

TESIS DEFENDIDA POR
Maria Reyna Barradas Argüelles
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Stephen Vaughan Smith
Director del Comité

Dr. Thomas Günter Kretzschmar
Miembro del Comité

Dra. Maria Tereza Cavazos Pérez
Miembro del Comité

Dr. Thomas Günter Kretzschmar
*Coordinador del programa de posgrado
en Ciencias de la Tierra*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

17 de Mayo de 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**CAMBIOS HIDROLOGICOS EN LAS CUENCAS QUE ABASTECEN DE AGUA
A LA ZONA DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

MARIA REYNA BARRADAS ARGÜELLES

Ensenada, Baja California, México, Mayo de 2010.

RESUMEN de la tesis de **Maria Reyna Barradas Argüelles**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA con orientación en GEOCIENCIAS AMBIENTALES. Ensenada, Baja California. Mayo 2010.

CAMBIOS HIDROLOGICOS EN LAS CUENCAS QUE ABASTECEN DE AGUA A LA ZONA DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO.

El agua en el Estado de Baja California es un recurso limitado naturalmente por el clima, vegetación y geología, que se ha visto afectado por cambios tanto naturales como antropogénicos en las últimas décadas, encontrándose actualmente bajo una gran presión. La zona de estudio abarca las cuencas hidrológicas que abastecen de agua a la ciudad de Ensenada.

Se analizaron los cambios en cobertura de suelo, demanda y variaciones climáticas dentro de la región de 1950 a 2006, así como las consecuencias hidrológicas. Dentro de los factores climáticos, la precipitación media anual presenta una variabilidad decadal relacionada a oscilaciones como ENSO y ODP. Se analizó la frecuencia de eventos extremos de lluvia diaria en la zona. Las temperaturas máximas y mínimas diarias presentan una tendencia positiva significativa acorde con estudios de cambio climático. La ocurrencia de eventos extremos de éstas no presenta ninguna tendencia significativa.

Los cambios antropogénicos se analizaron desde el punto de vista de aumento en la demanda del recurso y cambios a la cobertura para actividades agrícolas, encontrando un aumento en la demanda urbana de 2.07 a 27.81 Mm³/año. Se observó un aumento en la superficie agrícola en los primeros años, y después una disminución que puede reflejar las variaciones climáticas y consecuencias de la sobreexplotación del recurso.

Resumen aprobado por:

Stephen Vaughan Smith

ABSTRACT of the thesis of **Maria Reyna Barradas Argüelles**, presented as a partial requirement to obtain the MASTER IN SCIENCE degree in EARTH SCIENCES with orientation in ENVIRONMENTAL GEOSCIENCE. Ensenada, Baja California. Mayo 2010.

HYDROLOGICAL CHANGES IN THE WATERSHEDS THAT SUPPLY WATER TO THE AREA OF ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO.

Water in Baja California is a limited resource that has been affected by natural and anthropogenic changes during the last decades, putting a great pressure on it. The study area covers the hydrological basins that supply water to the city of Ensenada and nearby towns.

Changes in land coverage, water demand and climate variability from 1950 to 2006 were analyzed in the study area, as well as the hydrological consequences of them. Mean annual precipitation shows no significant trend, but a decadal variability associated with seasonal and decadal oscillations like ENSO and ODP. Extreme precipitation events were also analyzed as well as daily maximum and minimum temperatures. A positive significant trend was found in both daily maximum and minimum temperatures. Occurrence of extreme temperature events does not show any significant trend.

Anthropogenic changes analyzed cover an increase in urban and agricultural demand as well as land cover changes over the last 60 years. Urban demand has increased from 2.07 to 27.81 Mm³/yr. Cover of agricultural areas show a decrease over the last decade that can be related to climate variability and resource overexploitation.

Stephen Vaughan Smith

AGRADECIMIENTOS

A los miembros del comité de Tesis por sus valiosas aportaciones y sugerencias para mejorar este trabajo, en especial al Dr. Stephen Smith por la dirección, apoyo y paciencia en la elaboración de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por las facilidades otorgadas y apoyo económico proporcionado.

A mis hijos Pablo Enrique, Mónica e Isabel por ser mi mayor motivación y por su cariño, paciencia y apoyo a lo largo de mis estudios.

A los investigadores, técnicos y compañeros por ser un valioso apoyo y una grata compañía, en especial a Susana Rosas Montoya y Miriam Tostado Plascencia.

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCION	1
I.1 Objetivos.....	2
I.2 Zona de Estudio.....	3
II. ANTECEDENTES.....	10
II.1 Hidrogeología.....	10
II.2 Precipitación.....	12
II.3 Cambios Antropogénicos.....	13
III. METODOLOGIA.....	15
III.1 Análisis de Precipitación y Temperatura.....	15
III.2 Evaluación de Cambios Antropogénicos.....	18
IV. RESULTADOS.....	19
IV.1 Cambios y Variaciones Naturales.....	19
IV.1.1 Precipitación.....	20
IV.1.2 Temperatura Máxima y Mínima.....	30
IV.2 Cambios Antropogénicos.....	40
IV.2.1 Cambios en la Demanda del Recurso.....	41
IV.2.2 Cambios de Cobertura de Suelo.....	45
V. DISCUSION DE RESULTADOS.....	51
VI. CONCLUSIONES.....	59
VII. REFERENCIAS.....	61
VIII. ANEXO.....	66

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
1	Zona de estudio. Sistema de cuencas Todos Santos, elevación y principales cuencas hidrológicas.....	5
2	Pendiente del terreno calculada para la cuenca Todos Santos.....	7
3	Litología en la zona de estudio.....	8
4	Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio.....	9
5	Superficie de uso agrícola en los Valles de Ojos Negros, Guadalupe, Maneadero y San Quintín.....	13
6	Ubicación de estaciones climatológicas.....	17
7	Distribución espacial de la precipitación media anual.....	21
8	Distribución espacial de la precipitación anual desglosada..	22
9	Precipitación media mensual en la cuenca Todos Santos y la estación de El Pinal.....	23
10	Precipitación media anual en la Cuenca Todos Santos para el periodo de 1948-2006.....	25
11	Precipitación media anual en la cuenca Todos Santos en dos cambios de la Oscilación Decadal del Pacífico.....	26
12	Número de eventos extremos de precipitación (>P95%) por año registrados en una o más estaciones.....	28
13	Frecuencia de eventos extremos de precipitación (>P95%) por año de 1949 a 2002 en cada estación.....	29
14	Temperatura máxima y mínima mensual en 4 estaciones de la Cuenca Todos Santos.....	31
15	Temperatura máxima de verano en 4 estaciones en el periodo de 1948 a 2006.....	33

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
16	Temperatura mínima de invierno en las 4 estaciones, de 1948 a 2006.....	34
17	Frecuencia anual de eventos extremos diarios (>P95%) de temperatura máxima de 1949 a 2002 en cada estación.....	38
18	Frecuencia anual de eventos extremos diarios (<P5%) de temperatura mínima de 1949 a 2002 en cada estación.....	39
19	Población en las principales zonas urbanas del área de estudio.....	41
20	Disponibilidad media anual de agua en los acuíferos que abastecen la zona de estudio. Recarga y extracciones concesionadas en 2002 y 2007.....	42
21	Zonas de actividad agrícola, urbana y suelo desnudo en la Cuenca Todos Santos en Mayo 1975.....	46
22	Zonas de actividad agrícola, urbana y suelo desnudo en la Cuenca Todos Santos en Junio 1982.....	47
23	Zonas de actividad agrícola, urbana y suelo desnudo en la Cuenca Todos Santos en Mayo 1996.....	48
24	Zonas de actividad agrícola, urbana y suelo desnudo en la Cuenca Todos Santos en Mayo 2000.....	49
25	Zonas de actividad agrícola, urbana y suelo desnudo en la Cuenca Todos Santos en Junio 2009.....	50
26	Series de tiempo en cambios de signo de la Oscilación Decadal del Pacífico de 1925 a 2009.....	53

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Principales cuencas en la zona de estudio.....	6
II	Zonas de abastecimiento de agua para la ciudad de Ensenada..	10
III	Parámetros estadísticos de la precipitación diaria >1mm en 4 estaciones del sistema de cuencas Todos Santos.....	24
IV	Parámetros estadísticos de la precipitación diaria (>1mm) con y sin eventos extremos.....	27
V	Parámetros estadísticos de eventos extremos de precipitación diaria >P95%.....	27
VI	Estadística de la temperatura máxima (°C) en 4 estaciones del sistema de cuencas Todos Santos.....	30
VII	Estadística de la temperatura mínima (°C) en 4 estaciones del sistema de cuencas Todos Santos.....	30
VIII	Tendencias de temperatura máxima y mínima (°C/año) en 4 estaciones para el periodo de 1948 a 2006.....	34
IX	Parámetros estadísticos de la temperatura máxima (°C) diaria promedio en cada estación.	35
X	Parámetros estadísticos de la temperatura mínima (°C) diaria promedio en cada estación.....	36
XI	Parámetros estadísticos de eventos extremos (>P95%) de temperatura máxima diaria (°C).....	36
XII	Parámetros estadísticos de eventos extremos de temperatura mínima diaria (<P5%).....	37
XIII	Usos del agua en la zona de estudio.....	43
XIV	Cambios en cultivos en los principales valles agrícolas de la zona de estudio durante la última década.....	44
XV	Superficie agrícola calculada a partir de la clasificación multiespectral, entre 1975 y 2009.....	49

I. INTRODUCCION

La disponibilidad del agua como recurso está relacionada a factores naturales y antropogénicos. En el Estado de Baja California, este recurso se encuentra limitado naturalmente por el clima, vegetación y geología de la región. Existe además, una gran influencia antropogénica debido al creciente desarrollo urbano y agrícola principalmente en la zona norte del Estado.

El municipio de Ensenada, por su ubicación, representa un punto clave para los sectores turístico, comercial y pesquero del Estado, y en las últimas décadas, los sectores agrícola, urbano y de manufactura, han tenido un notable crecimiento (Censos de Población y Vivienda, INEGI 1995, 2000, 2005, 2007), resultando en un aumento en la demanda de agua e importantes modificaciones en la cobertura de suelo de la región. Estos cambios afectan el ciclo hidrológico, al cambiar factores como la evapotranspiración, la infiltración, la erosión y el escurrimiento, y se pueden notar en algunas de las principales zonas urbanas y agrícolas del área de estudio, como lo son Ensenada, Valle de Guadalupe, La Misión, Maneadero y Ojos Negros (Anexo).

La escasa precipitación que caracteriza a esta zona semiárida y la consecuente recarga limitada, aunadas a la sobreexplotación de los acuíferos debido a la creciente demanda y a los cambios de cobertura de suelo, han afectado la disponibilidad de agua en la región.

En el presente trabajo se analizaron los factores naturales y antropogénicos que determinan la disponibilidad del recurso agua, para poder hacer una mejor descripción de los cambios o variaciones que han afectado el balance hidrológico en una zona urbana y agrícola con creciente demanda en una región semi-árida.

I.1 Objetivos

1. Definir las fronteras del sistema hidrológico que abastece de agua a la zona urbana de Ensenada y entender la interacción de las variables hidrológicas, climatológicas y antropogénicas que modulan la variabilidad del recurso agua.

2. Analizar geoespacial y temporalmente los cambios naturales y antropogénicos que han afectado la disponibilidad de agua y la cobertura de suelo en la región, así como las consecuencias hidrológicas de dichos cambios.

En lo referente a cambios naturales, los objetivos específicos de este trabajo son:

- ∄ Analizar estadísticamente la variabilidad de la precipitación en varias estaciones del municipio desde 1950 a la fecha.
- ∄ Calcular tendencias anuales e interanuales para ver si ha habido cambios significativos en la precipitación en distintas escalas.
- ∄ Analizar los eventos extremos de lluvia diaria (percentil 95), ya que éstos pueden tener un efecto importante en los escurrimientos.

- ∄ Analizar la variabilidad de las temperaturas máximas y mínimas registradas en la zona y la ocurrencia de eventos extremos de ambas.

En cuanto a cambios antropogénicos:

- ∄ Evaluar los cambios en la demanda de agua potable en relación al aumento de población en la zona y condiciones de los acuíferos de la región.
- ∄ Evaluar los cambios de cobertura de suelo haciendo uso de estadísticas de agricultura e imágenes y herramientas de percepción remota.

I.2 Zona de estudio

La base para delimitar el sistema de cuencas del área de estudio es el abastecimiento de agua a la zona urbana/agrícola de Ensenada, Baja California. El abastecimiento depende en parte de la extracción de agua de pozos localizados dentro de la ciudad y en parte de la importación de agua de una región geográfica que incluye otras cuencas.

Es posible delimitar una zona donde interactúan procesos geohidrológicos, climáticos, y antropogénicos, formando un sistema hidrológico con flujos internos (entre cuencas). Estas cuencas se encuentran conectadas por una red de canales y acueductos, así como por las actividades socioeconómicas a la zona urbana de Ensenada, como se describe a continuación.

Geohidrológicamente, el complejo conocido como El Barbón inicia en el Valle de Ojos Negros (Figura 1), pasa por Valle de Guadalupe y desemboca en el Océano Pacífico por el Valle de La Misión, uniendo tres cuencas con creciente actividad agrícola y urbana. Dos de estas cuencas, Guadalupe y La Misión, se conectan a la cuenca de Maneadero en una red hidrológica que abastece de agua a la ciudad de Ensenada, además de satisfacer la demanda local (comunicación personal CESPE).

Todas estas cuencas comparten patrones climáticos, tipos de suelo y de vegetación similares. Antropogénicamente se encuentran relacionadas por la demanda de agua, pero también por la producción agrícola y la expansión de la mancha urbana a lo largo del tiempo. Hidrológicamente, se puede decir que no existen conexiones hacia afuera de la región propuesta en esta tesis.

Se trabajó con un modelo de elevación de la zona obtenido del Shuttle Radar Topography Mission - 2000 (Cgiar-CSI, 2009). Mediante el uso de herramientas de ArcGIS se definieron los márgenes de las principales cuencas involucradas en el sistema de la región de estudio: Guadalupe (La Misión–Guadalupe–Ojos Negros), San Miguel, Ensenada, El Gallo, San Carlos y Maneadero (Figura 1).

A este grupo se la ha llamado Sistema de Cuenas Todos Santos, abarcando un área de 4,913 km² entre las coordenadas 32°16'28"N, 116°54'12"W y 31°35'28"N, 115°51'54"W. Las características de las cuencas y arroyos de este sistema se muestran en la Tabla I.

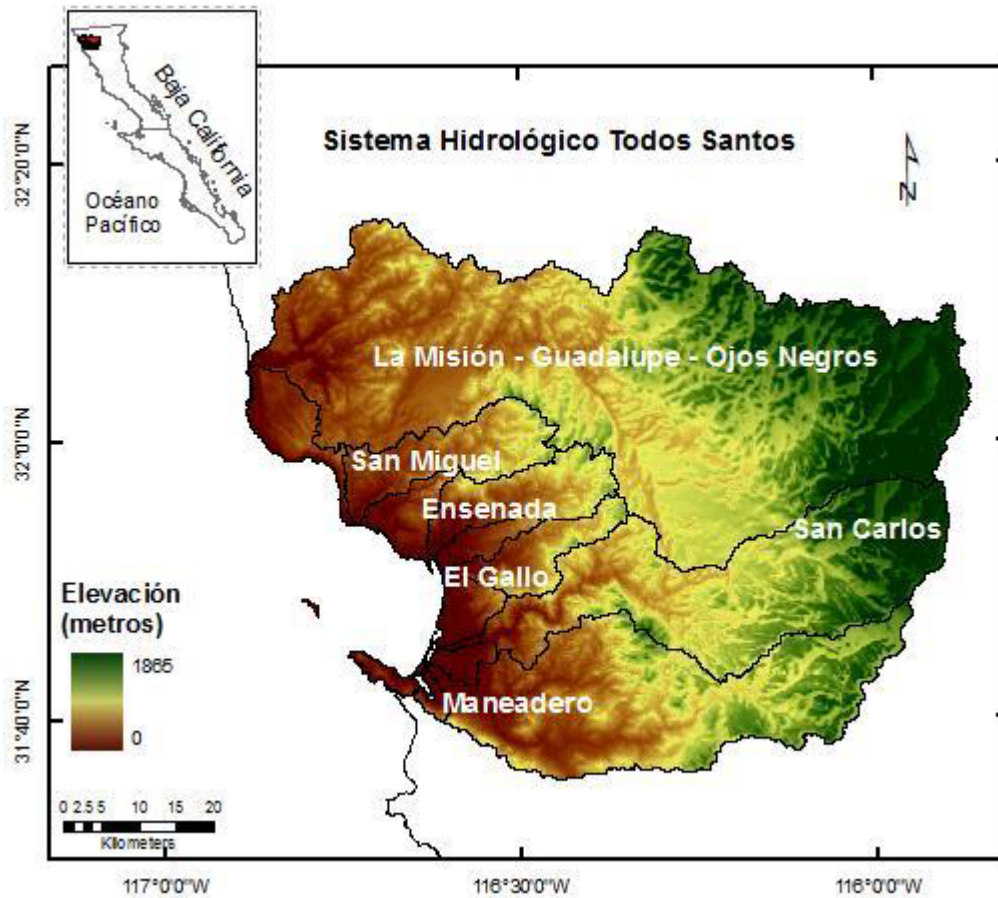


Figura 1. Zona de estudio. Sistema de cuencas Todos Santos, elevación y principales cuencas hidrológicas.

El principal sistema orográfico que cruza la región en el lado Este es la Sierra de Juárez, con altitud máxima de 1,865 msnm (Figura 1). El relieve presenta pendientes de hasta 54° (Figura 2 y Tabla I) y tres valles principales, que son Maneadero, Guadalupe y Ojos Negros, donde se realiza el 96% de la agricultura en la zona de estudio.

Tabla I. Principales cuencas en la zona de estudio.

Nombre	Area (km²)	pendiente máxima (°)	pendiente promedio (°)
Guadalupe	2,394	42.9	7.7
San Miguel	210	36.7	10.1
Ensenada	179	40.8	10.0
El Gallo	123	38.4	11.2
San Carlos	818	51.0	8.4
Maneadero	837	42.9	9.9
Cuencas menores costeras	351	36.8	11.0
Cuenca Todos Santos	4,913	54.3	8.5

En la Figura 3 se muestran los tipos de suelo predominantes en la zona de estudio que se describen a continuación:

Regosol, que cubre el 73.6% del área total y se encuentra en costas y laderas de las sierras, con textura media y fina. Tiene una susceptibilidad a la erosión media debida al alto contenido de arenas y limos mal consolidados y es fácilmente colapsable. Presenta vocación forestal y ganadera. Dependiendo de la pendiente, y proporción con otro tipo de suelo, puede tener espesores de 30 a 50 cm., y en su mayoría reposa sobre rocas ígneas intrusivas.

El 19.5% corresponde al Litosol con una alta susceptibilidad a la erosión y textura media y fina. Este se encuentra en sierras, laderas, barrancas, lomerios y algunos terrenos planos con espesores entre 10 y 45 cm, reposando sobre rocas ígneas extrusivas principalmente. Este tipo de suelo tiene vocación forestal. Tanto el Litosol como el Regosol son degradables por deforestación, incendios y cambios de uso de suelo.

El Feozem abarca 4.8% del área, con una capa superficial obscura, suave, rica en materia orgánica, presenta espesor variable. Se encuentra principalmente

en la zona de La Misión y San Miguel y tiene vocación agrícola de temporal o riego con alto rendimiento. Su erosividad es alta en laderas y pendientes, media en terrenos planos.

El Xerosol cubre tan solo un 2% de la zona, con una capa superficial clara y pobre en materia orgánica. Debajo puede haber subsuelo rico en arcillas. En ocasiones con aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche. Tiene baja susceptibilidad a la erosión en terrenos planos, pero su composición se ve afectada con el agua. Se encuentra principalmente en una porción del valle de Ojos Negros.

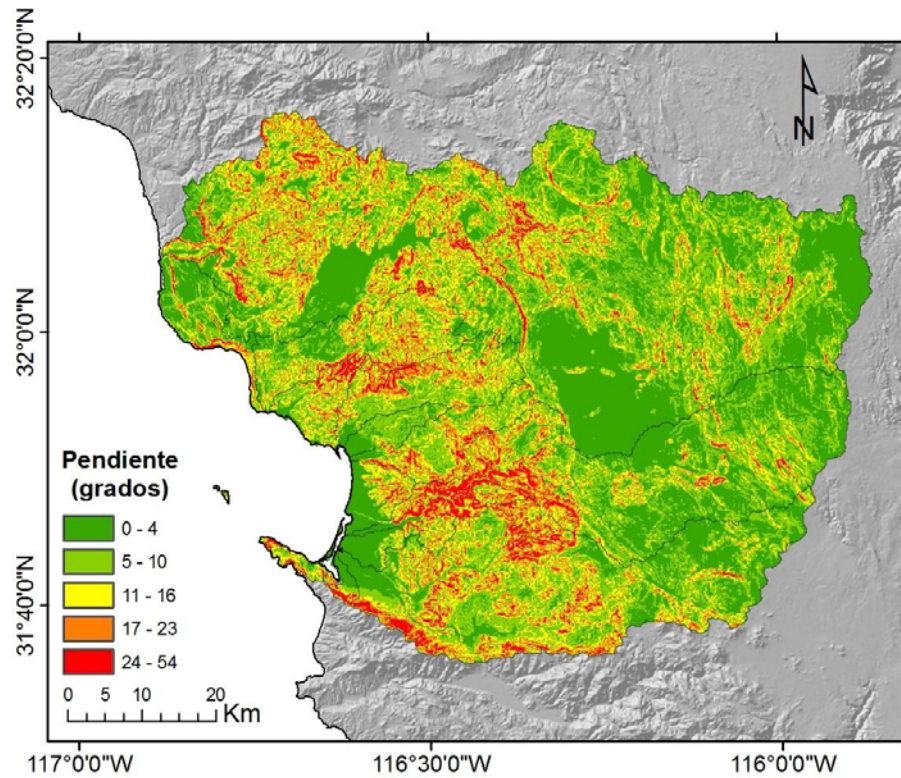


Figura 2. Pendiente del terreno calculada para la cuenca Todos Santos.

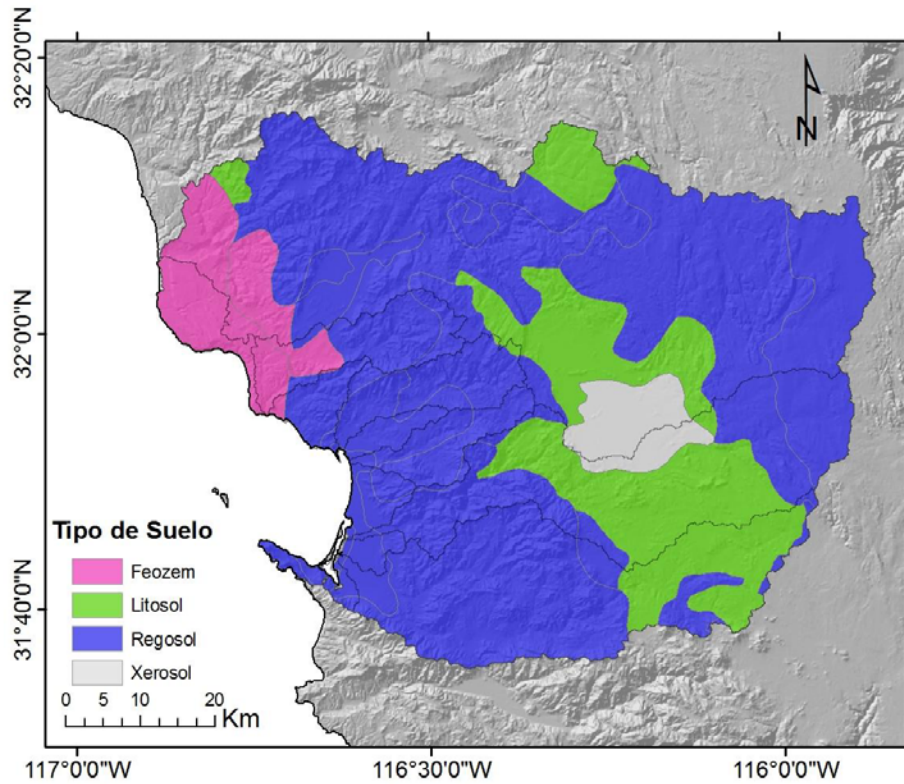


Figura 3. Litología en la zona de estudio (INEGI 2001).

En cuanto a la cobertura de suelo, la vegetación natural predominante es el chaparral, seguido del matorral rosetófilo costero y áreas de bosque de pino en las sierras. La agricultura de riego y temporal abarcaba 639 km² y el pastizal cultivado 247 km² en 2003 (INEGI, 2005). Las zonas urbanas cubrían para ese año, 86 km² siendo Ensenada la principal la ciudad de la región (Figura 4).

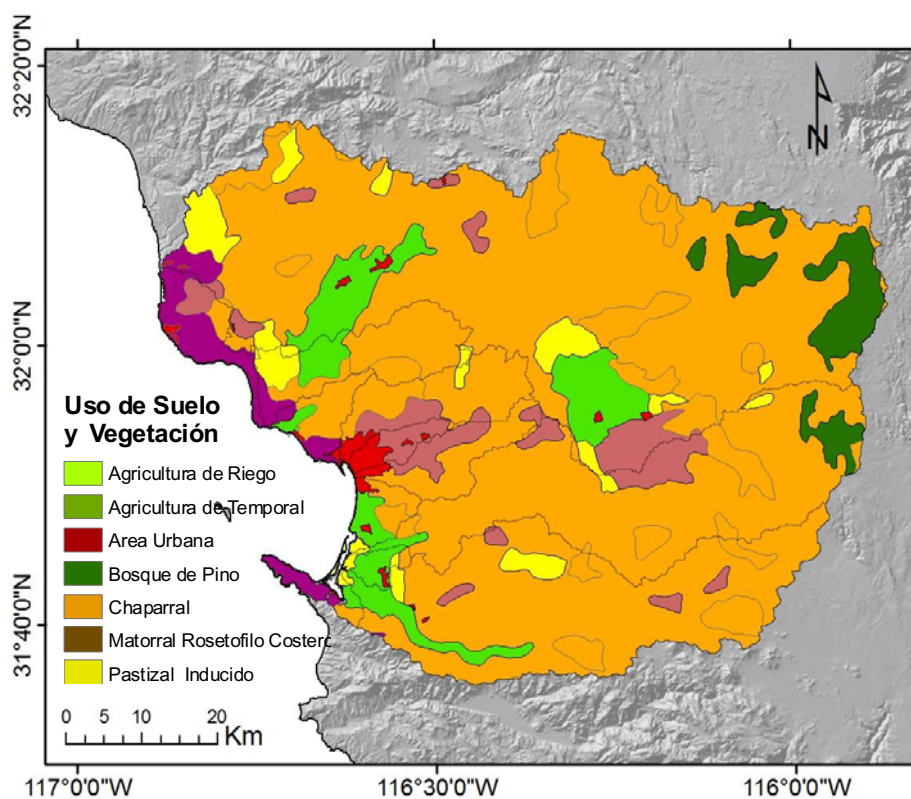


Figura 4. Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio (INEGI, 2005).

Para lograr un desarrollo sustentable y facilitar el manejo del agua en este sistema, es necesario conocer no solo las componentes del sistema hidrológico para cada cuenca en particular, sino sus múltiples conexiones y la manera en la que opera como un sistema integral de varias cuencas.

II. ANTECEDENTES

II.1 Hidrogeología

En la región se han realizado algunos estudios para la evaluación de las condiciones actuales de los acuíferos, donde se resalta la crisis en el abastecimiento del agua en estas regiones debido al desarrollo y manejo inadecuados del recurso. La demanda en la zona urbana de Ensenada es cubierta por distintas fuentes que se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Zonas de abastecimiento de agua para la ciudad de Ensenada. (CESPE, 2003).

Demanda	Zona de extracción	Flujo lts/seg
785 lt / seg	Ciudad de Ensenada	190
	Valle de Maneadero	220
	Valle de Guadalupe	225
	Valle de La Misión	150
	Presa Emilio López Zamora	Reserva

Badán, et al. (2005) presentaron una propuesta para un plan de manejo del agua en Valle de Guadalupe, donde se hace un diagnóstico general de las condiciones críticas de este acuífero y se proponen algunas ideas para desarrollar un plan de manejo de este y de sus tributarios en los valles de Ojos Negros y La Misión.

En el acuífero de Ojos Negros, Ponce, et al. (2000) realizaron un estudio interdisciplinario con énfasis en la relación entre la agricultura y el uso del agua subterránea, abarcando los impactos ambientales y sociales de dicha actividad. Los resultados de este trabajo muestran que la agricultura de riego ha aumentado la evapotranspiración real que a su vez ha llevado a la humidificación del clima local. También concluyen que el bombeo de agua subterránea en los últimos 30 años ha producido en esta zona un abatimiento del nivel freático, y éste ha afectado negativamente los ecosistemas riparios y humedales que se encontraban en la zona.

En el Valle de Guadalupe, Campos y Kretzschmar (2004) realizaron una simulación del flujo de agua hacia el valle y Kurczyn, et al., (2007) evaluó el potencial de escurrimiento superficial en la Serranía Matcuatai, dentro de la zona de Guadalupe, calculando los volúmenes de escurrimiento y determinando que casi el 90% del suelo en el área de estudio tiene un potencial favorable al escurrimiento y tan solo un 12% es favorable a la infiltración y la consecuente recarga del acuífero.

Otro de los acuíferos que contribuye al abastecimiento de agua para la ciudad de Ensenada es el de La Misión. Antuna-Ibarra y Kretzschmar (2004) realizaron un estudio sobre el desarrollo hidrogeológico de este acuífero desde un punto de vista hidrogeoquímico, encontrando un aumento en la salinidad durante verano, debido principalmente a la exposición del nivel freático durante la temporada de lluvias ocasionada por la extracción excesiva de arena de los cauces.

II.2 Precipitación

Diversos estudios demuestran la relación existente entre la variabilidad interanual de la lluvia en la región y las oscilaciones climáticas de gran escala, como el fenómeno del Niño o ENSO (El Niño Southern Oscillation), la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), y la Oscilación Intraestacional de Madden-Julian (OMJ) (ej. Mo y Higgins, 1998; Pavía y Badán 1998; Campos, 1999; Cavazos y Rivas, 2004; Pavía. et al, 2006).

Cavazos y Rivas (2004) realizaron un estudio sobre la variabilidad de eventos extremos en Tijuana, Baja California, utilizando datos de la estación meteorológica ubicada en la Presa Rodríguez, y cubriendo un periodo de 50 años. Reportaron una relación entre el aumento en cantidad y magnitud de los eventos extremos de precipitación durante años de eventos fuertes de El Niño.

Arriaga-Ramírez (2008) analizó la tendencia de los eventos extremos en el noroeste de México, de 1960 a 1998, reportando un incremento significativo en el número de días con precipitación mayor a 10mm en el noroeste de Baja California y una tendencia positiva en la precipitación total invernal, al igual que en el número de lluvias intensas mayores al percentil 95 (>P95%).

No existen estudios específicos de la Cuenca Todos Santos en cuanto a precipitación. La zona suele generalizarse con la precipitación registrada en la estación Presa Rodríguez ubicada en la ciudad de Tijuana a 100 km. de distancia de la ciudad de Ensenada, o con los datos que registra la estación Presa Emilio López Zamora, dentro de la ciudad.

II.3 Cambios antropogénicos

El municipio de Ensenada ha tenido un gran desarrollo en los últimos 30 años. El sector agrícola abarca en la actualidad el cultivo de diversas especies no nativas de la región. La introducción de nuevas variedades o productos trae consigo cambios no solo en la demanda del agua, sino en la evapotranspiración e infiltración de ésta al subsuelo. En cuanto a superficie, el INEGI reporta que las principales zonas agrícolas han disminuido de 640 km² en el año 1993 a 547 km² en 1999 y apenas 231 km² en el 2007. En algunos casos estas áreas han sido reemplazadas por la urbanización, como es el caso del sur de la ciudad de Ensenada y parte del valle de Maneadero. En este valle se han abandonado áreas de cultivo dejando el suelo desnudo y se han introducido especies distintas (Figura 5).

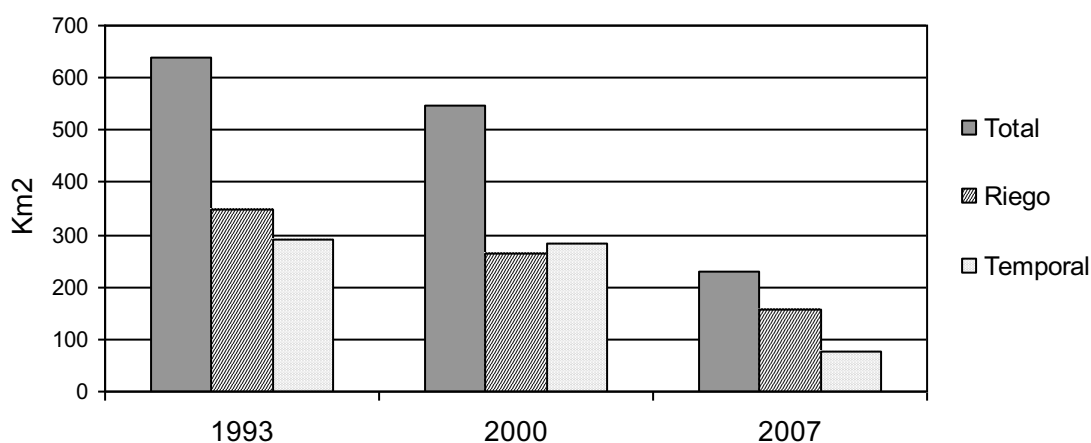


Figura 5. Superficie de uso agrícola en los principales valles de la zona de estudio: Ojos Negros, Guadalupe, Maneadero y San Quintín (INEGI 1995, 2000, 2007)

El crecimiento en los sectores turístico y de manufactura ha ocasionado una extensión de la mancha urbana, modificando posiblemente la cobertura de suelo y con ello, factores como el escurrimiento, infiltración, evapotranspiración y biodiversidad. En los censos de población del INEGI se reporta un aumento en las principales zonas urbanas del Estado.

III. METODOLOGIA

III.1 Análisis de la Precipitación y Temperatura

Uno de los propósitos de este trabajo es aportar información para conformar una red más completa de registros de precipitación en la zona. Las estaciones climatológicas forman parte de la infraestructura hídrica del país y se encuentran a cargo de la Comisión Nacional del Agua. En el país, de 5,880 estaciones climatológicas, sólo 3,348, el 57%, están en operación (CNA, 2008). En el caso de la Península de Baja California, algunas de las estaciones en funcionamiento se encuentran mal referenciadas geográficamente (comunicación personal con Stephen Smith, 2008). Esto representa un error en la información estadística que se ha generado a partir de los datos de estas estaciones. En los últimos años se han revisado y corregido la ubicación de algunas de éstas. Como parte del control de calidad de los datos de esta sección, se utilizaron únicamente estaciones revisadas y corregidas en lo referente a su ubicación geográfica. Es importante resaltar la importancia de la precisión y certeza de esta información, sobre todo en zonas semi-áridas, donde las estaciones son pocas y espaciadas, perdiendo gran cobertura de datos cuando fallan, se inhabilitan o se encuentran mal referenciadas.

Se recopilaron datos de las siguientes fuentes:

- ≠ Datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima proporcionados por la CNA (periodo de 1948 a 2002).
- ≠ Promedios mensuales de precipitación de la CNA (para el periodo de 1948 a 2006)
- ≠ Información sobre la ubicación de estaciones climatológicas (actualización de la CNA a 2007).

Se escogieron 36 estaciones por su ubicación geográfica, dentro o cerca del sistema de cuencas Todos Santos, abarcando una región que limita al Norte con la frontera con Estados Unidos, al Este con el parteaguas de la Sierra de Juárez - esta región contigua presenta un régimen de lluvias de verano relacionado a eventos de distinta naturaleza y escala, por lo tanto no es representativo ni comparable a la precipitación en la zona de estudio. Al Sur se consideraron estaciones a unos cuantos kilómetros del límite de la cuenca de Maneadero ya que los eventos de lluvia en la zona forman parte de sistemas provenientes del Norte y Noroeste principalmente (Figura 6).

Para el análisis estadístico se seleccionaron 16 estaciones que cuentan con 75% de datos registrados a lo largo de 30 años y 4 estaciones que cuentan con 90% de datos registrados en el periodo de 1948 a 2002. Las estaciones restantes se conservaron para complementar datos faltantes o revisar datos sobresalientes (Figura 6).

Los 16 registros de 30 años se utilizaron para obtener una climatología reciente y un análisis geo-espacial de la precipitación. Las 4 estaciones con 50 años de datos se analizaron estadísticamente para observar cambios significativos en la precipitación estacional. Así mismo, se utilizaron estos 4 registros para analizar la frecuencia de eventos extremos ($>P95$). Para estas 4 estaciones se hizo un análisis similar para eventos extremos de temperaturas máximas y

mínimas. Se llevó a cabo un control de calidad para identificar errores en los registros, utilizando un umbral de 4 desviaciones estándar sobre la media para separar datos sobresalientes, siguiendo el tratamiento de datos de Cavazos, et al (2008). Estos fueron revisados visulamente y comparados con los datos de estaciones vecinas y de días anteriores/posteriores para validarlos.

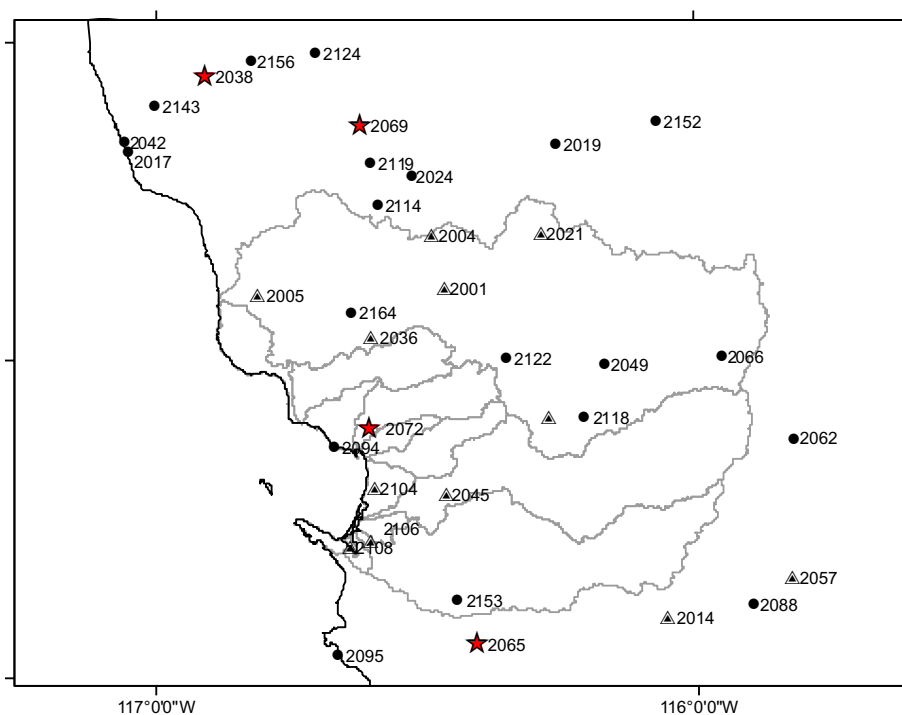


Figura 6. Estaciones climatológicas con registro de 30⁺ años (△) y 50⁺ años (★). El resto de las estaciones (●), tienen registros menores a 30 años.

III.2 Evaluación de cambios antropogénicos

Para determinar los cambios que se han llevado a cabo en la zona de estudio en las últimas décadas, se revisaron datos históricos de los censos de población y agricultura del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), para la zona de estudio.

Se analizaron los cambios en la extensión de las áreas agrícolas y urbanas comparando 5 imágenes satelitales de distintos años entre 1970 y 2009. Se obtuvieron 3 imágenes multiespectrales del satélite LANDSAT, del sitio USGS-Global Viewer (U.S. Geological Survey) para los años 1976, 2000 y 2009 y se compararon con imágenes procesadas por Hinojosa, et.al. (2001) de 1986 y 1992, aplicándoles el mismo proceso de clasificación, el cual se describe brevemente a continuación.

1. Se realizó una clasificación no supervisada con el método ISODATA, que utiliza la distancia espectral entre píxeles e iterativamente los clasifica, redefine el criterio de clasificación y repite ésta hasta que surgen patrones de distancia espectral hasta obtener 99 clases.

2. A cada clase se le asignó una etiqueta descriptiva, verificada en campo por un experto en vegetación en el caso de las imágenes de 1986 y 1992.

3. Estas 99 clases fueron reclasificadas en 33 clases. Para este estudio, se agruparon en 4 categorías: agricultura, suelo desnudo, urbanización y cobertura natural. En el caso de las imágenes de 1976, 2000 y 2009, se comparó la distribución de cada clase manualmente para asignarles etiquetas y reclasificarlas.

IV. RESULTADOS

IV.1 Cambios y variaciones naturales

La región de estudio está caracterizada por climas semiárido y mediterráneo, con un régimen anual de lluvias invernales que se presentan de Noviembre a Abril. Durante esta temporada, el anticiclón del Pacífico Norte se debilita y el cinturón de alta presión se mueve hacia el Sur, permitiendo la entrada de vientos húmedos del Oeste, sistemas convectivos y tormentas originadas en latitudes medias. En verano el anticiclón del Pacífico domina y no permite la entrada de humedad a la costa, dando como resultado el clima seco característico de la región. Durante estos meses se presentan algunas lluvias esporádicas originadas por convección, principalmente en la sierra.

Se realizó la búsqueda de datos recientes de pluviómetros instalados en algunos viñedos de la región de la cuenca de Guadalupe, con la finalidad de conformar una red más completa de mediciones en la zona del Valle de Guadalupe. Desafortunadamente la mayoría de los viñedos no conservan esta información más de uno o dos años.

IV.1.1 Precipitación

Distribución espacial

Las estaciones no se encuentran distribuidas uniformemente, hay una mayor densidad hacia la costa (Figura 6) sin embargo, en la Figura 7 se puede observar que los valores registrados de precipitación media anual no muestran tendencias significativas en su distribución geográfica (latitud, longitud o elevación).

La precipitación registrada en las estaciones cercanas a la costa es similar a la de las estaciones en la sierra. Esto se debe a que un gran porcentaje de la precipitación anual ocurre en invierno, caracterizada por eventos sinópticos de gran escala. Aunque la topografía también puede ser un factor importante en la distribución de la lluvia, en este caso no se observa una influencia significativa, salvo en las escasas precipitaciones convectivas que se presentan en las sierras durante el verano.

En la Figura 8 se desglosan los valores de cada año para las 16 estaciones. La mayor precipitación anual se observa en la estación El Pinal (#2021, Lat: 32.1992°, Lon: -116.2847°, Elev: 1291 m), que registró 1092, 993 y 912 mm de lluvia en 1978, 1980 y 1993 respectivamente. El Pinal es una estación localizada dentro de la cuenca de Ojos Negros (ver Figuras 1 y 6), en la sierra con cara hacia el Pacífico, a una altitud de 1291 msnm.

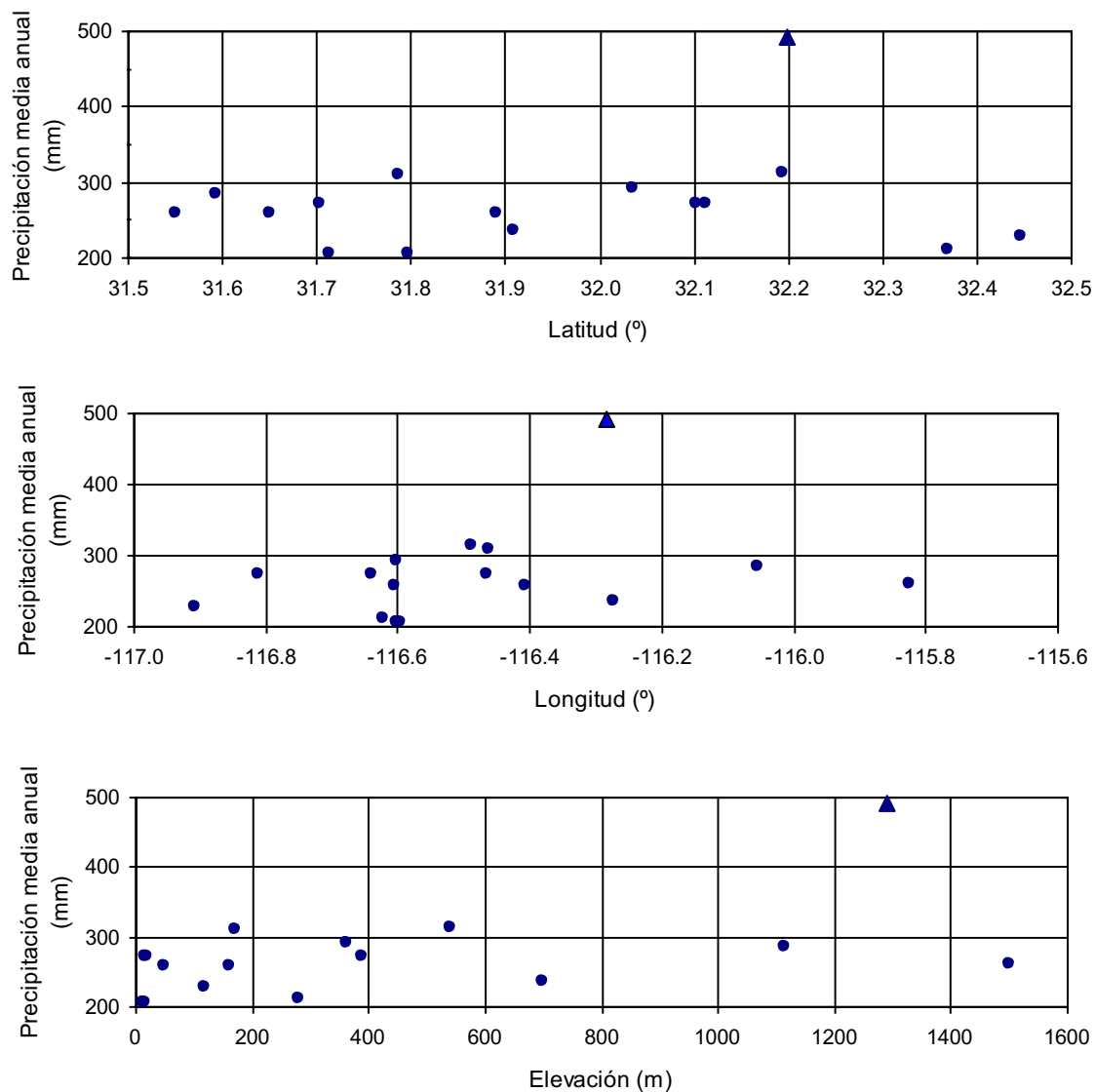


Figura 7. Distribución espacial de la precipitación media anual registrada en 16 estaciones, en latitud, longitud y elevación. La estación El Pinal (#2021) se muestra con un triángulo.

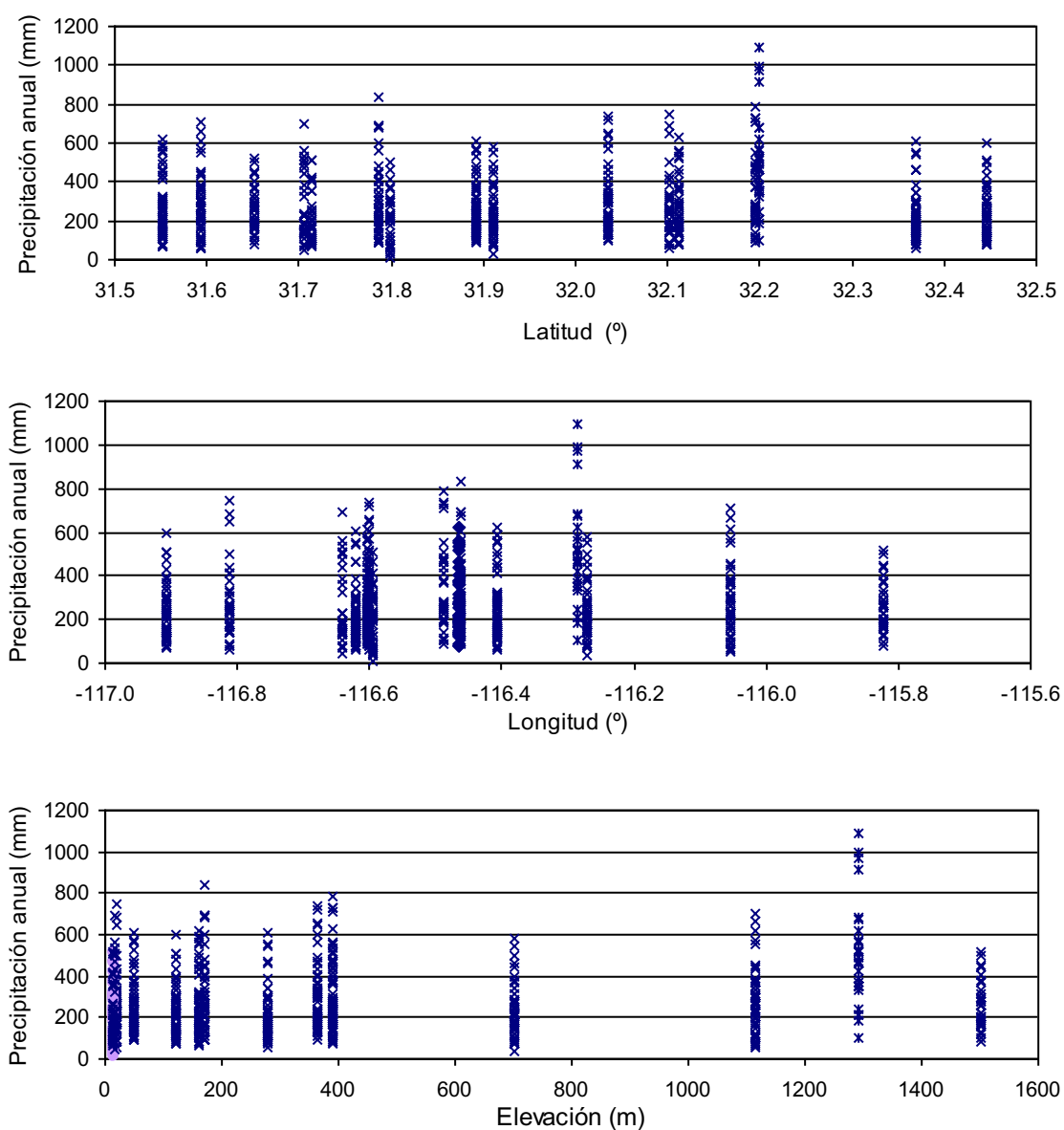


Figura 8. Distribución espacial de la precipitación anual en latitud, longitud y elevación de las 16 estaciones de la región de estudio. La estación con registro mayor a 1000 mm corresponde a la estación El Pinal (#2021).

Para las 16 estaciones, los meses con mayor precipitación son Enero, Febrero y Marzo, y el mes más seco es Junio. La estación El Pinal registra lluvias 11 meses al año, y tiene los valores más altos en los registros de 30 años. Lluvia en promedio 490 mm/año, mientras que el promedio anual para la Cuenca Todos Santos es 275 mm (Figura 9). Esto es consistente con los patrones de precipitación que describe Campos (1999) para invierno y verano en la zona.

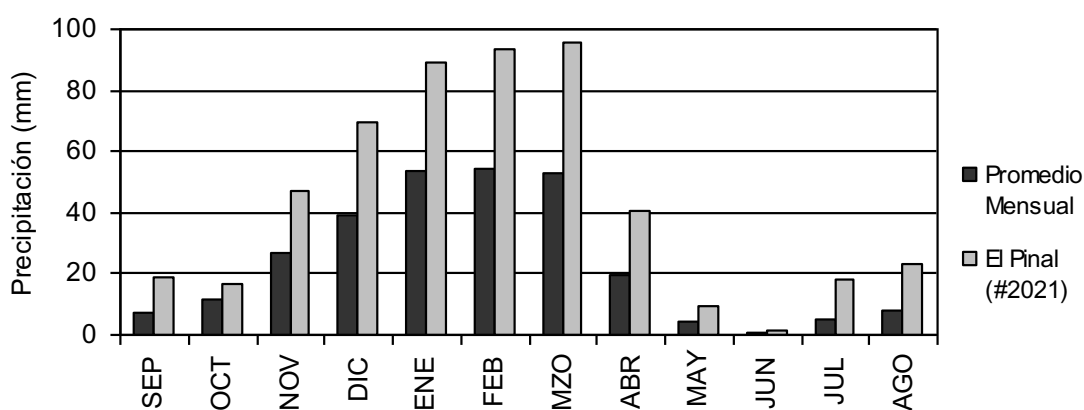


Figura 9. Precipitación media mensual en la cuenca Todos Santos y la estación de El Pinal ubicada en la Sierra de Juárez en la cuenca de Ojos Negros.

Variabilidad temporal

Los registros diarios de 50 años corresponden a las estaciones de la Presa Rodríguez (#2038), Valle de las Palmas (#2069), Presa Emilio López Zamora (#2072) y Santo Tomás (#2065), que se muestran en la Figura 6 (★). A partir de ellos se realizaron series de tiempo y se calcularon la media, mediana y desviación estándar de los días lluviosos (días > 1 mm), para cada estación y para la cuenca en general. Los resultados se muestran en la Tabla III. En la tabla se observa que la desviación estándar tanto de los días lluviosos como de la precipitación anual es más de la mitad del valor promedio registrado, indicando que la lluvia de la región se caracteriza por una gran variabilidad, típica de las zonas semiáridas.

Tabla III. Parámetros estadísticos de la precipitación diaria >1mm en 4 estaciones del sistema de cuencas Todos Santos para el periodo 1949-2002. La última columna muestra la precipitación media anual (mm) en cada estación \pm una desviación estándar.

Estación	\bar{X}	mediana	$\omega\#$	pma $\pm\omega\#$
Presa Rodríguez (2038)	7.9	4.5	9.2	230 \pm 117
Valle de las Palmas (2069)	7.6	4.5	9.0	210 \pm 123
Presa Emilio López Zamora (2072)	8.8	5.3	9.5	258 \pm 129
Santo Tomás (2065)	9.6	6.0	10.9	258 \pm 148
Sistema Cuencas Todos Santos	8.5	5.1	9.7	239 \pm 125

Se calculó la media aritmética de las estaciones con más de 50 años para hacer una serie anual, obteniendo un valor de 239 mm al año para todo el sistema de cuencas. Los datos muestran una tendencia positiva no significativa (pendiente = 0.55 mm/año, $R^2 = 0.023$) (Figura 10).

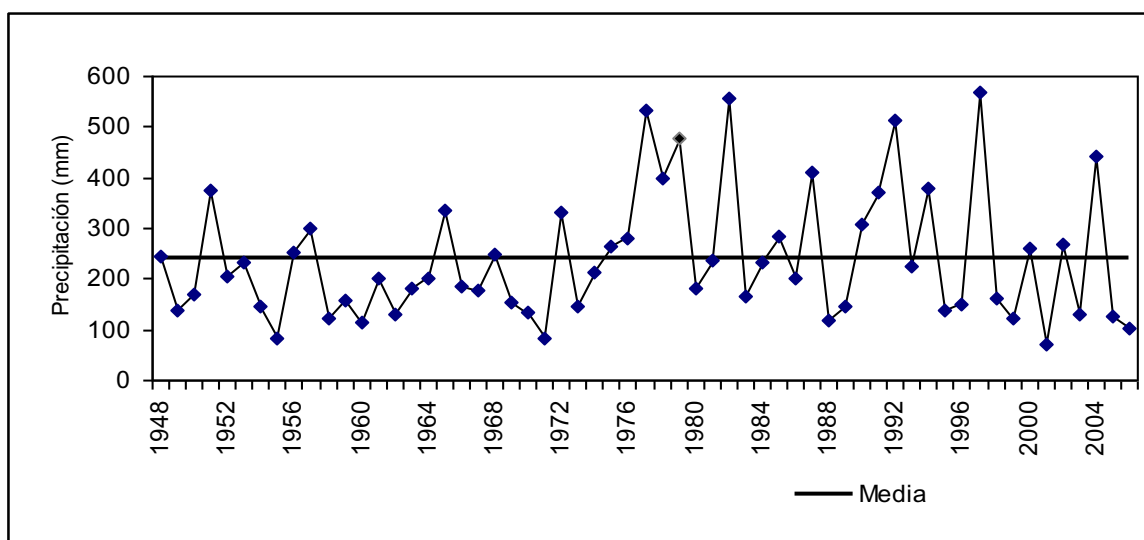


Figura 10. Precipitación media anual en la Cuenca Todos Santos para el periodo de 1948-2006. La media de 239 mm/año se muestra con una línea sólida.

Después de 1976, se puede distinguir un cambio en la precipitación anual que coincide con el cambio en la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) reportado por Miller et al. (1994) y consistente con los resultados obtenidos por Pavía y Graef (2002) y por Cavazos y Rivas (2004). Al recalcular la media por separado de los periodos antes y después de este cambio, se obtuvieron valores de 198 mm y 298 mm respectivamente (Figura 11). A partir del año 1998 se puede ver otro cambio que aun siendo por un periodo corto de tiempo, coincide con otro cambio de fase de la ODP, por lo cual se calculó otra media para el periodo del año 1998 al 2006, siendo ésta de 200 mm/año.

La diferencia entre el primer y segundo periodo es estadísticamente significativa de acuerdo a la prueba T con un grado de confianza de 95%. Entre el segundo y tercer periodo la diferencia no es estadísticamente significativa de acuerdo con la misma prueba y con grado de confianza de 95%.

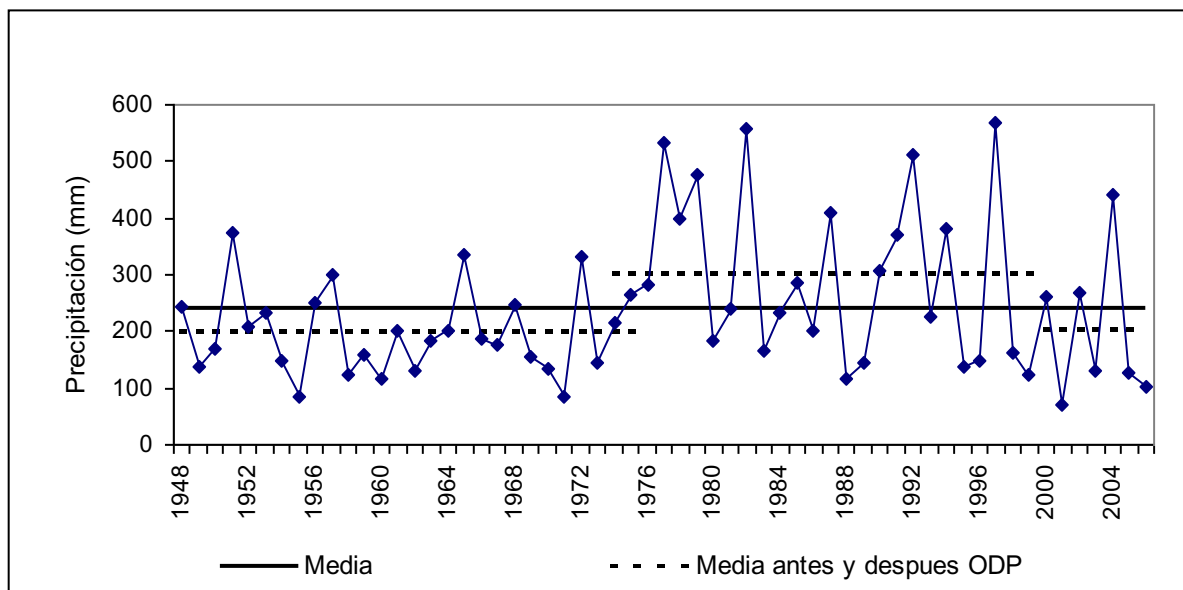


Figura 11. Precipitación media anual en la cuenca Todos Santos para el periodo de 1948-2006. Las medias antes y después del cambio de la ODP se muestran con líneas punteadas. (1948-1976: media = 198mm, 1997-2000: media = 298mm, 2000-2006 media = 200mm). La diferencia entre las dos primeras es significativa al 95% de confianza.

Análisis de eventos extremos

Se calculó el percentil 95 (P95%) de los datos diarios para las estaciones de la Presa Rodríguez (#2038), Valle de las Palmas (#2069), Presa Emilio-López-Zamora (#2072) y Santo Tomás (#2065). Estas estaciones cuentan con un registro de 50 años con un 90% de datos. Se consideró un evento extremo a la precipitación acumulada en un día que excediera el P95% para cada estación, siguiendo la metodología descrita por Cavazos et al. (2008).

Se recalculó la media de los datos completos (días con lluvia > 1 mm), excluyendo los eventos extremos, disminuyendo de 8.5 mm a 6.8 mm como se muestra en la Tabla IV. Los eventos extremos se encuentran dentro de los rangos

que se muestran en la Tabla V, caracterizándose por precipitaciones de 39.5 mm/día en promedio para la cuenca Todos Santos.

Tabla IV. Parámetros estadísticos de la precipitación diaria (>1mm) en 4 estaciones y en el sistema de cuencas Todos Santos (mm).

Estación	\bar{X} datos completos	\bar{X} sin extremos
Presa Rodríguez (2038)	7.9	6.3
Valle Palmas (2069)	7.6	6.1
Presa E. López Z. (2072)	8.8	7.2
Santo Tomás (2065)	9.6	7.8
SC Todos Santos	8.5	6.8

Tabla V. Parámetros estadísticos de eventos extremos de precipitación diaria >P95%, (mm).

Estación	\bar{X}	mediana	$\omega\#$	rango
Presa Rodríguez (2038)	37.8	33.7	12.1	26.6 - 86.9
Valle de las Palmas (2069)	36.4	33.8	14.7	24.4 - 119
Presa Emilio López Zamora (2072)	39.3	36.5	9.6	29.0 - 81.5
Santo Tomás (2065)	44.5	40.0	13.5	31.6 - 98
Sistema Cuencas Todos Santos	39.5	36.0	12.4	26.6 - 119

Para analizar la variabilidad de la precipitación extrema se obtuvo la frecuencia de los eventos > P95% por año hidrológico (Octubre a Septiembre), la cual se muestra en la Figura 12 para todo el sistema Todos Santos, considerando los días que se presentó un evento extremo en una o más estaciones y en la Figura 13 para cada una de las estaciones por separado. El año mostrado en las figuras representa la temporada de lluvias que inicia en Octubre de ese año y que termina en Septiembre del siguiente año.

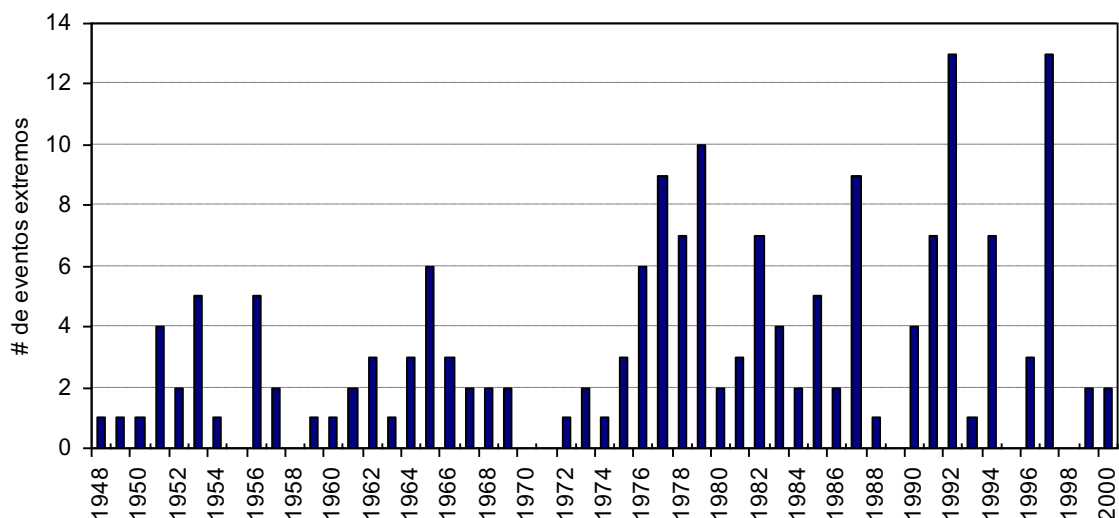


Figura 12. Número de eventos extremos de precipitación (>P95%) por año registrados en una o más estaciones dentro del sistema de cuencas Todos Santos.

En ambas figuras se puede apreciar un aumento en el número de eventos extremos por año a partir de 1976-77, coincidiendo como se mencionó anteriormente con el cambio en la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) reportado por Miller et al. (1994) y consistente con los resultados obtenidos por Pavía y Graef (2002), Cavazos y Rivas (2004) y Arriaga-Ramírez y Cavazos (2010). Los años con mayor número de eventos extremos son 1992 y 1997, los cuales se caracterizaron por condiciones de El Niño fuerte (Cavazos y Rivas 2004).

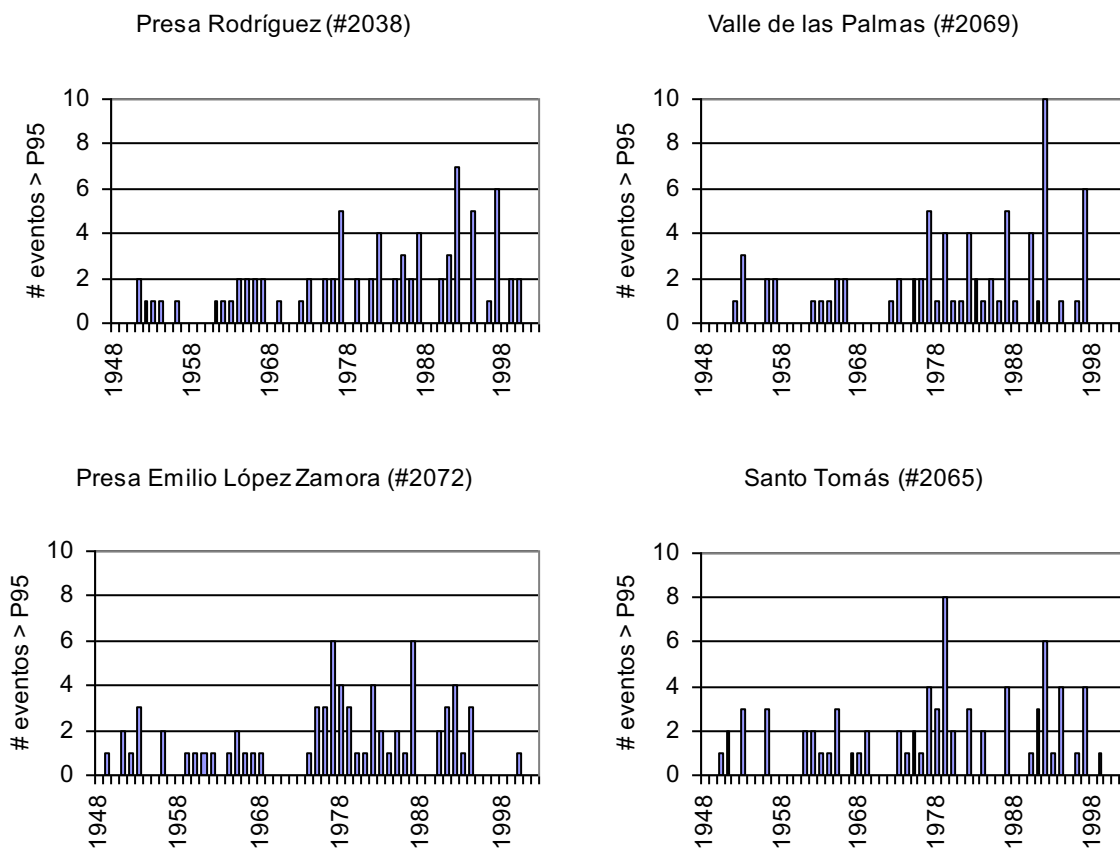


Figura 13. Frecuencia de eventos extremos de precipitación (>P95%) por año de 1949 a 2002 en cada estación.

IV.1.2 Temperatura máxima y mínima

Se realizó un análisis de la variabilidad de la temperatura máxima y mínima diaria en las estaciones de Presa Rodríguez (#2038), Valle de las Palmas (#2069), Presa Emilio López Zamora (#2072) y Santo Tomás (#2065), para el periodo de 1948 a 2002. Estas estaciones aparecen marcadas con el símbolo ★ en la Figura 6. Se realizaron series de tiempo y se calcularon parámetros estadísticos básicos para cada estación. Los resultados se muestran en las Tablas VI y VII obteniendo una temperatura máxima de 24.9 °C y mínima de 10.2 °C para el periodo de 1948 a 2002 para la cuenca Todos Santos.

Tabla VI. Estadística de la temperatura máxima (°C) en 4 estaciones del sistema de cuencas Todos Santos para el periodo de 1948 a 2002.

Estación	\bar{X}	mediana	$\omega\#$
Presa Rodríguez (2038)	23.7	24.0	5.3
Valle de las Palmas (2069)	26.5	26.0	7.6
Presa Emilio López Zamora (2072)	22.5	22.0	4.1
Santo Tomás (2065)	26.9	27.0	6.8
Sistema Cuencas Todos Santos	24.9	24.8	6.0

Tabla VII. Estadística de la temperatura mínima (°C) en 4 estaciones del sistema de cuencas Todos Santos para el periodo de 1948 a 2002.

Estación	\bar{X}	mediana	$\omega\#$
Presa Rodríguez (2038)	11.5	11.5	4.4
Valle de las Palmas (2069)	8.6	9.0	5.1
Presa Emilio López Zamora (2072)	12.0	12.0	4.4
Santo Tomás (2065)	8.6	8.5	5.3
Sistema Cuencas Todos Santos	10.2	10.3	4.8

Distribución espacial y variabilidad temporal de la temperatura

Las dos estaciones ubicadas en zonas urbanas cerca de la costa, Presa Rodríguez (#2038) y Emilio-López-Zamora (#2072) presentan una temperatura más templada tanto en los meses de verano como de invierno en comparación con los registros de Valle de las Palmas (#2069) y Santo Tomás (#2065) (Figura 13). Estas últimas se encuentran a 40 y 20 km de la costa respectivamente. El mes más cálido en las ciudades de Tijuana (Presa Rodríguez) y Ensenada (Presa E. López Zamora) es Septiembre, mientras que en los valles de Las Palmas y Santo Tomás, es el mes de Agosto. La temperatura más baja en las cuatro estaciones se registra en el mes de Enero, como se observa en la Figura 14.

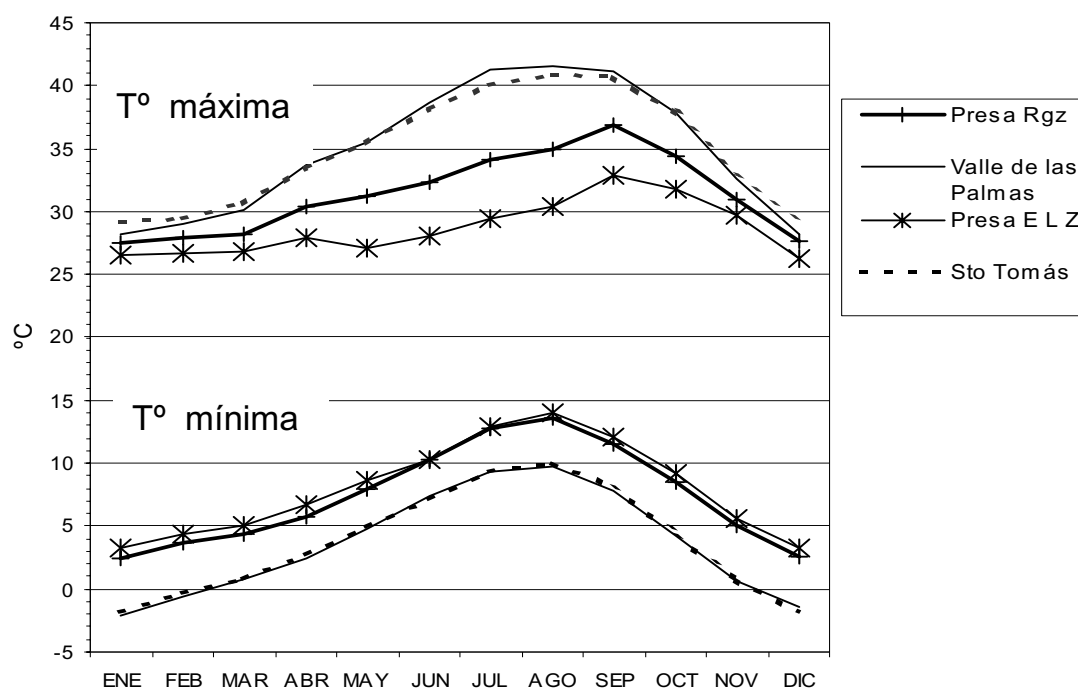


Figura 14. Temperatura máxima y mínima mensual en las estaciones de la Presa Rodríguez (#2036), Valle de las Palmas (#2069), Presa Emilio López Zamora (#2072) y Santo Tomás (#2065).

Se analizaron las temperaturas máximas y mínimas en cada estación con la finalidad de buscar tendencias o cambios significativos, así como la ocurrencia de eventos extremos en el clima de la región. Se separaron los datos en 2 temporadas: verano (Mayo – Octubre) e invierno (Noviembre - Abril) (Figuras 15 y 16). En la Tabla VIII se muestran las tendencias y sus significancias.

Se puede decir que tanto la temperatura máxima de verano como la mínima de invierno presentan una tendencia general a aumentar, con excepción de la máxima en la Presa Emilio López Zamora (#2072) y la mínima en Valle de las Palmas (# 2069). Al evaluar la tendencia en cada estación se obtuvo un aumento significativo promedio de $0.025^{\circ}\text{C/año}$ en la temperatura mínima y un aumento significativo promedio de $0.027^{\circ}\text{C/año}$ en la temperatura máxima para el periodo de 1948 a 2006 (Tabla VIII).

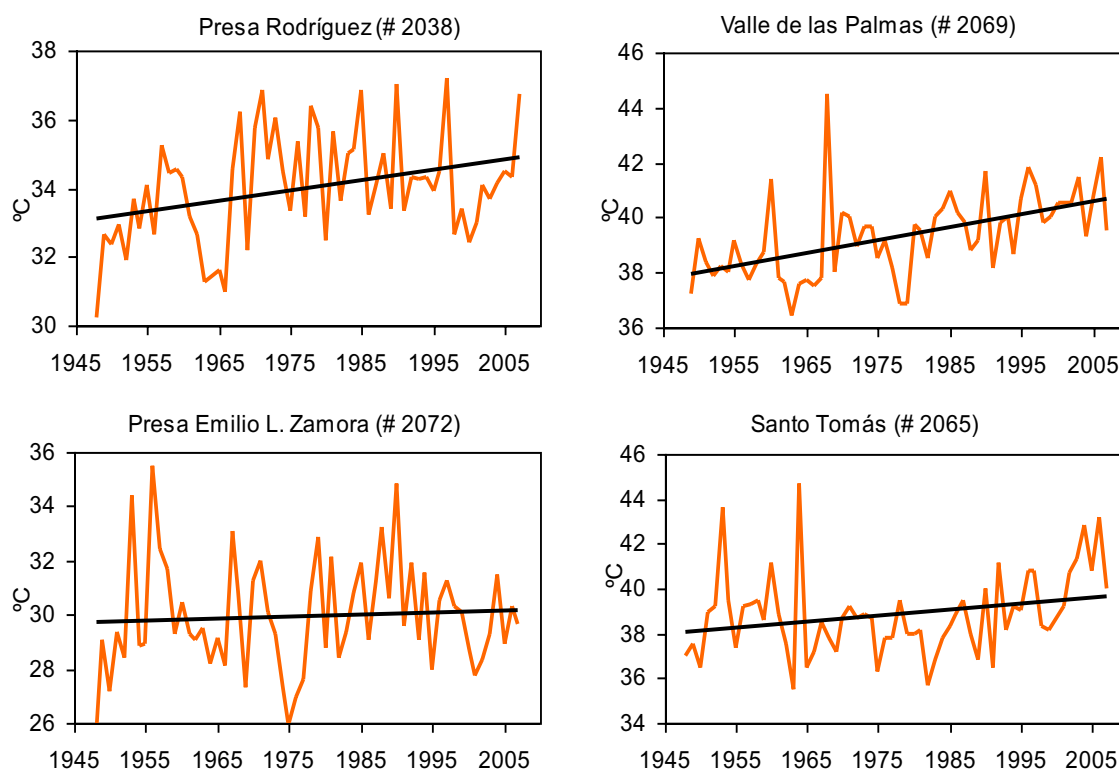


Figura 15. Temperatura máxima de verano en 4 estaciones en el periodo de 1948 a 2006. La línea recta indica la tendencia significativa anual de 0.03, 0.05 y 0.03 °C/año para las estaciones #2038, #2069 y #2065 respectivamente.

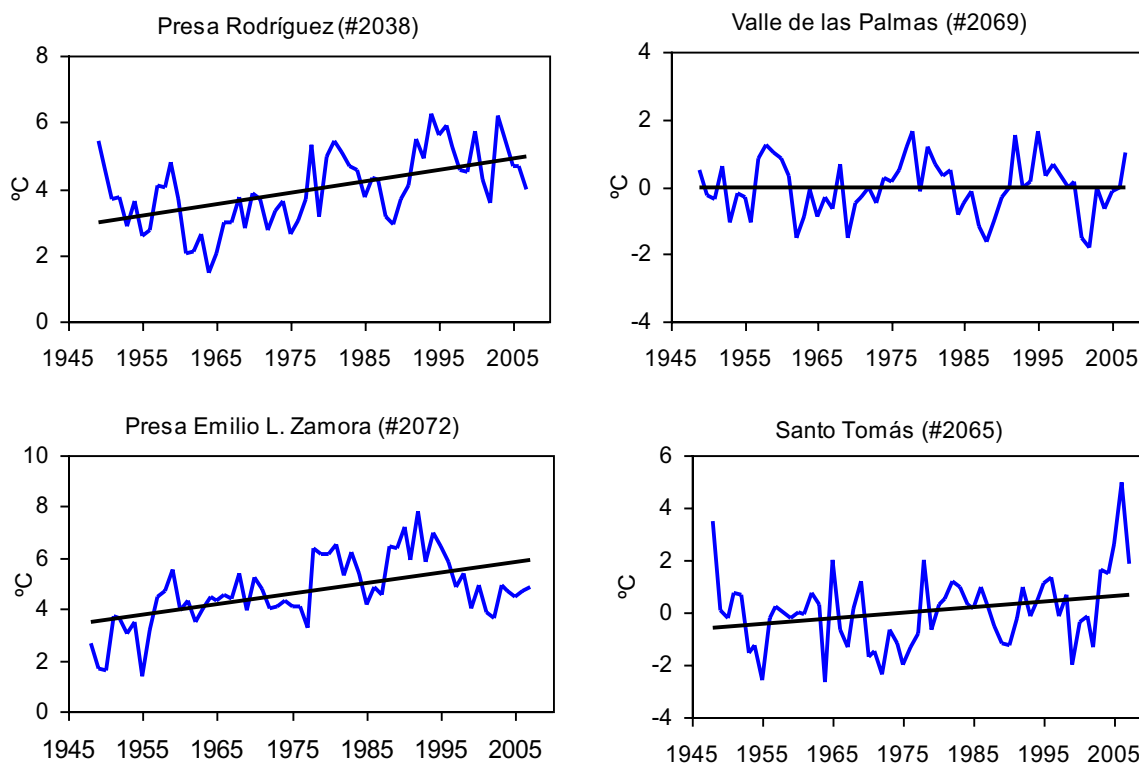


Figura 16. Temperatura mínima de invierno en las 4 estaciones, de 1948 a 2006. La línea recta indica la tendencia anual, de 0.03, 0.04 y 0.02 °C/año para las estaciones #2038, #2072 y #2065 respectivamente.

Tabla VIII. Tendencias de temperatura máxima y mínima (°C/año) en 4 estaciones para el periodo de 1948 a 2006. Se consideraron tendencias estadísticas significativas mayores o iguales al 95%.

Estación	Tendencia (Signif.) T- Max	Tendencia (Signif.) T-Min
Presa Rodríguez (#2038)	0.03 (99%)	0.03 (99%)
Valle de las Palmas (#2069)	0.05 (99%)	0 (No sig)
Presa Emilio López Zamora (#2072)	0.01 (No Sig)	0.04 (99%)
Santo Tomás (#2065)	0.03 (99%)	0.02 (95%)
°C x año en la Cuenca T. Santos	0.028	0.023
En 50 años	1.25	1.15

Las Figuras 15 y 16 muestran que en promedio para las cuatro estaciones, tanto la temperatura máxima de verano, como la temperatura mínima de invierno han aumentado significativamente en la cuenca 1.5°C y 1.65°C respectivamente, en un periodo de 58 años. Este resultado es acorde a los obtenidos por Pavía, et al. (2009) y a estudios de cambio climático.

Análisis de eventos extremos de temperatura

Se calculó el percentil 95 (P95%) de los datos diarios para las estaciones de la Presa Rodríguez, Valle de las Palmas, Presa Emilio-López-Zamora y Santo Tomás. Se consideró como evento extremo a la temperatura máxima mayor al P95% para cada estación. En el caso de la temperatura mínima, los valores menores al P5%. Se recalcularon la media, mediana y desviación estándar para ambas temperaturas excluyendo los eventos extremos (Tablas IX y X), encontrando una diferencia de 0.6 °C en la media de la temperatura máxima y 0.3°C en la de la mínima.

Tabla IX. Parámetros estadísticos de la temperatura máxima (°C) diaria promedio en cada estación.

Estación	\bar{X} datos completos	\bar{X} sin extremos
Presa Rodríguez (2038)	23.7	23.2
Valle Palmas (2069)	26.5	25.8
Presa E. López Z. (2072)	22.5	22.0
Santo Tomás (2065)	26.9	26.2
SC Todos Santos	24.9	24.3

Tabla X. Parámetros estadísticos de la temperatura mínima (°C) diaria promedio en cada estación.

Estación	\bar{X} datos completos	\bar{X} sin extremos
Presa Rodríguez (2038)	11.5	12.0
Valle Palmas (2069)	8.6	9.1
Presa E. López Z. (2072)	12.0	12.4
Santo Tomás (2065)	8.6	9.1
SC Todos Santos	5.1	10.6

Los eventos extremos de la temperatura máxima (>P95%) se encuentran dentro de un rango que va de 29.5°C a 48.5°C en las distintas estaciones (Tabla XII). La estación que registró las temperaturas más altas fue Valle de las Palmas con 48.5°C, seguida de Santo Tomás con 48°C.

Los extremos de la temperatura mínima (<5%) abarcan un rango de 0°C a -8°C, siendo las temperaturas más bajas de -7°C y -8°C registradas también en Valle de las Palmas y Santo Tomás respectivamente (Tabla XII).

Tabla XI. Parámetros estadísticos de eventos extremos (>P95%) de temperatura máxima diaria (°C).

Estación	\bar{X}	mediana	$\omega\#$	rango
Presa Rodríguez (2038)	34.7	34.0	2.0	32.5 - 42.6
Valle de las Palmas (2069)	40.6	40.0	1.7	39.0 - 48.5
Presa Emilio López Zamora (2072)	32.0	31.0	2.4	29.5 - 43.5
Santo Tomás (2065)	40.4	40.0	1.9	38.0 - 48.0
Sistema Cuencas Todos Santos	36.9	36.3	2.0	29.5 - 48.5

Tabla XII. Parámetros estadísticos de eventos extremos de temperatura mínima diaria (<P5%) (°C).

Estación	\bar{X}	mediana	$\omega\#$	rango
Presa Rodríguez (2038)	2.9	3.1	1.2	-6 - 4.2
Valle de las Palmas (2069)	-0.8	-0.5	1.4	-8 - 1.0
Presa Emilio López Zamora (2072)	3.8	4.0	1.2	-1.6 - 5.0
Santo Tomás (2065)	-1.3	-1.0	1.4	-7 - 0.0
Sistema Cuencas Todos Santos	1.1	1.4	1.3	-8 - 5.0

Para analizar la variabilidad de las temperaturas extremas se obtuvo la frecuencia de estos eventos por año, la cual se muestra en las figuras 17 y 18. Aunque las temperaturas máxima y mínima anual muestran una tendencia positiva en la región (Figuras 15 y 16), no se observa ninguna tendencia al aumento o disminución de eventos extremos de temperatura que sea consistente para las 4 estaciones. En la Presa Rodríguez se registra el mayor número de eventos extremos de temperatura máxima y en Valle de las Palmas el mayor número de eventos extremos de temperatura mínima para el periodo de estudio.

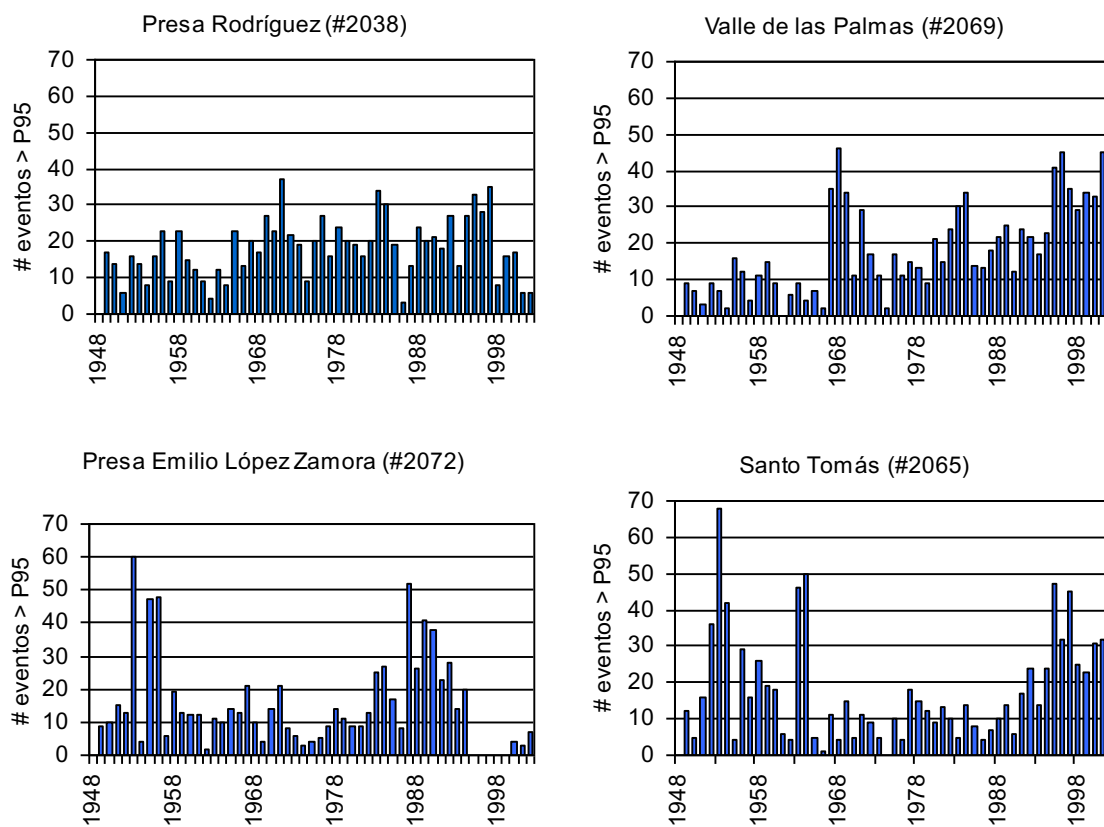


Figura 17. Frecuencia anual de eventos extremos diarios (>P95%) de temperatura máxima de 1949 a 2002 en cada estación.

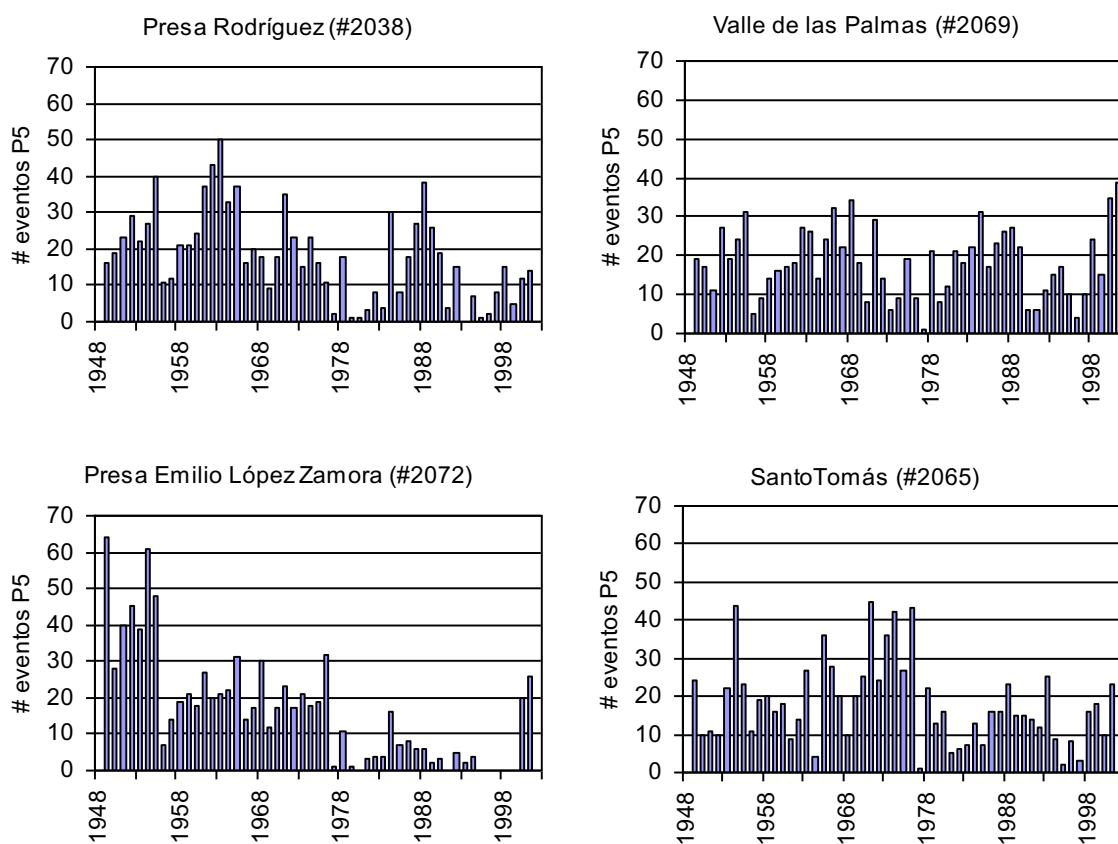


Figura 18. Frecuencia anual de eventos extremos diarios (<P5%) de temperatura mínima de 1949 a 2002 en cada estación.

IV.2 Cambios antropogénicos

La cobertura del suelo juega un papel importante en el ciclo hidrológico. En conjunto con las características litológicas y el tipo de precipitación, determina procesos como la intercepción, escurrimiento e infiltración del agua. Afecta la humedad en el ambiente mediante procesos como la evapotranspiración, al igual que la temperatura, ya que afecta directamente la capacidad de la superficie terrestre de absorber o reflejar la radiación solar. Cuando la cobertura del suelo se ve modificada a lo largo de grandes extensiones, ya sea por causas naturales (incendios, inundaciones, sequías) o actividades antropogénicas (agricultura, sobrepastoreo, urbanización), provoca cambios que se ven reflejados directamente en la recarga de acuíferos y llega incluso a modificar los patrones locales de precipitación (Pitman, 2004), y por lo tanto la disponibilidad de agua en una región.

Como se mencionó en el Capítulo 1, la demanda de agua en la región ha tenido un aumento considerable en las últimas décadas. Debido a la escasa precipitación que caracteriza a la zona de estudio, el escurrimiento en los principales arroyos es considerado intermitente o nulo en la mayoría de los casos. Debido a esto, el agua superficial no representa una fuente para usos antropogénicos. Se puede decir que el agua necesaria para las actividades agrícolas y urbanas de la región proviene en su totalidad de los mantos acuíferos de las cuencas de Ojos Negros, Guadalupe, La Misión, Ensenada y Maneadero. La extracción desmedida ha puesto una gran presión sobre el recurso hídrico y sobre los ecosistemas que dependen de éste (CNA, 2005), de tal forma que estos acuíferos se encuentran en la actualidad en estado de sobreexplotación (CNA, 2008). Los acuíferos de Ensenada y Maneadero presentan además, intrusión salina, debida al nivel freático tan bajo que han alcanzado (Sánchez, 2004; CNA, 2008).

IV.2.1 Cambios en la Demanda del recurso

La información obtenida de los censos de INEGI se muestra en la Figura 19. Se puede observar que la población en las zonas urbanas muestra una tendencia positiva, con una tasa de crecimiento anual de 2.4% hasta el 2007. La principal zona urbana del área de estudio es la ciudad de Ensenada, cuyo crecimiento en los últimos años ha alcanzado el poblado de Maneadero hacia el Sur y el poblado de El Sauzal hacia el Norte.

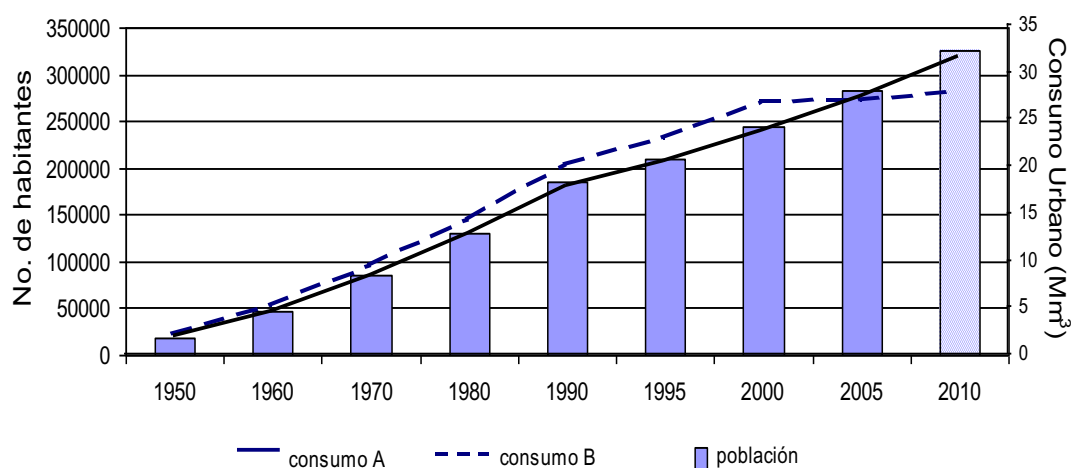


Figura 19. Población en las principales zonas urbanas del área de estudio: Ensenada, Valle de Guadalupe, Maneadero, La Misión y Ojos Negros (INEGI 2005). Las líneas sólida y punteada indican el consumo urbano (Mm^3) para cada año, considerando un consumo per cápita promedio de $97m^3/año$ (línea sólida) y un consumo per cápita variable estimado por la CNA (línea punteada).

En la Figura 19 también se muestra el consumo de agua en dos casos: considerando datos de volúmen concesionado para uso urbano en años recientes (CNA, 2003, 2008, 2010), obteniendo un consumo per cápita variable entre 93.8 y $108.8 m^3/año$, y usando un promedio general de $97 m^3/año$. El consumo de agua por parte del sector urbano muestra un aumento en un factor de 17 en los últimos 60 años.

En la Figura 20 se muestra la disponibilidad natural media de los acuíferos que abastecen de agua al área de estudio, calculada por la CNA para los años 2002 y 2007, así como el volúmen concesionado de extracción. Esta información fue estimada a partir de promedios de precipitación media anual, y volúmenes de recarga calculados en 2002. Se puede observar que entre 2002 y 2007, el volúmen concesionado aumentó en todos los acuíferos menos el de Ensenada, y que en los 5 acuíferos la extracción supera la recarga, siendo los de Guadalupe y Maneadero los más sobreexplotados.

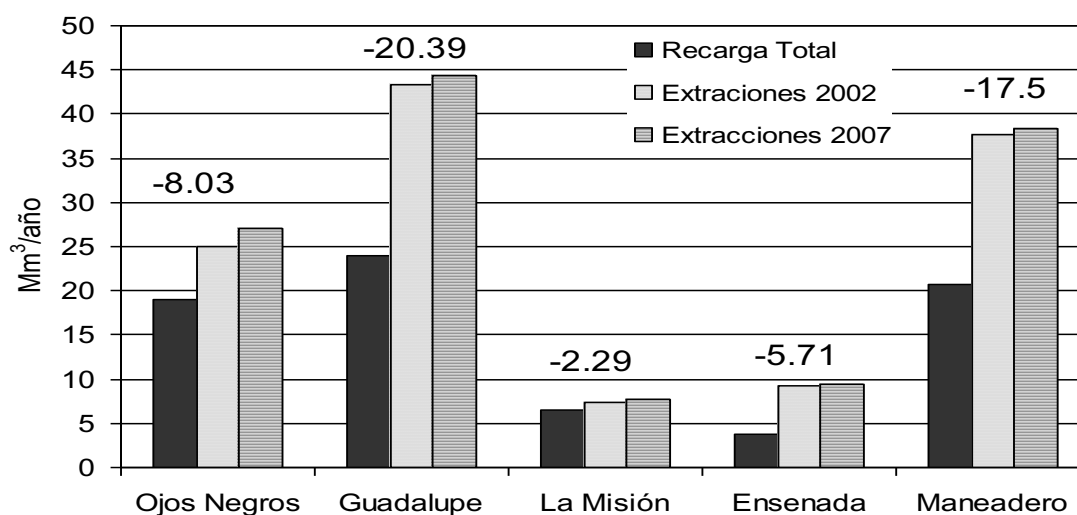


Figura 20. Disponibilidad media anual de agua en los acuíferos que abastecen la zona de estudio. Recarga y extracciones concesionadas en 2002 y 2007 (Millones de m³ / año). CNA Sistema de Información del Agua, 2002 y 2008.

En la Tabla XIII se muestra una estimación del uso del agua por parte de los sectores agrícola y urbano para los años 2002 y 2007. Se puede observar un aumento en la población y el consumo per cápita. Al no contar con datos suficientes sobre el uso de agua para actividades agrícolas en la zona de estudio,

se estimó a partir de la información anterior, mostrando un aumento de 4.67 Mm³ entre los años 2002 y 2007. Los datos disponibles no son consistentes en cuanto a área de cobertura, por lo que no fue posible calcular el consumo por parte del sector agrícola para años anteriores, sin embargo es probable que no haya tenido un aumento comparable al de la demanda urbana.

Tabla XIII. Usos del agua en la zona de estudio. (INEGI 2000 y 2005, CNA 2003, 2008 y 2010).

Año	Población	Consumo per cápita (m ³ /año)	Volúmen Concesionado (Mm ³ /año)	Consumo Urbano (Mm ³ /año)	Consumo Agrícola (Mm ³ /año)
2002	282312	105.1	122.7	27.29	95.41
2007	305000	87.6	126.8	26.72	100.08

Los censos agrícolas reportan algunos cambios de cultivos en la zona de estudio. Algunos cereales como la avena han sido sustituidos desde 1994 por variedades con un mayor rendimiento y que utilizan una menor cantidad de agua (SAGARPA, 2003). Otros cultivos han dejado de sembrarse en volúmenes significativos dentro de la zona costa, como es el caso la cebada, centeno, maíz y sorgo.

En la Tabla XIV se muestran los principales cultivos reportados en los censos del 2002 y 2007 y el área sembrada de cada uno. Dentro de las especies nuevas que se han introducido a la región en los últimos años, están algunos pastos, la cebolla y cebollín, los nopales y las flores, principalmente en el valle agrícola de Maneadero.

Tabla XIV. Cambios en cultivos en los principales valles agrícolas de la zona de estudio durante la última década (Hectáreas, n/d= sin datos disponibles), SAGARPA, 2000 y 2007.

Cultivo	Riego 2000	Temporal 2000	Total 2000	Riego 2007	Temporal 2007	Total 2007
Sorgo Forrajero	20	0	20	n/d	n/d	n/d
Avena Forrajera	251	791.5	1042.5	n/d	n/d	n/d
Maíz Grano	268	601	869	n/d	n/d	n/d
Cebada Grano	1172	14486	15658	n/d	n/d	n/d
Centeno Grano	7	3	10	n/d	n/d	n/d
Olivo Verde	2486	1267	3753	n/d	n/d	n/d
Trigo Grano	188	7815	8003	0	7266	7266
Jitomate	5897.5	0	5897.5	3331.8	0	3331.8
Cebollín	991.5	0	991.5	584	0	584
Cebolla	778	0	778	3543	0	3543
Alfalfa	2263	0	2263	1235	0	1235
Vid Industrial	3103	1256	4359	2057.5	242	2299.5
Esparrago	407	0	407	463	0	463
Fresa	n/d	n/d	n/d	1386	0	1386
Pepino	n/d	n/d	n/d	949.6	0	949.6
Pastos y Praderas	n/d	n/d	n/d	211	65	276
Nopales	n/d	n/d	n/d	706.5	12	718.5
Flores	n/d	n/d	n/d	90	0	90
TOTAL	17832	26220	44052	14557	7585	22142

IV.2.2 Cambios de cobertura de suelo

En la Tabla XIV se puede observar que la agricultura, medida en kilómetros² de superficie sembrada, muestra una tendencia negativa durante la última década. Se puede observar que del 2000 al 2007 hubo una reducción del 50% en el área total cultivada en la región, con una reducción más fuerte en las zonas de temporal. Esto puede relacionarse a los cambios observados en la precipitación reportados en la sección IV.1.1.

La información contenida en la Tabla XIV y Figura 5 abarca las superficies sembradas en el Valle de San Quintín, mismo que se encuentra fuera del área de estudio por que el acuífero que proporciona agua para la actividad agrícola en este valle, no está involucrado en el abastecimiento del recurso a la zona urbana y agrícola de Ensenada.

Para complementar y precisar la información sobre los cambios en las superficies agrícolas a lo largo de un lapso de tiempo mayor, se analizaron 3 imágenes multiespectrales del satélite LANDSAT, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo III, para los años 1976, 2000 y 2009, y se compararon con imágenes procesadas por Hinojosa, et al (2001) de 1986 y 1992.

Las imágenes fueron clasificadas espectralmente en 99 clases, y reagrupadas en 4 clases que incluyen distintos tipos de vegetación natural, suelos desnudos, campos agrícolas y zonas urbanizadas. Las Figuras 21 a 25 muestran las áreas agrícolas de los valles de Guadalupe, Ojos Negros y Maneadero. La Tabla XV muestra la superficie que abarcan en Km².

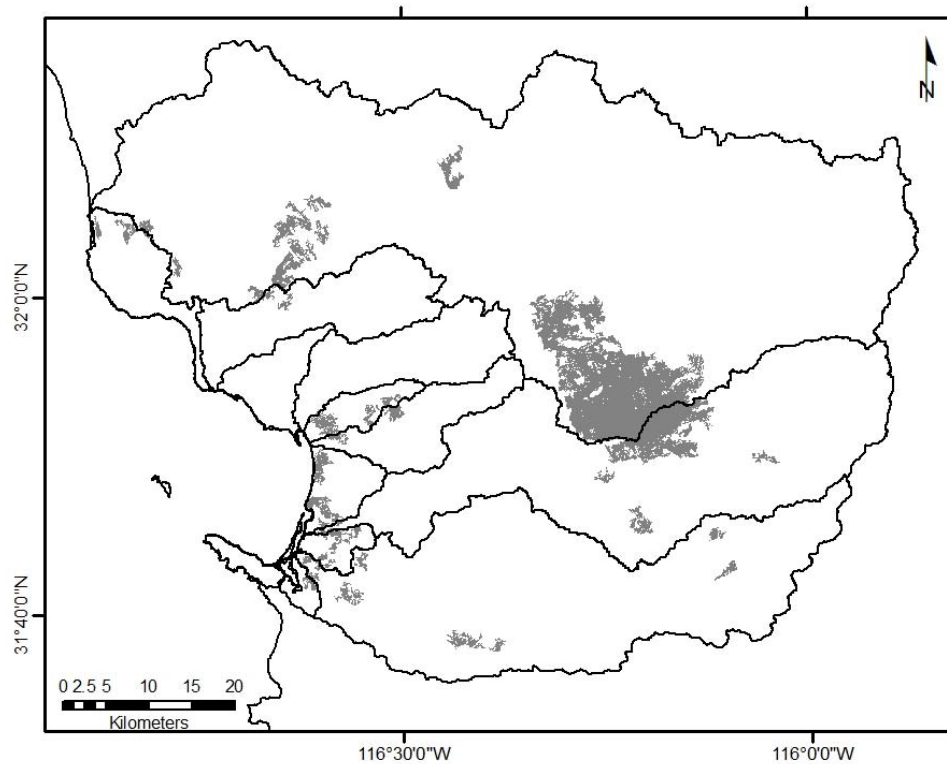


Figura 21. Zonas de actividad agrícola en la Cuenca Todos Santos para Mayo 07 de 1975. Area = 277 Km².

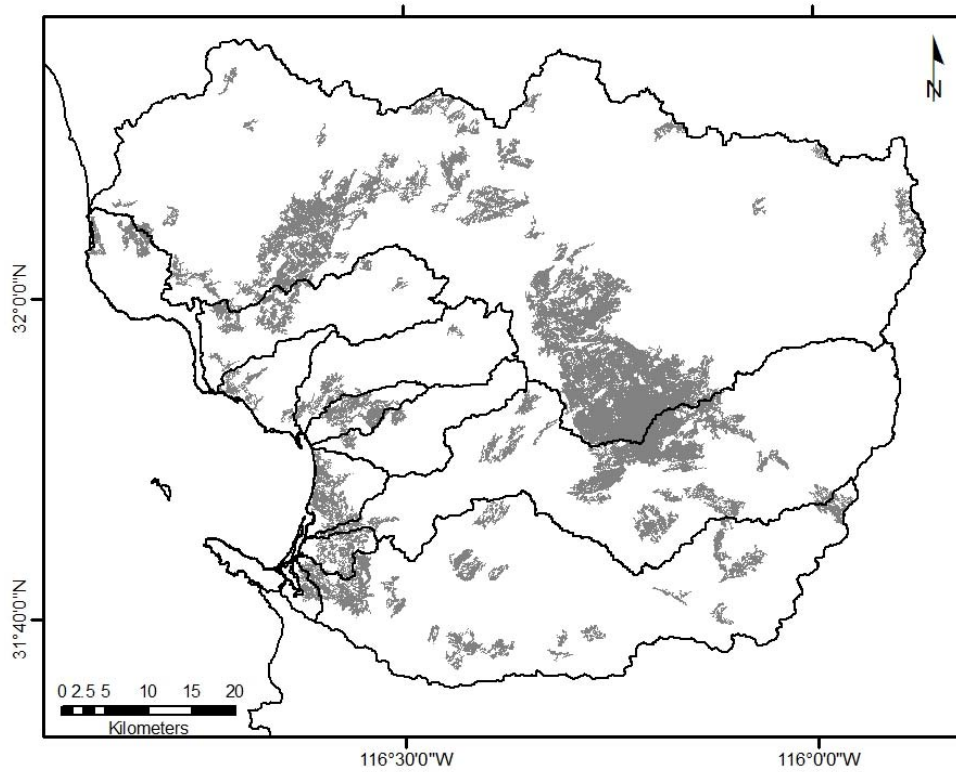


Figura 22. Similar a la Figura 21 pero para Mayo 05, 1986. Area = 647 Km².

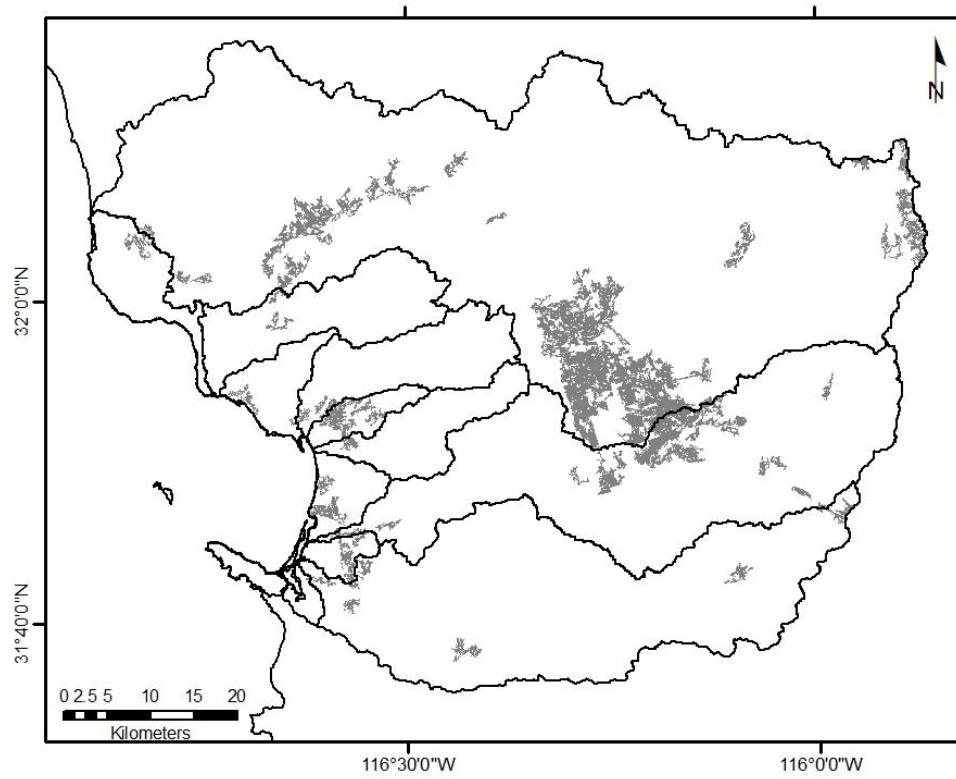


Figura 23. Similar a la Figura 21 pero para Junio 30, 1992. Area = 283 Km².

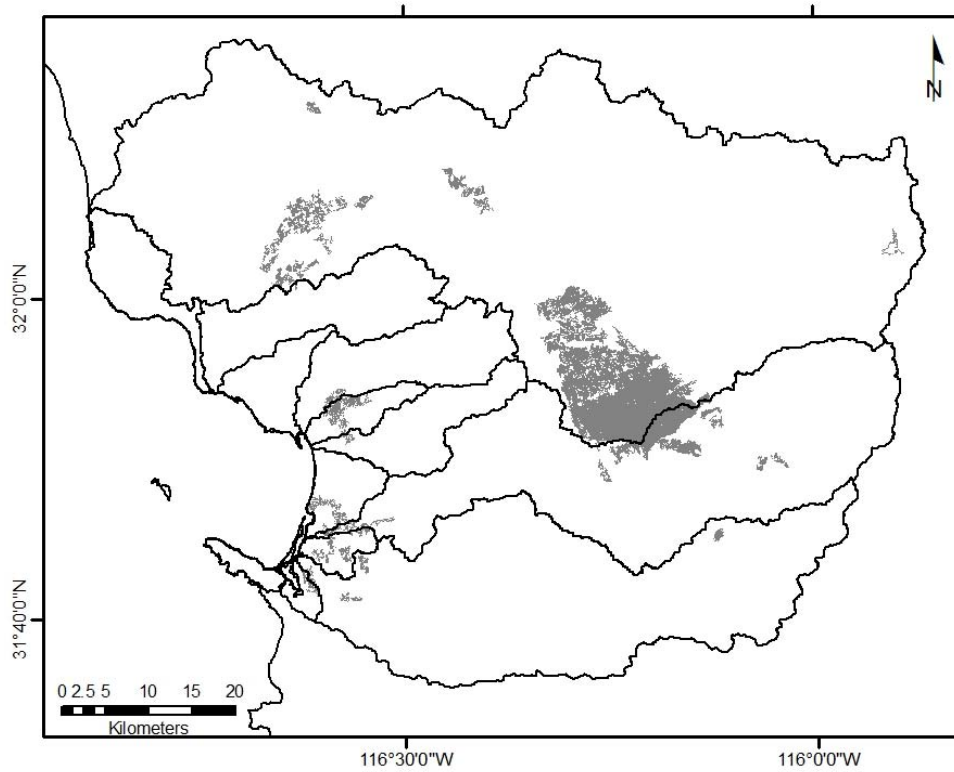


Figura 24. Similar a la Figura 20 pero para Mayo 11, 2000. Area = 231 Km².

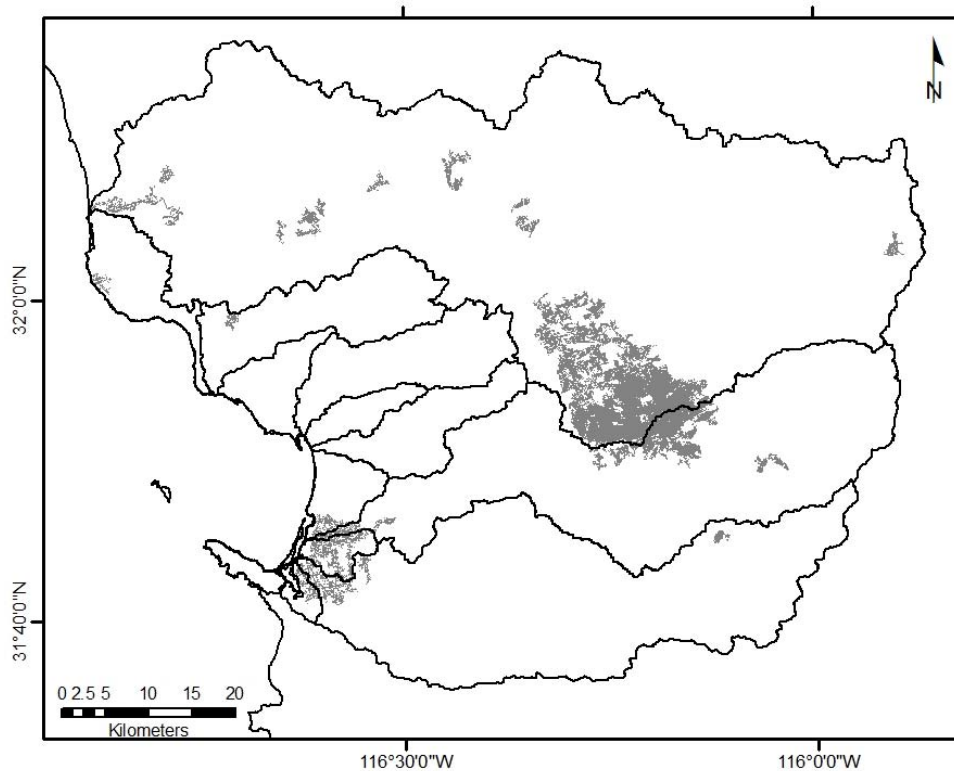


Figura 25. Similar a la Figura 20 pero para Junio 21, 2009. Area = 226 Km².

Tabla XV. Superficie agrícola calculada a partir de la clasificación multiespectral de 5 imágenes LANDSAT entre 1975 y 2009.

Año	Superficie Km²
1975	277
1986	648
1992	283
2000	231
2009	226

V. DISCUSION DE RESULTADOS

En el análisis espacial de la precipitación no se observó ningún patrón relacionado con la ubicación geográfica de las estaciones (Figura 7), sin embargo, tanto el promedio anual como los valores mensuales para la estación de El Pinal (# 2021) son mayores que el promedio para toda la cuenca. Esta se encuentra a más de 1000 msnmm y al revisar las estaciones cercanas, o ubicadas a elevaciones alrededor de los 1000 m, se encontraron valores similares. Estas últimas no se consideraron en el análisis por no cumplir con el criterio de tener un registro completo de 30 años como mínimo, pero indican que si puede existir cierta tendencia asociada a la topografía. Es importante mencionar que las estaciones de la sierra reciben lluvia tanto en invierno como en verano, aumentando el promedio anual con respecto a estaciones que se encuentran a menor elevación y con cara al Pacífico.

Las estaciones de El Alamo (#2014) y Santa Catarina Norte (#2057) se encuentran por arriba de los 1000 msnmm, pero no registran valores tan altos como El Pinal (#2021). Estas estaciones, se encuentran del lado Este del parteaguas por lo que pueden estar afectadas por otro régimen de lluvias. Campos (1999) describe un patrón acorde a estos resultados en la zona.

La precipitación media anual (Figura 10) presenta una ligera tendencia positiva no significativa. Arriaga (2008) reportó una tendencia similar para la zona

en la precipitación extrema anual, de verano y de invierno, aunque a largo plazo, modelos globales pronostican una disminución en la precipitación entre 15% y 40% (Arriaga 2008) y un posible aumento en la ocurrencia de extremos en el transcurso de este siglo.

Al separar la serie de precipitación (Figura 11) se observan dos cambios que coinciden con los cambios de fase de la ODP reportados por la NOAA (Figura 26). El primero en 1976-77 hacia una fase positiva o cálida con un aumento en la precipitación y el segundo en 1998, hacia una fase negativa o fría con valores más bajos de precipitación.

En las Figuras 13 y 14, también se puede notar un aumento considerable en el número de eventos extremos por año de 1976/77 a 1997/98. Los años con mayor cantidad de eventos extremos son los inviernos de 1991/92 y 1997/98. En general los años de ENSO fuerte y moderado coinciden con un número mayor de eventos extremos.

El comportamiento de la precipitación media anual y de la frecuencia de eventos extremos en la zona de estudio, es acorde con los resultados obtenidos por Cavazos y Rivas (2004) y por Pavía y Graef (2002) en cuanto a la relación que guarda con eventos como ENSO y la ODP. Cabe notar que las investigaciones sobre la ODP tienen alrededor de una década, por lo que algunos investigadores señalan que tal vez forme parte de otros eventos como ENSO y que no se trate de una oscilación separada. Recientemente, Arriaga-Ramírez y Cavazos (2010) reportan que la tendencia positiva de extremos de lluvia en ese periodo, se atribuye principalmente a la variabilidad natural de la ODP.

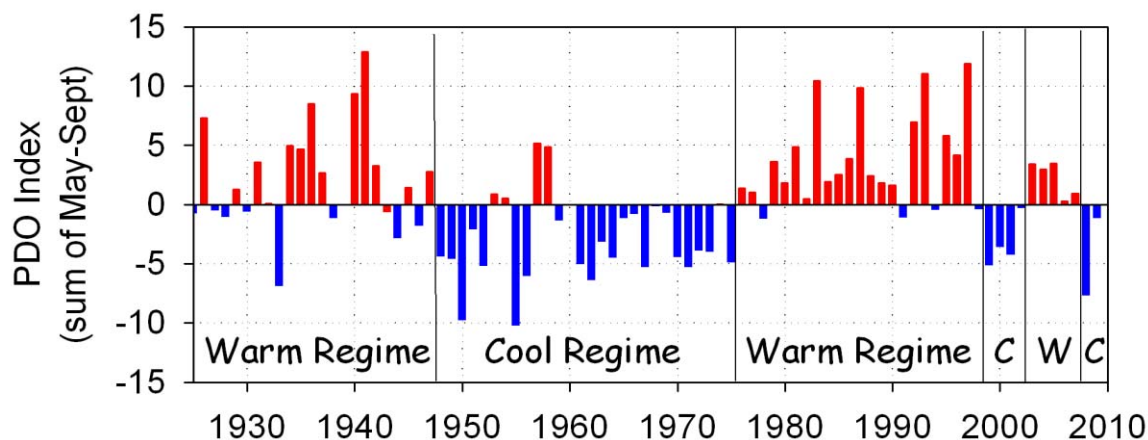


Figura 26. Series de tiempo en cambios de signo de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), de 1925 a 2009. Los valores están promediados de Mayo a Septiembre. Las barras rojas indican una fase positiva (cálida) y las azules la fase negativa (fria) de la ODP. (Tomada de NWFSC/NOAA, 2010)

En el análisis de temperaturas diarias máximas y mínimas se observa que las estaciones ubicadas en las zonas urbanas cercanas a la costa, Presa Rodríguez (#2038) y Presa Emilio López Zamora (#2072), presentan una temperatura más templada, tanto en invierno como en verano, comparándolas con las estaciones que se encuentran en los valles, a 20 y 40 km de la costa aproximadamente. Esta diferencia puede ser una consecuencia del efecto moderador del océano.

Tanto las temperaturas máximas anuales en verano como las mínimas anuales en invierno han aumentado en la cuenca Todos Santos (Figuras 16 y 17). Esto puede deberse a variaciones naturales del clima o al cambio climático, que resulta en parte del efecto de los cambios de uso de suelo; sin embargo, al comparar los cambios del área tanto urbana como agrícola con las dimensiones de la cuenca, se puede ver que éstos son mínimos y los cambios que han sufrido

solo podrían afectar el microclima. Tal es el caso de Ojos Negros, donde Ponce, et al (2000) reportaron un cambio en la evapotranspiración y por lo tanto en la humedad del ambiente, causada por el incremento en el uso de riego por aspersión. En este caso, el cambio de cobertura ha afectado el clima local, pero no por modificar el albedo, sino por aumentar drásticamente la transferencia de agua desde el sistema subterráneo al sistema superficial.

El incremento en las temperaturas máximas promueve la evaporación cuando la humedad relativa es baja, caso común en zonas áridas y semi-áridas como la región de estudio. El aumento en la evaporación resulta a su vez en la disminución del volumen de agua que se infiltra, afectando la disponibilidad para la cobertura vegetal y la recarga de acuíferos.

En la zona agrícola de Valle de Guadalupe, una de las actividades principales es la vitivinicultura. Los cambios y variaciones en la precipitación, temperatura máxima y mínima, su duración, y la ocurrencia de eventos extremos como lluvias intensas, ondas cálidas y heladas, son un factor importante para los cultivos, afectando el tiempo de maduración, formación de azúcares y tiempo de crecimiento de la uva. El tipo de vino que produce una región es el resultado de un clima determinado (Jones 2006). Algunos autores sugieren que la uva tiene un margen de tolerancia amplio a los cambios climáticos, y que la eficiencia de los cultivos, por ejemplo en California, se ha visto beneficiada con el aumento de la temperatura en los últimos años. Sin embargo, a largo plazo se prevee un desplazamiento del orden de kilómetros de las zonas aptas para el cultivo de la vid en todas las regiones vinícolas actuales (Jones, 2006).

Considerando los escenarios de cambio climático actuales, con temperaturas cada vez más altas, los agricultores en la cuenca Todos Santos se han adaptado o tendrán que adaptarse a estos cambios, sembrando otras variedades de los mismos cultivos, o productos con una mayor tolerancia a la falta de agua, alta salinidad y mayor temperatura, además de modificar prácticas de riego.

La vegetación local natural en cambio, puede verse mas afectada por la disponibilidad de agua que por los cambios de temperatura, ya que siendo una región semi-desértica, las plantas nativas tienen un margen de tolerancia a temperaturas extremas bastante amplio. En este caso, la disponibilidad del agua, a la que tienen acceso en época de lluvias y cuando las raíces llegan al nivel freático de los acuíferos, posiblemente las limitará más que un aumento en la temperatura.

Se puede decir por lo tanto que en el caso de la cuenca Todos Santos, el cambio en la temperatura máxima y mínima no tiene consecuencias directas o cuantificables sobre la disponibilidad del agua.

En el Capítulo I se explica que el abastecimiento de agua en la zona de estudio proviene exclusivamente de la extracción del recurso del subsuelo. Los acuíferos de la región tienen como única fuente de recarga la precipitación, por lo que se esperaría que la recarga se hubiera beneficiado con las precipitaciones del periodo de 1976 a 1998. Diversos estudios demuestran que si bien el nivel freático en los acuíferos de Guadalupe y Maneadero ha subido durante temporadas de lluvia o eventos extremos, el volúmen de recarga no ha logrado superar el volúmen de extracción (CNA, 2002), provocando el estado de sobreexplotación en el que se encuentran acualmente.

Los eventos extremos de precipitación pueden tener dos efectos en la recarga de los acuíferos. El primero es que al saturarse el suelo rápidamente, no permite la absorción e infiltración del agua a niveles más bajos, favoreciendo el escurrimiento y limitando la recarga. Otro efecto es que al erosionarse el suelo, que constituye una capa delgada en este caso, deja una mayor superficie de roca al descubierto, lo cual favorece la infiltración y por grietas y fracturas, aumentando la recarga. En la zona de estudio no existe ningún estudio sobre este proceso, por lo que no es posible decir qué tanto afectan los eventos extremos a la recarga de acuíferos.

Los cambios antropogénicos se pueden resumir en un aumento en la demanda urbana principalmente en la zona de Ensenada, en un factor de 17. La población ha tenido un crecimiento considerable y las proyecciones de organismos como la CNA e INEGI, tienen contemplada desde el año 2007 una aportación de agua por parte de la descarga del Río Colorado a través de un acueducto que hasta la fecha, no se ha construido, ocasionando mayor presión sobre el recurso ya limitado.

La actividad agrícola ha disminuido en términos de área cultivada, sobre todo en la última década, pasando de 178 km² de superficie sembrada con cultivos de riego en el año 2000 a 145 km² en el año 2007. Los cultivos de temporal han disminuido de 262 km² a 75 km², reflejando la baja precipitación que se ha presentado durante esos años. Esta información refleja el posible aumento de superficie agrícola abandonada, sobre todo en la zona de Maneadero, así como algunas áreas que han sido urbanizadas.

La disminución en área sembrada no demuestra necesariamente una disminución proporcional en la demanda de agua por parte de este sector, ya que como se puede observar en la Tabla XII, la disminución de los cultivos de temporal fue mayor (71 %) que en los de riego (18%); sin embargo, en la Tabla XIII se muestra que la extracción de agua ha aumentado para satisfacer la demanda urbana principalmente, pero la agrícola no ha disminuido.

Al comparar los cambios en todos los factores involucrados en la disponibilidad de agua en la zona de estudio, se puede ver que el factor que ha registrado un cambio más fuerte durante las últimas décadas es el aumento en la demanda urbana del recurso. La población ha aumentado en un factor de 17 en los últimos 50 años, mientras que la demanda agrícola no muestra cambios en la misma proporción durante este periodo de tiempo. No se puede decir con certeza si ha habido un cambio significativo en la demanda de agua por el sector agrícola, pero las áreas de cultivo en los valles se han mantenido relativamente estables, en

comparación con el aumento demográfico. Los factores naturales analizados en este trabajo no presentan cambios significativos que pudieran estar afectando la disponibilidad del recurso en la misma proporción que los de origen antropogénico.

Las superficies obtenidas a partir de las imágenes satelitales clasificadas, (Figuras 21 a 25) coinciden con los censos agrícolas en la disminución de las áreas de cultivo en la última década. Sin embargo, deben considerarse varios factores o limitaciones de esta tecnología al analizar dichos resultados:

Aunque se obtuvieron imágenes tomadas durante la misma época del año, (Mayo-Junio), existe actividad agrícola durante el verano y otoño que no se ve reflejada en éstas, a diferencia de los censos agrícolas. Las distintas condiciones del clima o suelo, no solo a nivel estacional, sino incluso diario, como la humedad del suelo, modifican la respuesta espectral, pudiendo obtener resultados distintos de un día para otro. La ocurrencia de nubes, sombras y distintas clases de cobertura pueden no ser discernibles espectralmente entre si.

En la Figura 22 y la Tabla XV se puede observar que la superficie con actividad agrícola para 1986 muestra un aumento considerable con respecto a 1975. Esto puede deberse a una mayor precipitación, relacionada a la fase positiva de la ODP, o bien a las limitaciones del sensor, mencionadas anteriormente.

La técnica de clasificación y etiquetado utilizada para este trabajo no proporcionó la calidad de resultados esperados y requiere de ajustes en cuanto a precisión. Sin embargo, proporciona un resultado visual más claro que tablas o gráficas, el cual además puede manejarse fácilmente en sistemas de información geográfica (SIG).

La introducción de nuevas variedades y especies es una de las medidas que se ha tomado para adaptar la actividad agrícola a la disponibilidad de agua en la zona, condiciones del suelo y variabilidad climática. Estas variedades requieren una menor cantidad de agua o toleran una mayor salinidad e incluso pueden ser

regadas con aguas tratadas, como es el caso de las flores en el Valle de Maneadero.

En la Figura 20 se puede ver que los 5 acuíferos que abastecen la zona de estudio se encuentran en estado de sobreexplotación y, de acuerdo con diversos autores, esta situación está presente desde hace 17 años o más en los distintos acuíferos y en la mayoría de los casos, no se han modificado las actividades que disponen del recurso agua.

VI. CONCLUSIONES

- ∄ La precipitación media anual no presenta ninguna tendencia significativa para el periodo analizado. Se observó una variabilidad de la precipitación acorde al comportamiento de la ODP, coincidiendo con otros autores.

- ∄ La frecuencia de eventos extremos de precipitación muestra un aumento acorde con las variaciones de la ODP. En este trabajo no se hicieron análisis de atribución al cambio climático, sin embargo, Arriaga-Ramírez y Cavazos, (2010) reportan que la tendencia positiva de extremos de lluvia en la región se atribuye principalmente a la variabilidad de la ODP.

- ∄ No está claro si el aumento en el número de eventos extremos de lluvia observado contribuye o no a la recarga de acuíferos. Estos eventos saturan el suelo rápidamente, favoreciendo el escurrimiento en vez de la infiltración. Por otro lado, también generan la erosión del suelo, dejando la roca desnuda, y esto podría favorecer la infiltración por las grietas que quedan al descubierto. Aún no hay estudios que cuantifiquen este proceso en la zona de estudio.

- € Las temperaturas máximas de verano y mínimas de invierno sí presentan una tendencia positiva significativa (1.3 y 1.25 °C en 50 años), lo cual es más probable que se deba al cambio climático, que a los cambios de cobertura de suelo, ya que éstos han sido mínimos en relación a las dimensiones de la cuenca.

- € Esta tendencia positiva en la temperatura puede promover la evaporación y evapotranspiración, disminuyendo la cantidad de agua que se puede infiltrar y recargar los acuíferos.

- € Las áreas con agricultura activa han disminuido en los principales valles de la región, aumentando la superficie de suelo desnudo.

- € La principal zona urbana, la ciudad de Ensenada, ha tenido un crecimiento que puede verse reflejado en el aumento de la demanda de agua, siendo este el factor que está afectando más la disponibilidad del recurso en la zona.

- € Considerando el aumento en la población, la disminución drástica de cultivos de temporal y el aumento de la precipitación durante la fase positiva de la ODP, se puede decir que los cambios antropogénicos en la demanda urbana de agua han sido los que han tenido un mayor impacto en la disponibilidad de agua para la región.

VI. REFERENCIAS

- € Arriaga-Ramírez, S. 2008. Tendencias observadas de extremos de precipitación en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos y proyecciones bajo condiciones de cambio climático. Tesis de Maestría. CICESE, B. C. 88 p.
- € Arriaga-Ramírez, S., T. Cavazos. 2008. Regional trends of daily precipitation indices in Northwest Mexico and the Southwest United States. *J. Geophys. Res.- Atmospheres*, doi:10.1029/2009JD013248. En prensa.
- € Badán, A., T. Kretschmar, I. Espejel, T. Cavazos, H. D'Acosta, P. Vargas, L. Mendoza, C. Leyva, G. Arámburo, W. Caessle, B. Ahumada. 2005. Hacia un plan de manejo del agua en Valle de Guadalupe, Baja California. *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias. Memorias del II Seminario Internacional de Vitivinicultura*. p 45-64.
- € Antuna-Ibarra, I., y T. Kretschmar. 2004. Desarrollo hidrogeológico con énfasis en la hidrogeoquímica del acuífero de la Misión, Ensenada, Baja California, México. XXXIII Congreso AIH,

Groundwater flow understanding, Zacatecas, México, del 11 al 15 de Octubre, 2004.

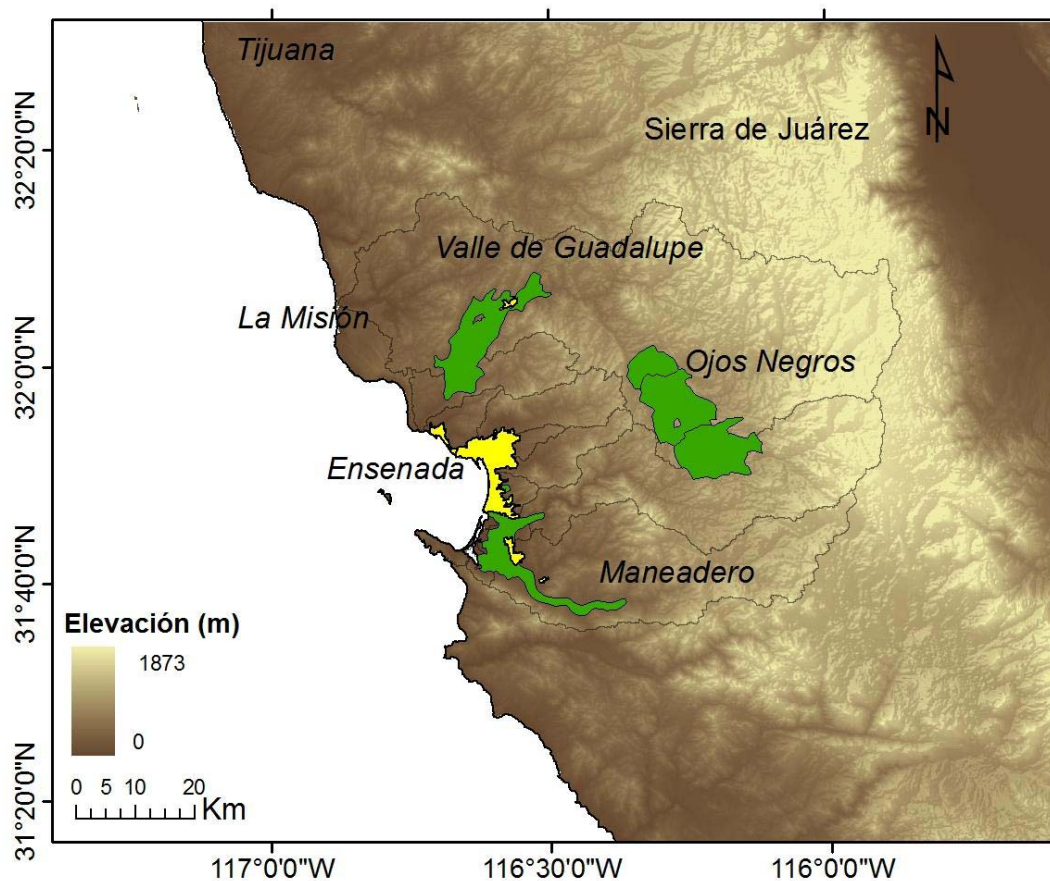
- € Campos-Gaytán, J.R. 1999. Caracterización de la precipitación en el norte de Baja California. Tesis de Maestría. CICESE, B.C. 151 p.
- € Cavazos T. y D. Rivas. 2004. Variability of extreme precipitation events in Tijuana, Mexico. *Climate Research*. 25:229-243.
- € Cavazos T., C. Turrent y D. P. Lettenmaier. 2008. Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon. *Geophys. Res. Letters*, Vol 35, L21703.
- € Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Ensenada, Estado de Baja California. Gerencia de Aguas Subterráneas, 18 p.
- € Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Guadalupe, Estado de Baja California. Gerencia de Aguas Subterráneas, 18 p.
- € Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero La Misión, Estado de Baja California. Gerencia de Aguas Subterráneas, 18 p.
- € Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Maneadero, Estado de Baja California. Gerencia de Aguas Subterráneas, 18 p.
- € Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Ojos Negros, Estado de Baja California. Gerencia de Aguas Subterráneas, 18 p.

- € Comisión Nacional del Agua. 2005. Situación de los recursos hídricos. Estadísticas del Agua en México 2005. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 276 p.
- € Comisión Nacional del Agua. 2003. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 106 p.
- € Comisión Nacional del Agua. 2007. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 257 p.
- € Comisión Nacional del Agua. 2008. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 233 p.
- € Comisión Nacional del Agua. 2010. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 257 p.
- € Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada, CESPE.
- € CGIAR Consortium for Spatial Information. <http://srtm.csi.cgiar.org/>, 2009.
- € Hinojosa A., 2001. Caracterización del paisaje en la vegetación y uso de suelo, y su cambio en las tres últimas décadas apoyados con imágenes LANDSAT MSS, en el Estado de Baja California, México. Informe Proyecto CONACyT 26661-B.
- € Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censos de Población y Vivienda 1995, 2000, 2005. www.inegi.org.mx. Marzo, 2008.

- € Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censos Agrícolas 1995, 2000, 2007. www.inegi.org.mx. Marzo, 2008.
- € Jones, G.V., 2006. Climate and Terroir: Impacts of climate variability and change on wine. In: Fine Wine and Terroir-The Geoscience Perspective. Macqueen, R.W., Meinert, L.D. Geoscience Canada Reprint Series, Number 9. Geological Association of Canada, St John's Newfoundland: 247p.
- € Jones, G.V., 2008. Cambio climático: observaciones, pronósticos e implicaciones generales en viticultura y producción vinícola. ACENOLOGIA-Revista de Enología científica y profesional. <http://www.acenologia.com/index.htm> Associació Catalana D'Enòlegs. No. 93, 2008. Enero, 2010.
- € Kurczyn-Robledo, A, Kretzschmar, T. Hinojosa, A. 2007, Evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe, B.C., México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24:1, 1-14.
- € Mo, K.C. y R.W. Higgins. 1998. Tropical convection and precipitation regimes in the western United States. J. Climate. 11:2404-2423.
- € Northwest Fisheries Science Center, NOAA Fisheries Service. <http://www.nwfsc.noaa.gov/research/divisions/fed/oeip/ca-pdo.cfm> Noviembre, 2009.
- € Pavía E. G. y A. Badan. 1998. ENSO modulation of rainfall in the Mediterranean Californias. Geophysical Research Lett. 25:3855-3858.
- € Pavía E. G. y F. Graef. 2002. The recent rainfall climatology of the Mediterranean Californias. J. Climate. 15:2697-2701.

- € Pavía, E. G., F. Graef y J. Reyes. 2006. PDO-ENSO effects in the climate of Mexico. *J. Climate*. 19:6433-6438.
- € Pavía, E. G., F. Graef y J. Reyes. 2008. Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*. 2008
- € Pitman, A. J., G.T. Narisma, R.A. Pielke Sr., N.J, Holbrook. 2004. Impact of land cover change on the climate of Southwest Western Australia. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 109, D18109. 12 p.
- € Ponce, V. W. Zúñiga, R. Venegas, T. Gaona, R. Onofre, J.I. Sepúlveda, G. Arámburo, S. Ercan, A. Pineda, H. López, A. Vipinchandra. 2000. Valle de Ojos Negros: Resumen Interdisciplinario. SDSU, Universidad Autónoma de Baja California e Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales, y Pecuarias. Junio, 42 p.
- € Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). <http://sagarpa.gob.mx/agricultura>. Octubre, 2009.
- € Sánchez-Rentería, E. C. 2004. Intrusión del agua de mar y la evolución hidrogeoquímica del acuífero costero de Maneadero, Baja California. Tesis. UABC, Ensenada, B.C. 69 p.

VII. ANEXO



Zona de estudio, principales valles agrícolas (en verde) y zona urbana de Ensenada (en amarillo) .