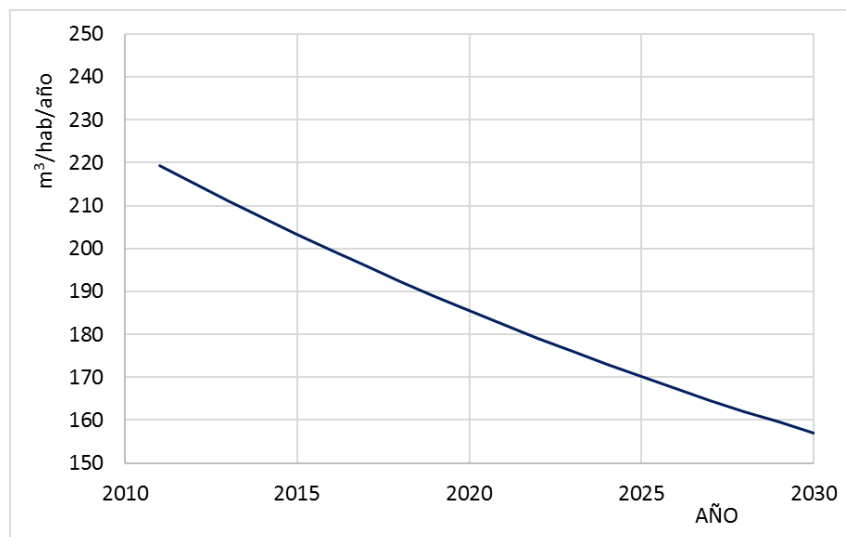


Figura 34 - Disponibilidad per cápita. Escenario RCP 6.0.

### ***Análisis de Escenario con respecto al RCP 8.5***

Dentro del análisis de RCP 8.5 se toma en cuenta un aumento en la temperatura media anual de 1.42°C, mientras que la reducción en la precipitación media anual es de -0.567% de manera anual, acumulando una reducción total de 11.92% en la cuenca. Los resultados obtenidos por medio del análisis dinámico del modelo arrojan las siguientes observaciones.

La combinación gráfica de los tres resultados, permiten un análisis más profundo y conciso.

## Balance Hídrico

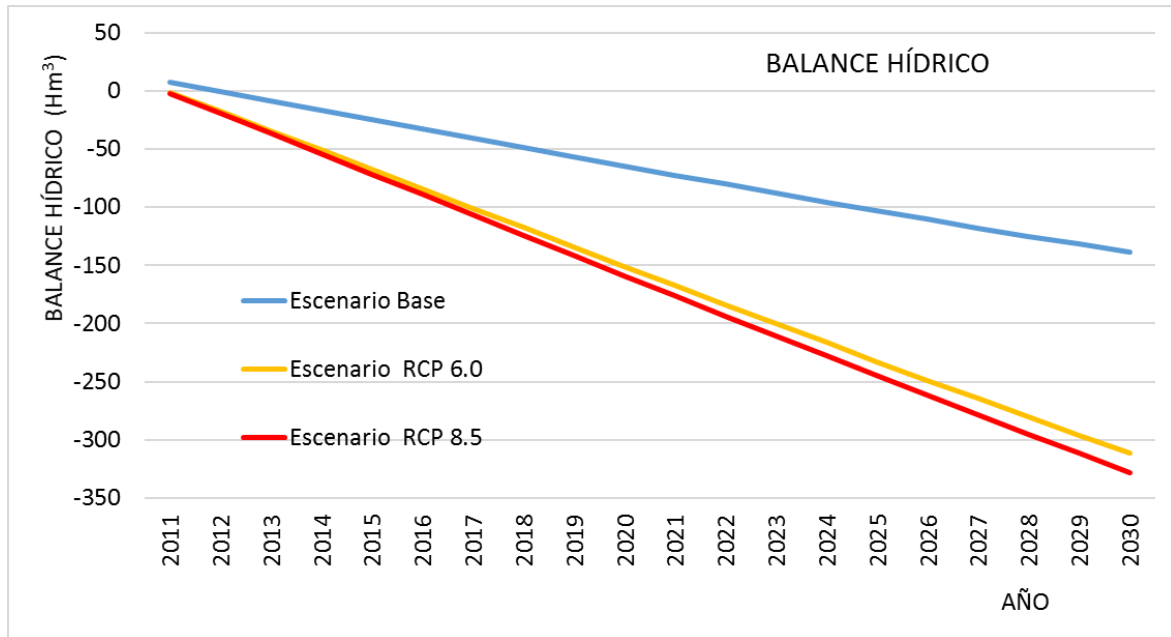


Figura 35 - Balance Hídrico combinado (por escenarios).

Con base en la gráfica anterior, se muestra una clara tendencia presentada dentro de esta condición. El Balance Hídrico, combina tanto los usos consuntivos, la evaporación del agua, el ingreso de aguas por parte de la Presa Falcón y la disponibilidad natural que se obtiene.

El análisis muestra una tendencia negativa que, para este caso, significa la disminución de la cantidad de agua disponible a medida que los años pasen. Es decir, si para el inicio del análisis se cuenta con un aproximado de 430 millones de metros cúbicos de agua, para el año 20, el cual marca el fin del análisis escogido, los niveles de agua se habrían reducido casi en un 50%. Es evidente que existen varios factores a analizar, los cuales se muestran a continuación.

### Disponibilidad per Cápita

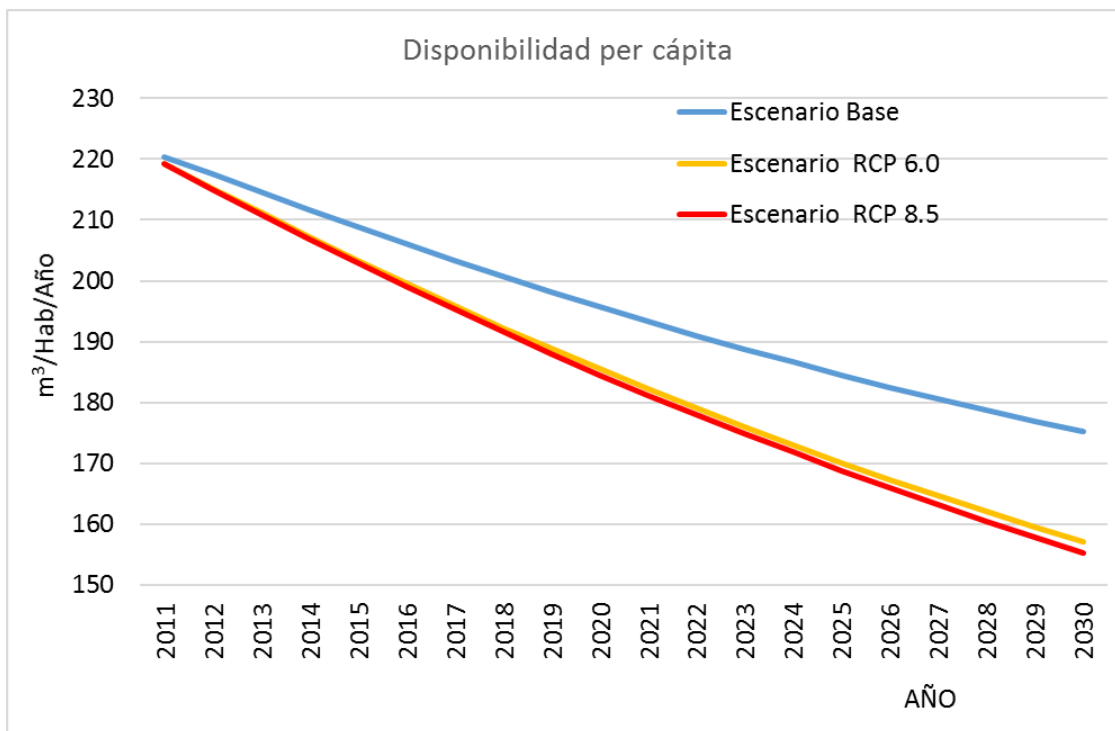


Figura 36 - Disponibilidad per cápita por escenarios RCP.

Ante el aumento poblacional dentro de la región, la disponibilidad de agua presente para que cada individuo pueda realizar sus actividades diarias se encuentra afectada a medida que el tiempo pasa. La dotación promedio inicial contemplada es de 250 lts/hab/día. La población tiene una tasa de crecimiento ascendente, lo cual significa una mayor distribución de agua para una población en pleno crecimiento. Al contemplar la misma cantidad de agua que se distribuye hacia el consumo humano, la distribución de esta debe ser menor por habitante ante la demanda creciente.

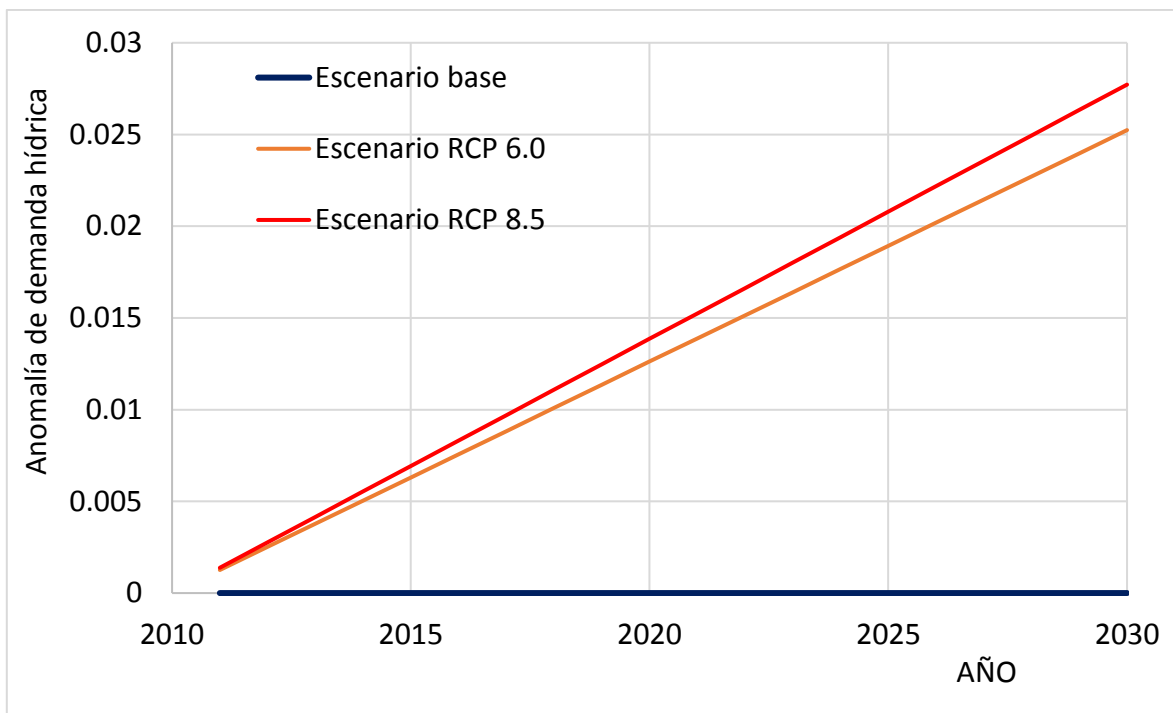


Figura 37 - Anomalía de demanda hídrica por escenarios RCP.

La anomalía de demanda hídrica presenta un incremento con una tendencia ascendente, esto debido principalmente al principal factor presente dentro de esta variable, que es el cambio climático. Como se muestra en el modelo dinámico, a partir de la anomalía de demanda hídrica se conocen la cantidad de agua a distribuir a cada distrito de riego para que pueda cosechar, por ejemplo. Dentro de esta variable, es importante mencionar que los escenarios de cambio climático (RCP) se muestran marcadamente, ya que a pesar de que tienen una tendencia igual y similitud en sus valores, los efectos de cambio climático contemplados muestran que el RCP 8.5 será más severo, afectando en un rango mayor al sistema de cuenca.

Cabe mencionar que el sector agrícola es el uso consuntivo que ocupa la mayor cantidad de agua. Aumentar la demanda hídrica en este uso consuntivo significa la asignación de grandes cantidades de agua.

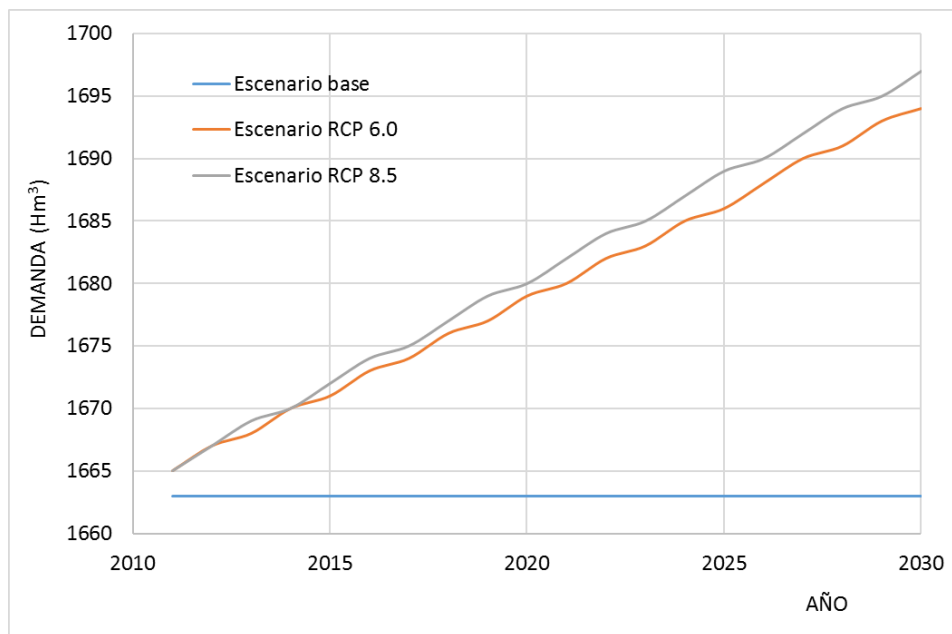


Figura 38 - Demanda hídrica por usos consuntivos. Comparativa de escenarios RCP.

Basándose en la información de demanda hídrica presentada anteriormente, el uso agrícola al afectarse por un escenario como el RCP 8.5, representa una mayor demanda de agua, la cual es necesaria para el correcto desarrollo de la cosecha anual de los diferentes cultivos que se contemplan en la región.

El cambio en el aumento de la temperatura involucra una mayor evaporación del agua. Aunque parece una diferencia pequeña entre escenarios, la gráfica anterior muestra la importancia en el incremento de  $0.13^{\circ}\text{C}$  presente dentro de los escenarios RCP 6.0 y 8.5.

### ***Uso Público Urbano***

El uso Público Urbano muestra un aumento ascendente uniforme entre los diversos, debido a que no se involucra una variable en la que los habitantes utilicen una mayor dotación a la

permitida. De esta manera, los tres escenarios, base y RCP, se muestran uniformes con respecto a los posibles cambios.

El incremento poblacional, por otra parte, al acelerarse rápidamente conforme el tiempo avanza indica que, en un horizonte de 20 años, la región donde se localiza el Bajo Bravo alberga a poco más del 50% de habitantes con los que inicialmente (en cuanto a modelo dinámico se refiere) se tiene.

### ***Total de Usos Consuntivos***

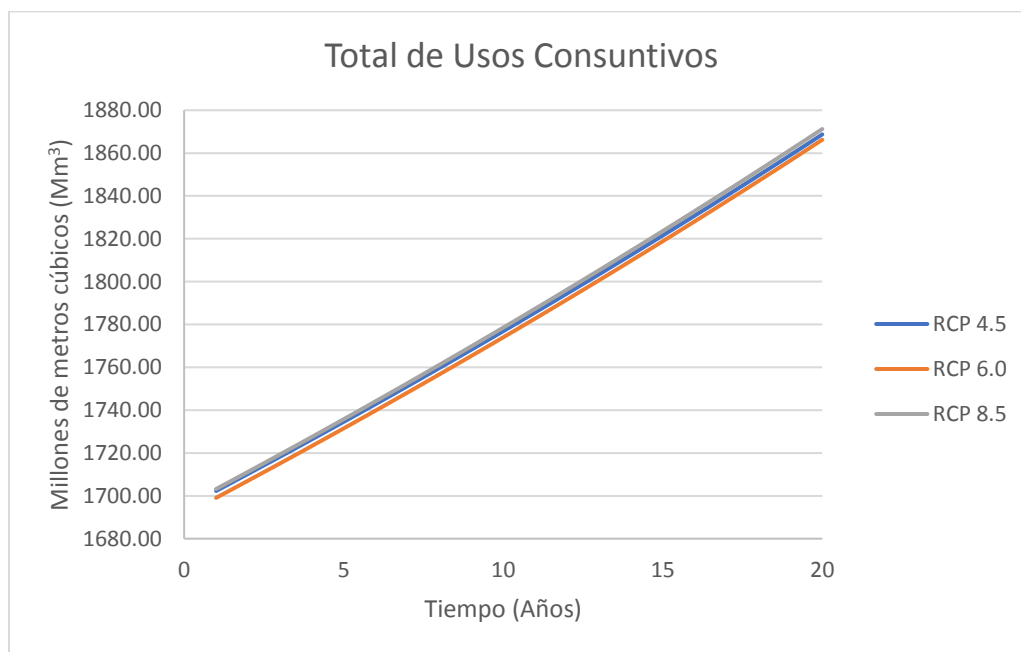
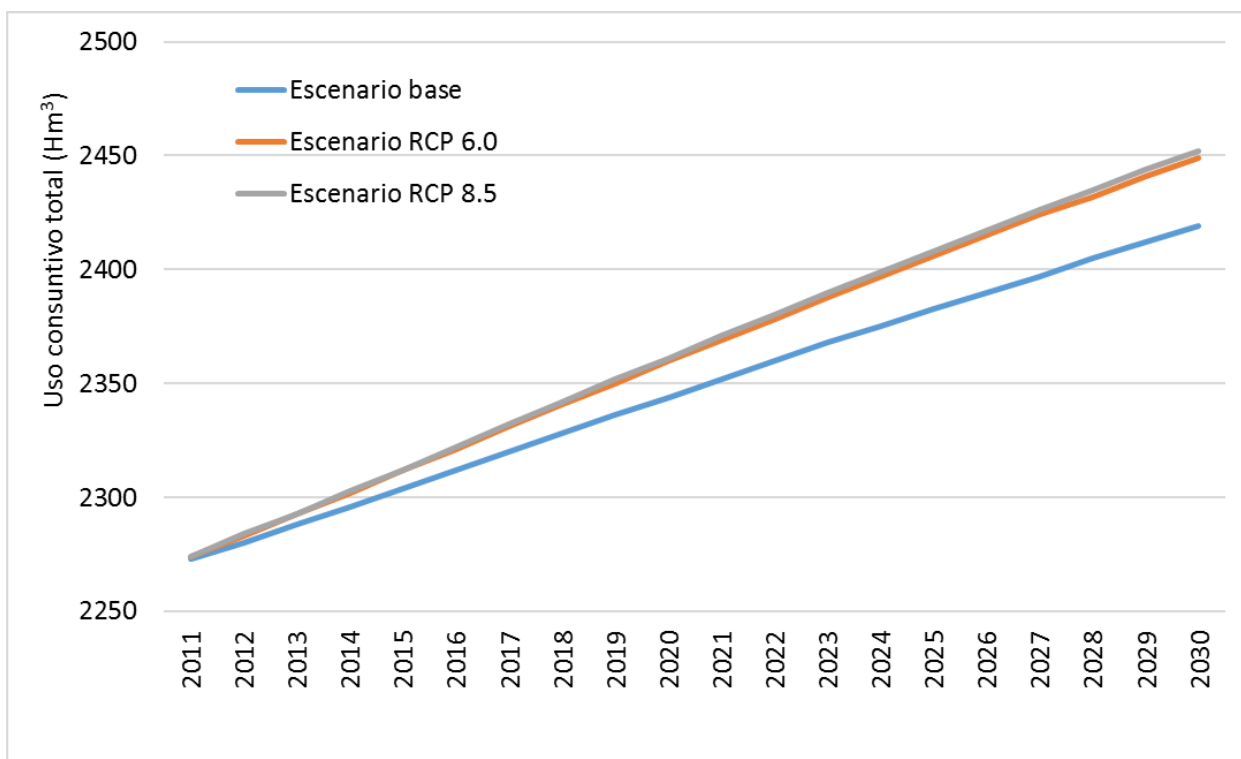


Figura 39 - Total de usos consuntivos. Combinación de escenarios RCP.



*Figura 40 - Total de Usos Consuntivos. Combinación de escenarios RCP.*

Mediante la Figura 39, están asociados los resultados pertenecientes al total de usos. Los niveles de industria y consumo pecuario se muestran solamente como dato fijo, por lo que el uso agrícola y público urbano toman ventaja dentro de esta sección al ser involucrados directamente por las condiciones de capa escenario climático RCP.

Como se puede observar, la tendencia es aumentar la necesidad de agua para los usos consuntivos, teniendo en consideración que el principal necesitado será el uso agrícola. En la gráfica también se puede observar el importante efecto del cambio climático respecto del escenario base, en el que no se considera este fenómeno.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Mediante un modelo de simulación dinámica adaptativa se permiten analizar los efectos del cambio climático y el crecimiento demográfico en el uso del agua.

El modelo muestra que, bajo las prácticas de gestión actuales, el uso del agua es no sustentable. Lo anterior incluso si no se considera el cambio climático (como muestran los resultados del escenario base).

El cambio climático, conforme a los resultados del modelo en los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5, tendrá un efecto sustancial en el déficit de agua en la cuenca, que incrementaría los usos consuntivos de 2419 a 2452 Hm<sup>3</sup>, volumen adicional con el que no cuenta la cuenca.

Por otra parte, a diferencia de la parte alta de la cuenca, en el Bajo Bravo el uso urbano es una componente muy importante de la demanda, por lo que las medidas de adaptación y eficiencia no pueden ser minusvaloradas.

En la cuenca, urge el diseño y aplicación de medidas de adaptación al cambio climático, que serán fundamentalmente la reducción de consumos mediante la introducción de tecnologías más eficientes, el cambio de uso del agua, la eficiencia en el uso urbano y la creación de una nueva cultura del agua.

Este trabajo demuestra la importancia de la aplicación del pensamiento sistémico en la gestión del agua, mediante el uso de herramientas matemáticas como los modelos dinámicos, lo que se facilita con el empleo de software especializado.



## 6. BIBLIOGRAFÍA.

Aparicio, F.J., Ortega, E., Hidalgo, J. y Aldama A. A. (2009). *Recursos hídricos en la frontera norte*. Jiutepec, Morelos. México: IMTA.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (1999). Entidades Federativas y Municipios que participan territorialmente en los Consejos de Cuenca. Versión 1.0. Ciudad de México: CONAGUA.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Estadísticas Agrícolas de Riego 2013 2014. Recuperado de:  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/147021/ea2013-2014.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico – Administrativo VI Río Bravo. Ciudad de México, México: SEMARNAT

DOF. (2011). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la Región Hidrológica número 24 Bravo – Conchos. *Secretaría de Gobernación*. Recuperado de:  
[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5192916&fecha=02/06/2011](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5192916&fecha=02/06/2011)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [Red Cuencas]. (2013). Ciclo de videoconferencias “Cuencas hidrográficas de México, retos y prioridades”. Recuperado de:  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLjbl9mfJNmKk1PvxSsf1Mvt1FtTq3eLuB>

Ventana Systems - VENSIM. (2007). Guía de Usuario Vensim. Recuperado de: <http://atc-innova.com>

Von der Meden, J., Rodríguez, A., De La Maza, M., Zapata, J., Martínez, A., Cleghorn, A., Parra, H., Briggs, J. L. M. y Peters, E. M. (2010). *Cuenca Transfronteriza del Río Bravo / Grande*. Ciudad de México. México: INECC