



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD Y USO DEL AGUA EN
LA SUBCUENCA PEROTE-LIBRES (PUEBLA-VERACRUZ):
FACTIBILIDAD DE UN MANEJO INTEGRAL DE LOS
RECURSOS

T E S I S

que para obtener el grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS
(Limnología)

p r e s e n t a

GUILLERMO SÁNCHEZ RODRÍGUEZ

Directora de tesis: DRA. ELVA G. ESCOBAR BRIONES

Comité tutorial: DRA. LUCÍA O. ALMEIDA LEÑERO (Presidente)

DRA. ELVA G. ESCOBAR BRIONES (Secretario)

DRA. PATRICIA MORENO CASASOLA BARCELÓ (Vocal)

DR. LUIS ZAMBRANO GONZÁLEZ (Suplente)

DR. OSCAR A. ESCOLERO FUENTES (Suplente)

M EN C. ALICIA V. AGUILAR SIERRA (Asesor externo)

México D.F., 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

- Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo institucional para la realización de este proyecto.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante los estudios de posgrado y por el financiamiento para la realización de trabajo de campo a través del proyecto “Demandas hidrológicas de los ecosistemas naturales en México: Fase 1, proyecto 49923”
- A la Dra. Elva G. Escobar Briones (ICMyL-UNAM) por su valioso apoyo durante la realización de este proyecto.
- Al comité tutor, integrado por la Dra. Lucía O. Almeida Leñero (Facultad de Ciencias-UNAM), la Dra. Patricia Moreno Casasola (INECOL-Xalapa), el Dr. Luis Zambrano González (IBIOL-UNAM), el Dr. Oscar A. Escolero Fuentes (IGEOL-UNAM) y la M en C. Verónica Aguilar Sierra (CONABIO) por sus valiosas aportaciones para la realización de esta tesis.
- Al Dr. Javier Alcocer Durand (FES Iztacala-UNAM) por sus valiosos comentarios, sugerencias y apoyo para la realización de este trabajo.
- A la Dra. Guadalupe Mares Cárdenas (FES Iztacala-UNAM) por su valiosa ayuda en el análisis de las entrevistas.
- Al Psic. Héctor Rocha Leyva (FES Iztacala-UNAM) por su valiosa ayuda en el trabajo de campo y la realización de las entrevistas.
- Al Ing. Forestal Demetrio Meza Rodríguez y el Dr. Luis Manuel Martínez Rivera (CUCSUR-U de G) por el apoyo en el manejo de GIS y la delimitación del polígono del área de estudio.
- Al Dr. Peter Gerritsen y la Lic. Marisa Gutiérrez (CUCSUR-UdeG) por la estructuración de las entrevistas que se utilizaron en este proyecto.
- Al Biól. Marco Antonio Jiménez (IBIOL-UNAM) por su ayuda en el manejo de software GIS.
- Al Servicio Meteorológico Nacional a través de Alejandro González Serratos, Jefe de Proyecto de Bases de Datos Climatológicos, por las facilidades para disponer de la información de las estaciones meteorológicas.

Aún recuerdas...

¿... cuando el camino delante de ti parecía largo y los obstáculos interminables?

Un día te encontraste muy cerca de aquella montaña que se veía tan lejos tiempo atrás. Comenzaste a escalar con alegría y esperanza. Pero también dudaste por momentos, y entonces las rocas que antes eran firmes se convirtieron en un fango muy difícil de superar... tropezaste y la desesperanza embargó tu corazón.

Pero dentro de ti encontraste la fuerza para seguir adelante. ¿Aún recuerdas el sentimiento de superación que en las mañanas te daba el ánimo para continuar? ... Afortunadamente, te aferraste a él, y no lo dejaste ir.

Hoy te das cuenta de que encontraste el sendero correcto para llegar a donde te habías propuesto. Y lo mejor de todo es que te sientes muy bien contigo mismo por el esfuerzo realizado.

Estás cansado, tu mirada lo dice todo, y nuevamente la incertidumbre comienza a tejer su oscura telaraña de sombra en tu corazón.

Pero... levanta la cabeza y mira el lejano horizonte. La luz del crepúsculo que se filtra por las montañas te indica el camino que debes seguir... esto nunca se detiene, y el único final lo pone la vida misma.

Ahora, como la araña que se niega a dejar de tejer, es momento de seguir adelante, mirar las estrellas y dar gracias por lo que la vida te ha permitido ver, escuchar, sentir... y soñar.

Con mucho cariño a aquellas personas que me dieron su apoyo durante este tiempo... A todos ustedes que me ayudaron y me siguen ayudando a recorrer este largo camino solo puedo decirles una cosa: ¡¡¡Gracias!!!

Guillermo

“...Esto sabemos: la tierra no pertenece al hombre, el hombre pertenece a la tierra. Todo va enlazado como la sangre que une a la familia. Todo lo que le ocurra a la tierra les ocurrirá a los hijos de la tierra. El hombre no tejó la trama de la vida; él solo es un hilo en el dibujo. Lo que hace con la trama se lo hace a sí mismo...”

Gran Jefe Seattle de las tribus aliadas de la sonda de Puget, 1854

“Hacer predicciones es muy difícil, especialmente sobre el futuro”

Niels Henrik David Bohr

CONTENIDO

Resumen	I
1) INTRODUCCIÓN	1
2) ANTECEDENTES	4
3) ÁREA DE ESTUDIO	
3.1) Cuenca Oriental	6
3.1.1) Descripción general	6
3.1.2) Formación de la cuenca Oriental	7
3.1.3) Hidrología superficial	8
3.1.4) Hidrología subterránea	8
3.2) Subcuenca Perote-Libres	10
3.2.1) Clima	10
3.2.2) Suelos	11
3.2.3) Aspectos socio-ambientales	15
4) JUSTIFICACIÓN	17
5) OBJETIVOS	
5.1) Objetivo general	19
5.2) Objetivos particulares	19
6) METODOLOGÍA	
6.1) Delimitación de la subcuenca Perote-Libres y acuíferos de la región	20
6.1.1) Obtención de la red de drenaje de la subcuenca Perote-Libres	20
6.2) Análisis climatológico de la subcuenca Perote-Libres	21
6.2.1) Polígonos de Thiessen	21
6.2.2) Climogramas	22
6.2.3) Balance hídrico	22
6.2.4) Análisis de la estación climatológica en el lago Alchichica	26
6.3) Determinación de la disponibilidad de agua en la subcuenca Perote-Libres	27
6.3.1) Volúmenes concesionados y usos	27
6.3.2) Censos y profundidad de pozos	27
6.3.3) Disponibilidad de agua per-cápita	28
6.3.4) Consumo de agua en cultivos	28
6.4) Diagnóstico socioambiental	28
6.4.1) Entrevistas a informantes clave	28
6.4.2) Análisis de conflictos y potencialidades	29

CONTENIDO

7) RESULTADOS

7.1) Modelo digital de elevación, delimitación de la red hidrológica superficial y localización de acuíferos	32
7.2) Red de drenaje	33
7.3) Localización de acuíferos	34
7.4) Balances hídricos	36
7.5) Variabilidad climática en la estación Alchichica (Laguna), DGE	47
7.5.1) Precipitación	47
7.5.2) Evaporación	47
7.5.3) Temperatura	48
7.5.4) Correlación entre las variables precipitación/temperatura/evaporación	48
7.6) Disponibilidad y uso del agua en la subcuenca Perote-Libres	50
7.6.1) Uso del agua en la subcuenca Perote-Libres	50
7.6.2) Consumo de agua en la subcuenca Perote-Libres	51
7.6.3) Disponibilidad de agua per-cápita	61
7.7) Diagnóstico socio-ambiental: Percepción de las autoridades con respecto a los usos, manejo, acceso al agua	63
7.7.1) Entrevistas	63
7.7.2) Conflictos y potencialidades	69

8) DISCUSIÓN

8.1) Patrón de drenaje y características ambientales	72
8.2) Análisis climatológico de la subcuenca Perote-Libres	76
8.3) Disponibilidad y uso de agua en la subcuenca Perote-Libres y visión por parte de las autoridades encargadas del manejo del recurso	82

9) CONCLUSIONES 91

10) RECOMENDACIONES 92

11) LITERATURA CITADA 93

ANEXOS

Anexo I: Tectónica de la cuenca Oriental:	102
Anexo II: Tabla de correlación estratigráfica de la cuenca Oriental y otras cuencas del eje neovolcánico transversal	103
Anexo III: Definición de los suelos de la subcuenca Perote-Libres:	104
Anexo IV: Detalles de la red hidrográfica de la subcuenca Perote-Libres	105
Anexo VA: Polígono del acuífero Libres-Oriental	106
Anexo VB: Polígono del acuífero Perote-Zalayeta	107
Anexo VI: Tablas de resultados de los balances hídricos	108
Anexo VII: Localización de granjas Carroll y los pozos concesionados	110
Anexo VIII: Decretos de protección ambiental en la subcuenca Perote-Libres	110
Anexo IX: Riego por aspersión y maquinaria de riego en el municipio de Libres	111
Anexo X: Resumen de los volúmenes concesionados en los municipios de la subcuenca Perote-Libres	112
Anexo XI: Encuesta aplicada a los informantes clave en el presente estudio	113

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Resumen de las variables obtenidos con el cálculo de los balances hídricos	38
Tabla 2. Análisis de correlación de las variables climáticas de la estación Alchichica	42
Tabla 3. Cultivos de riego en los municipios de la subcuenca Perote-Libres	58
Tabla 4. Resultados de las preguntas más relevantes de la entrevista	67
Tabla 5. Matriz de conflictos en la subcuenca Perote-Libres	70
Tabla 6. Matriz de potencialidades en la subcuenca Perote-Libres	71
Fig. 1. Hidrología superficial de la Cuenca Oriental y representación de las dos subcuencas que la conforman (el Seco-Oriental y Perote-Libres)	7
Fig. 2. Acuíferos en la cuenca Oriental	9
Fig. 3. Cuenca Oriental y subcuenca Perote-Libres: localización y principales accidentes geomorfológicos	13
Fig. 4. Caracterización ambiental de la subcuenca Perote-Libres	14
Fig. 5. Eventos históricos y ambientales en la subcuenca Perote-Libres	16
Fig. 6. Metodología del trabajo de investigación	31
Fig. 7. Modelo Digital de Elevación de la subcuenca Perote-Libres	32
Fig. 8. Red hidrográfica de la subcuenca Perote-Libres	35
Fig. 9. Polígonos de Thiessen para las estaciones meteorológicas de la región	36
Fig. 10. Balance hídrico: estación Alchichica (laguna), DGE	40
Fig. 11. Balance hídrico: estación San Luis Atexcac (DGE)	41
Fig. 12. Balance hídrico: estación Libres, Libres (DGE)	42
Fig. 13. Balance hídrico: estación Francisco I. Madero (DGE)	43
Fig. 14. Balance hídrico: estación Perote, Perote	44
Fig. 15. Balance hídrico: estación Zalayeta-Perote	45
Fig. 16. Balance hídrico: estación Oyameles, Tlatlauquitepec	46
Fig. 17. Distribución de las variables climáticas en la estación Alchichica	49
Fig. 18. División municipal de la subcuenca Perote-Libres	50
Fig. 19. Usos y volúmenes de agua en la subcuenca Perote-Libres	51
Fig. 20. Consumo de agua en los municipios de la subcuenca Perote-Libres	52
Fig. 21. Distribución de los volúmenes concesionados de agua en la subcuenca Perote-Libres	53
Fig. 22. Volumen promedio de extracción de los pozos de uso agrícola de la subcuenca Perote-Libres	55
Fig. 23. Distribución de las fuentes de agua en la subcuenca Perote-Libres	56
Fig. 24. Distribución de la densidad de pozos/km ² y extracción anual de agua/km ²	57
Fig. 25. Extensiones (has) de los cultivos bajo la modalidad de riego en la subcuenca Perote-Libres	59
Fig. 26. Volumen concesionado de agua de uso agrícola y dotación media anual de agua por hectárea según el municipio	59
Fig. 27. Áreas agrícolas de riego en la subcuenca Perote-Libres y consumo de agua	60
Fig. 28. Dotación <i>per-cápita</i> de agua en los municipios de la subcuenca Perote-Libres	61
Fig. 29. Población municipal y localidades según el número de habitantes y dotación <i>per-cápita</i> de agua en los municipios de la subcuenca Perote-Libres	62

RESUMEN

En México, el desarrollo poblacional se ha distribuido de forma que la mayor parte de las grandes urbes se ubican en sitios donde se presenta una menor reserva de agua. El 76% de la población mexicana, así como dos terceras partes de la industria manufacturera y tierras destinadas a la agricultura y ganadería se ubican en zonas donde el agua es más escasa. Esta problemática es particularmente grave en el centro del país, donde se ubican varios de los núcleos urbanos más importantes y donde los acuíferos son la principal fuente de abastecimiento de agua. Lo anterior ha ocasionado un progresivo aumento en el número de acuíferos sobreexplotados y en ocasiones, la desecación de ríos, lagos y lagunas que tienen conexión directa con las aguas subterráneas.

Un ejemplo de la problemática anterior ocurre en la cuenca Oriental (centro-oriente de la Meseta Central Mexicana en parte de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz) donde existe una marcada escasez de agua superficial debido a las condiciones semiáridas de la zona y la alta infiltración, producto de material de tipo cinerítico que conforma gran parte de esta cuenca. Por lo anterior, en esta región se lleva a cabo el uso intensivo de agua subterránea, lo cual ha llevado a la sobreexplotación del acuífero y problemas de abastecimiento en varias ciudades y comunidades de la zona.

En esta cuenca se localizan seis lagos-cráter (maars) también llamados “axalapascos”, los cuales se alimentan principalmente por agua subterránea. La creciente explotación del acuífero, así como la extracción directa de agua de los lagos, las altas tasas de evaporación y escasas precipitaciones de la región, aunado a la variabilidad climática presente en la zona ponen en riesgo la persistencia de estos lagos.

La cuenca Oriental se divide en dos llanos lacustres -San Andrés y San Juan- que también reciben el nombre de “subcuenca El Seco-Oriental” y “subcuenca Perote-Libres” respectivamente. En esta última se localizan cuatro de los seis axalapascos: Alchichica, La Preciosa, Quechulac y Atexcac.

Esta tesis muestra el panorama actual del recurso hídrico en la zona y los cambios en las condiciones climáticas de la región. Se pretende que sirva para proponer medidas que ayuden a tener un mejor aprovechamiento del agua en la subcuenca Perote-Libres, en vista de una futura explotación sustentable de los recursos naturales en la zona, para el bienestar tanto de los ecosistemas como de las poblaciones que en ella residen.

El presente trabajo tuvo como objetivo general:

- Determinar la disponibilidad y uso actual del agua en la subcuenca semiárida Perote-Libres (Puebla-Veracruz).

Los objetivos particulares fueron:

- Determinar la dinámica hidrológica del área de estudio a través de balances hídricos.
- Describir los usos del agua y volúmenes utilizados del recurso en los municipios de la subcuenca Perote-Libres.
- Identificar cambios en los patrones climáticos de la región que pueden estar afectando el recurso hídrico y los cuerpos acuáticos superficiales de la zona.
- Elaborar un diagnóstico socio-ambiental a través de la descripción de las percepciones de agua por parte de autoridades encargadas del manejo del recurso en la región.
- Determinar los factores tanto ambientales como sociales y productivos que afectan la disponibilidad de agua en el área de estudio.

Los estudios sobre las condiciones hidrológicas de esta zona se han enfocado en el recurso hídrico subterráneo, planteándose la posibilidad de extraer agua de esta cuenca para abastecer a las ciudades de Puebla y el Distrito Federal. Así mismo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha realizado los estudios de disponibilidad del recurso en los acuíferos Huamantla, Perote y Libres-Oriental reportando la sobreexplotación de este último.

Por otra parte, se ha mencionado el proceso continuo de deforestación de los bosques de la región, así como el incremento de las tierras agrícolas que acaparan cerca del 70% de la superficie de la cuenca Oriental. Lo anterior tiene un impacto directo en la recarga de los acuíferos de la zona. Así mismo, está creciendo la industria de extracción de materiales para la construcción como la grava y arena.

De la misma forma, se ha evaluado la presencia de indicadores de cambio climático en la cuenca Oriental analizando sedimentos de cráteres secos y del axalapasco Alchichica. Recientemente se encontró evidencia del efecto del fenómeno El Niño en la variabilidad climática de la región y como afecta a los axalapascos al disminuir la presencia de las lluvias en la región.

La subcuenca Perote-Libres fue delimitada a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) y utilizando el Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrológicas (SIATL) se generó un mosaico de imágenes de la red drenaje de la subcuenca Perote-Libres a escala 1:50 000.

Con la finalidad de evaluar la dinámica hidrológica de la región, se realizaron balances hídricos con los datos de siete estaciones climatológicas localizadas en la subcuenca del periodo de 1961-2003. Así mismo, se identificaron tendencias en las precipitaciones, temperatura y evaporación del periodo 1970-1999 en el área del lago Alchichica para evaluar el impacto de la variabilidad climática en los cuerpos acuáticos superficiales.

Para conocer los volúmenes concesionados de agua así como el uso que se le está dando al recurso, se utilizaron los datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de CONAGUA (al año 2010) para los pozos localizados en la subcuenca Perote-Libres.

De la misma forma, se realizaron diecinueve entrevistas a autoridades de la región (informantes clave) encargadas del manejo del recurso para conocer su visión con respecto al agua y los recursos naturales en general en la subcuenca Perote-Libres.

Los balances indican un déficit de agua en la región la mayor parte del año. Este se ve acentuado en los meses de Marzo, Abril y Mayo, cuando se presentan escasas precipitaciones y temperaturas altas que aumentan las tasas de evapotranspiración, indicando que es durante esta parte del año cuando el acuífero es más sensible a la extracción de agua para los diferentes usos.

Así mismo, se encontró evidencia de variabilidad climática en la región: periodos de lluvias abundantes alternados con periodos de sequías así como la tendencia a la disminución de las lluvias en los últimos 10 años, mismo patrón que se presenta con la evaporación. De la misma forma, existe una tendencia a incrementar la temperatura a lo largo del periodo de estudio. Lo anterior se relaciona con la presencia del fenómeno El Niño, el cual es más frecuente en los periodos con escasa precipitación y mayores tasas de evaporación.

Por otra parte, la agricultura es la actividad que acapara el mayor volumen de agua concesionado ($74.7 \text{ Mm}^3/\text{año} = 82\%$) mientras que el uso público-urbano es el segundo uso con mayores concesiones ($10 \text{ Mm}^3/\text{año} = 11\%$). El resto de las actividades productivas (industria, ganadería, mixto y cultivos) ocupan el 7% ($6.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$) del volumen utilizado. La mayor cantidad de pozos se localizan hacia el centro de la subcuenca, donde el acuífero es más somero, ya que se localiza de 1 a 4 m de profundidad.

En contraste con la alta disponibilidad de agua concesionada para la agricultura, la mayor parte de la subcuenca Perote-Libres es una zona de escasa disponibilidad de agua para uso público-urbano. El promedio de abastecimiento de agua para los habitantes de la región es de 164

L/hab/día, indicando que la dotación de agua en la subcuenca Perote-Libres se encuentra por debajo de la media nacional (270 L/hab/día).

Por otra parte, las autoridades consideran como adecuado el uso del agua en el sector agrícola, ya que esta actividad es el motor económico de los municipios. En contraste con lo anterior, en el sector público-urbano se considera un uso inadecuado del recurso debido a la falta de cultura del agua en sociedad y las pérdidas del recurso hídrico debido a las fugas constantes. Lo anterior, es debido a la antigüedad de las redes de distribución del agua y la falta de presupuesto para darles mantenimiento.

Los escenarios de cambio climático CCC (*Canadian Climate Center*) y GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) predicen un impacto de fuerte a muy fuerte en la sequía meteorológica de la región así como el aumento de la temperatura y una disminución en la humedad de la subcuenca Perote-Libres. Lo anterior acentuaría la problemática del agua y aceleraría el proceso de desecación de los axalapascos, debido a que ante escenarios de escases de lluvias, la agricultura de temporal se ve restringida y se genera el desarrollo de zonas agrícolas de riego con el consiguiente aumento en la extracción de agua subterránea.

Por otra parte, no debe dejar de considerarse que los axalapascos, al parecer, se encuentran bajo un proceso de desecación producto de las fluctuaciones climáticas a través del tiempo en la cuenca Oriental. Durante el Pleistoceno, las condiciones ambientales eran más frías y húmedas por lo cual se ha planteado la existencia de un gran lago que, debido al cambio en las condiciones climáticas de la región, fue desecándose y dejando aislados los lagos-cráter. Esto hace vulnerables a los cuerpos acuáticos superficiales si el uso de agua continúa a un ritmo no sostenido.

Así mismo, se identificó que la gestión del agua por parte de las asociaciones de usuarios ha sido deficiente. Los grandes productores son los que tienen prioridad al momento de que se generan las concesiones del recurso, lo cual ha llevado a un panorama de desigualdad social y económica en la subcuenca Perote-Libres. La mayor parte de las comunidades del área de estudio presentan un nivel de marginación alto. Anteriormente se ha señalado una estrecha relación entre pobreza y degradación de los recursos naturales, lo cual es inducido por la toma de decisiones equivocadas que favorecen la modernización de zonas agrícolas a gran escala dejando a un lado la eficiencia de la agricultura rural.

Ante el panorama descrito anteriormente, son varias las acciones prioritarias que se deben tomar en la región: las autoridades y los pobladores deben considerar que en la zona el recurso es

escaso y se encuentra bajo una presión en aumento. Como se mencionó anteriormente, la cuenca Oriental fue considerada como una fuente de agua para abastecer núcleos urbanos cercanos. Sin embargo, estos planes fueron cancelados debido al continuo abatimiento del acuífero. A pesar de lo anterior, la zona fue transformada en un área agrícola de gran importancia para el estado de Puebla. Lo anterior ha generado la tecnificación del sector agrícola con prácticas inadecuadas de riego para una zona árida; es común ver la maquinaria de riego por aspersión (pivote) trabajando a medio día, cuando la insolación es mayor y genera una pérdida importante de agua hacia la atmósfera. Por lo tanto, también debe considerarse una rotación paulatina hacia cultivos mejor adaptados a las condiciones climáticas de la zona. En los municipios con mayores extracciones de agua existen áreas de cultivos de haba, papa, alfalfa y brócoli que no son aptos para zonas con escasez de agua, ya que requieren grandes cantidades del recuso para ser productivos. El desarrollo de sistemas agroforestales que incluyen al nopal (*Opuntia spp.*), la palma datilera (*Phoenix dactylifera*) así como cultivos suculentos de *Aloe vera* y *Agave cocui* entre otros, se han considerado como soluciones viables ante los problemas de baja producción y degradación de las tierras áridas tropicales.

Finalmente, resalta la importancia de conservar mediante decretos de Área Natural Protegida (ANP) y sistemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) las partes altas de la cuenca. En estas zonas aún quedan bosques conservados donde la precipitación es mayor y se lleva a cabo la recarga del acuífero, durante la época de lluvias por infiltración directa y durante el periodo de estiaje por medio de percolación del agua y la humedad conservada en los suelos.

Así mismo, y considerando el propio interés de las autoridades locales y el desarrollo económico de las poblaciones de la región como una prioridad, se debe fomentar el ecoturismo en la zona teniendo como marco las riquezas naturales y culturales de la zona: el Cofre de Perote, los axalapascos y la zona arqueológica de Cantona. El ecoturismo fortalece la cultura de los habitantes del lugar y el respeto a la naturaleza, además de favorecer el desarrollo económico y la salud de los habitantes si estos son los que se encargan del diseño, manejo, mantenimiento y administración de estas áreas, por lo que se convierte en una estrategia de desarrollo rural.

1) INTRODUCCIÓN:

El agua es un recurso esencial para la vida y soporte del desarrollo económico y social de cualquier país (Baron *et al.* 2002). Es además, un elemento fundamental para los ecosistemas y base para la sustentabilidad ambiental (Jackson *et al.* 2001).

Las fuentes de agua dulce a nivel mundial se encuentran actualmente bajo una presión en aumento (Bithas, 2008). El crecimiento poblacional, el aumento de las actividades económicas y el incremento de los estándares de calidad de vida han llevado a que se acentúe la competencia y conflictos por el suministro del recurso hídrico (GWP, 2000). La disponibilidad del líquido, ante su demanda creciente, se ha convertido en un problema que para muchos países se ha tornado fuera de control, ocasionando escasez del recurso y deficiencias en cuanto al manejo del mismo (Alcalá, 2004).

En el estado actual de rápida urbanización de los países en desarrollo, el consumo excesivo en los países desarrollados y las tensiones políticas globales, la disponibilidad de agua dulce se prevé que sea uno de los principales factores limitantes para el desarrollo futuro de las poblaciones humanas (Alfarra, 2004). En 2009, (según la FAO, UNICEF y el Programa Conjunto de Monitoreo del Agua y Saneamiento OMS/UNICEF), 894 millones de personas en el mundo no tenían acceso a agua segura y 2.5 mil millones no contaban con saneamiento (INEGI, 2007).

Las actividades agrícolas utilizan el 70% del agua que es consumida por la actividad humana (Postel, 1998) y su crecimiento constante es la principal responsable de la pérdida de ecosistemas naturales en el planeta (Bennett, 2000). El segundo gran consumidor del recurso hídrico es la industria (22%), responsable de la mayor parte de la contaminación de ríos y lagos, mientras que solo el 8% del agua en el mundo se destina al uso doméstico (Agua, 2010).

México enfrenta problemas complejos para satisfacer los requerimientos de agua debido las condiciones climáticas, su ubicación geográfica y sus características económicas, sociales y demográficas (Ruiz, 2007). El territorio nacional recibe anualmente alrededor de 1,511 millones de m³ de agua en forma de precipitación, 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, 25.4% escurre por los ríos y arroyos y 2.1% se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos (Agua, 2010). En 2007 el país tenía una disponibilidad natural media de 458,000 millones de m³ de agua dulce renovable, también denominada disponibilidad natural media (CONAGUA, 2010a).

Sin embargo, la distribución de la lluvia no es homogénea tanto física como estacionalmente (Carabias y Landa, 2005). La región norte de México, que ocupa el 50% del área total del territorio (CONAGUA, 2010a) recibe el 25% del agua de lluvia, mientras que en el sureste se recibe casi el 50% del volumen total de agua producto de las precipitaciones. El 25% restante ocurre en la porción central del territorio nacional (INEGI, 2010a).

Por otra parte, el desarrollo poblacional del país se ha distribuido de forma que la mayor parte de las grandes urbes se ubican en sitios donde se presenta una menor reserva de agua (Mejía y Sandoval, 2004). En el caso de México, el 76% de la población así como las dos terceras partes de la industria manufacturera y las tierras destinadas a la agricultura y ganadería se ubican en zonas donde el agua es más escasa (GEO-México, 2004). Entre 1950 y 1995 se dio un proceso de urbanización continuo, acelerado y centralizador. En este periodo las principales zonas metropolitanas del país tuvieron altas tasas de crecimiento poblacional (Flores, 2002) que generaron los problemas actuales de abasto del recurso (Izazola, 2001).

La problemática de escasez del recurso es particularmente grave en el centro del país donde se localizan varios de los núcleos urbanos más importantes (Ciudad de México, Toluca, Puebla, Pachuca, Querétaro, Irapuato entre otros), los cuales presentan serios problemas de abastecimiento de agua (Mejía y Sandoval, 2004; Sandoval, 2006). En esta región la explotación del agua subterránea se ha dado de manera más intensa, debido a que el agua superficial está plenamente comprometida (Ruiz, 2004). Lo anterior genera que en los acuíferos se sustente el abastecimiento de agua para estas ciudades (Carrera y Gaskin, 2009).

La sobreexplotación de los acuíferos es un problema grave que ha ido en aumento: en 1975 había 32 acuíferos en esta condición; en 1981 eran 36, para 1985 el número ascendió a 80 y 130 en el año 2000 (Escolero, 2006). En 2007 se registraron 101 acuíferos en condiciones de sobreexplotación, de tal manera que esta reserva de agua disminuye 6 km³/año. (INEGI, 2009). Entre los problemas que se generan por esta sobreexplotación, se encuentra la disminución de las reservas de agua subterránea, problemas asociados al hundimiento del subsuelo y fracturas que generan grietas que dañan las edificaciones (Alcocer *et al.* 2004).

Debe mencionarse que existe una estrecha relación entre las aguas superficiales y subterráneas; al alterarse el comportamiento natural de una de ellas, se cambia necesariamente el del otro. Como ejemplos en México se pueden mencionar la desecación de lagunas y desaparición de manantiales en el nacimiento del río Lerma en los valles de Ixtlahuaca y Toluca por sobreexplotación del acuífero. La misma situación se presenta en la región lagunera de Torreón y el valle de Oriental en Puebla (Cruickshank, 1992). Esta conexión es particularmente

importante en las zonas áridas, donde el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento para consumo humano e irrigación (Jackson *et al.* 2001) y donde la sobreexplotación del recurso puede llevar a la desecación de manantiales, lagos y lagunas (Alemayehu *et al.* 2007). Lo anterior ha provocado que en México la mayoría de los cuerpos acuáticos superficiales se encuentren en un estado avanzado de desecación o senescencia (Escolero y Alcocer, 2004), con sus áreas superficiales y volúmenes reducidos, en ocasiones como consecuencia de la sobreexplotación de aguas subterráneas (Alcocer *et al.* 1998).

Este panorama general se manifiesta también en la cuenca Oriental, la cual se ubica en la porción centro-oriental de la Meseta Central Mexicana y comprende parte de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. En esta zona existe una marcada escasez de agua superficial debido, por un lado, a las condiciones semiáridas de la zona (Alcocer *et al.* 2004) y por otro, a que la mayor parte de la superficie se encuentra formada por material de tipo cinerítico de edad reciente en el que la mayor parte del agua se infiltra debido a su carácter altamente permeable (Gasca, 1981). Por lo anterior, en esta cuenca se lleva a cabo el uso intensivo de agua subterránea, lo cual ha llevado a la sobreexplotación del acuífero (Diario Oficial de la Federación, 2009a) provocado problemas de abastecimiento en ciudades como Perote (García, 2011) y Guadalupe Victoria (Gálvez, 2008).

En la cuenca Oriental se localizan seis lagos-cráter (maars) también llamados “axalapascos” (náhuatl que significa “vasijas de arena con agua”) alimentados principalmente por las aguas subterráneas de la región (Alcocer *et al.* 2004). La creciente explotación del acuífero (Alcocer y Escobar, 1990; Alcocer *et al.* 1998; Alcocer *et al.* 2004), así como la extracción directa de agua de los lagos (Lugo *et al.* 1994), las altas tasas de evaporación y escasas precipitaciones de la región (Arellano y Romero, 2005) aunado a la variabilidad climática presente en la zona (García, 2010) ponen en riesgo la persistencia de estos lagos (Alcocer y Escobar, 1990). En la mayoría de estos cuerpos de agua se ha observado un proceso de desecación (Alcocer *et al.* 1998), el cual ha llevado a un descenso de 4.5 m en el nivel del agua de algunos de ellos en los últimos 30 años (Alcalá, 2004).

Los axalapascos tiene una gran importancia tanto ecológica como social: son sitio de anidación, alimentación y refugio para una gran variedad de aves acuáticas, tanto migratorias como residentes (patos, garzas, etc), algunas de las cuales constituyen un recurso alimenticio y cinegético para los habitantes del área. Por otra parte, los habitantes de la región reciben una amplia variedad de recursos y usos de estos lagos: la vegetación acuática litoral (tules y carrizos) se emplea para la elaboración de artículos domésticos y los lagos son utilizados comúnmente como abrevaderos para el ganado caprino y ovino (Lugo *et al.* 1994).

2) ANTECEDENTES:

Los axalapascos se ubican entre los lagos más profundos de México alcanzando de 39 a 64 m de profundidad (Arredondo *et al.* 1983). El lago-cráter Alchichica es el mayor cuerpo de agua salina interior en el país (Alcocer y Escobar, 1990), teniendo un volumen de 94.2 millones de m³ y una profundidad promedio de 40.9 m (Filonov *et al.* 2006).

Existen diversos trabajos que describen la morfología de estos lagos (Ordoñez 1905 y 1906 *en* Gasca 1981; Arredondo *et al.* 1983) así como el origen de los mismos (Gasca, 1981) por medio de explosiones freatomagmáticas (Carrasco *et al.* 2007).

El origen y la geología de la cuenca Oriental han sido ampliamente documentados (Reyes, 1979; Gasca, 1981 y Moya, 1987), así como las condiciones hidrológicas de esta zona, enfocándose los estudios en el recurso hídrico subterráneo (Morales, 1990; Cisneros 1991). De la misma forma, la conexión entre los lagos y el acuífero de la región ha sido evaluada con anterioridad (Meneses, 2002 y Alcalá, 2004).

Por otra parte, se ha valorado la posibilidad de la explotación de agua de la cuenca Oriental hacia centros urbanos adyacentes como Puebla y el Distrito Federal (Knoblich, 1971; 1973a,b; 1978; Ortiz y Ortiz, 1986; Carrera y Gaskin, 2009). Así mismo, se ha estudiado el funcionamiento del acuífero y el balance de las aguas subterráneas de la zona (Cruickshank, 1992). CONAGUA realizó en 2002 la evaluación de disponibilidad de los acuíferos Libres-Oriental (CONAGUA, 2002a) Perote-Zalayeta (CONAGUA, 2002b) y Huamantla (CONAGUA, 2002c).

Los estudios sobre la vegetación de la región se han centrado en las montañas que delimitan a la cuenca Oriental: La Malinche (Ern, 1972; Villers, 2006) el Cofre de Perote (Ortega, 1981; Delgadillo, 1984; Narave, 1985) y el Pico de Orizaba (Martínez, 1988; Ávila *et al.* 1994). Menos abundantes son los estudios florísticos de las partes bajas de la cuenca (Cházaro, 1992; Díaz y Plascencia, 1997).

Los estudios faunísticos se han enfocado principalmente a los peces que se encuentran en los axalapascos (De Buen, 1945; Hurtado, 1982; Arce, 2006 y Alcocer *et al.* 2010). En estos lagos-cráter se han reportado tres especies endémicas de peces aterínidos: *Poblana alchichica*, *P. alchichica squamata* y *P. letholepsis*, así como la salamandra *Ambystoma taylorii* (Alcocer y Escobar, 1990) y el isópodo *Caecidotea williamsi* (Escobar y Alcocer, 2002).

La especiación de los aterínidos de los axalapascos de la cuenca Oriental se ha tratado de explicar como resultado de la desecación de un antiguo lago plio-pleistocénico que cubría totalmente a estos cráteres (Álvarez, 1950). A través del tiempo, este cuerpo lacustre sufrió el descenso en el nivel de sus aguas, determinando que los axalapascos inundados fueran quedando aislados dependiendo de la altitud de sus bordes (Arellano y Romero, 2005). Sin embargo, la evidencia paleogeográfica, sedimentológica, geomorfológica y climática de la región, no indica la presencia en la región un lago de semejantes dimensiones (Gasca, 1981).

Con respecto al uso de los recursos naturales en la zona, se ha reportado el proceso continuo de deforestación en la Malinche (Werner, 1976; Juárez, 1992) y el Cofre de Perote (García *et al.* 2010). Así mismo, se ha documentado el proceso histórico de cambio de uso de suelo y explotación forestal en el valle de Perote (Geréz, 1982) y se han llevado a cabo publicaciones que compilan estudios ambientales realizados en el Cofre de Perote (Golberg, 1983). Más recientemente se realizó el diagnóstico ambiental de la subcuenca Perote-Libres, documentando la degradación de los recursos naturales que ocurre en esta zona (Arellano y Romero, 2005).

Por otra parte, se ha reportado el riesgo de desecación que amenaza a los axalapascos debido a la sobreexplotación del acuífero que los alimenta, (Alcocer y Escobar; 1990; Alcocer *et al.* 1998) y se ha documentando la problemática multifactorial del agua en la región (Alcocer *et al.* 2004).

Así mismo, se ha evaluado la presencia de indicadores de cambio climático en la zona analizando sedimentos de cráteres secos (Ohngemach, 1973) y del lago Alchichica (Caballero *et al.* 2003). Recientemente se encontró evidencia del efecto del fenómeno de El Niño en la variabilidad climática de la zona y como afecta a los axalapascos al disminuir la presencia de las lluvias en la región (García, 2010).

Desde el punto de vista social, se ha documentado el proceso de colonización del valle de Perote (Geréz, 1983; Meehan, 2010) y se ha descrito la función de la participación social en el manejo del agua en la zona (Marañón. 2002). Así mismo, se ha mencionado el impacto de la empresa productora de carne de cerdo “Granjas Carroll” en el ambiente y las poblaciones que habitan el valle de Perote (Ponette y Fry, 2009).

3) ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Cuenca Oriental

3.1.1) Descripción general:

Oriental ($18^{\circ} 57' - 19^{\circ} 44' \text{N}$, $97^{\circ} 10' - 98^{\circ} 05' \text{O}$) es una cuenca endorreica, (Lugo *et al.* 1994) con forma de pentágono irregular (Reyes, 1979). Se localiza en la porción centro oriental de la Meseta Central Mexicana (Gasca, 1981) y comprende parte de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Forma parte de la provincia Lagos y Volcanes del Anáhuac, que a su vez se encuentra incluida en el Eje Neovolcánico Transversal (Reyes, 1979). INEGI la reconoce con el nombre de subcuenca de la Laguna de Totolcingo, perteneciente a la cuenca del río Atoyac, dentro de la Región Hidrológica núm. 18 del río Balsas (Alcocer *et al.*, 2004). CONABIO (1998) la denomina subcuenca Huamantla-San Diego Tepexmelucan (Fig. 1).

Tiene una superficie total de $4,981 \text{ km}^2$, presentando 70 km en su eje de mayor extensión (Alcocer *et al.* 2004). El 80% de su superficie se encuentra por debajo de los 2,700 m s.n.m y el resto (20%) fluctúa entre 2,700 y 5,610 m s.n.m, perteneciendo esta altitud máxima a la elevación más importante del territorio nacional: el Pico de Orizaba ó Citlatépetl (Reyes, 1979). Otras alturas considerables que definen a la cuenca Oriental son el volcán la Malinche (4,461 m) y el Cofre de Perote (4,128 m) (Moya, 1987). El centro de la cuenca se encuentra a una altitud media de 2,334 m s.n.m y corresponde a la laguna de Totolcingo. El punto más bajo (2,312 m s.n.m) se localiza en la zona de embalses intermitentes ubicados en Tepeyahualco, en las faldas del cerro Pizarro (Gasca, 1981).

El parteaguas noroeste se construye con la sierra de Tlaxco, formada por tobas y cenizas volcánicas. En la zona occidental se levanta la estructura cónica de lava y cenizas volcánicas que forman la Malinche con sus pequeños conos adventicios. La parte sur está ocupada por la sierra de Soltepec, con una dirección NO-SE formada por calizas cretácicas. Por último, la cuenca se cierra al oriente por un sistema de estructuras y derrames andesíticos, traquíticos y riolíticos que forman la sierra del Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Esta formación se inicia al sur con la sierra Negra y el Pico de Orizaba; continúa hacia el norte por un cordón de 3,300 m s.n.m formado por riolitas y traquiandesitas hasta culminar al norte en el Cofre de Perote (Reyes, 1979).

Las poblaciones más importantes de la cuenca Oriental son Perote al noreste, Cd. Serdán al sur, Huamantla al oeste y los poblados de Libres y Oriental en el centro de la cuenca (Moya, 1987).

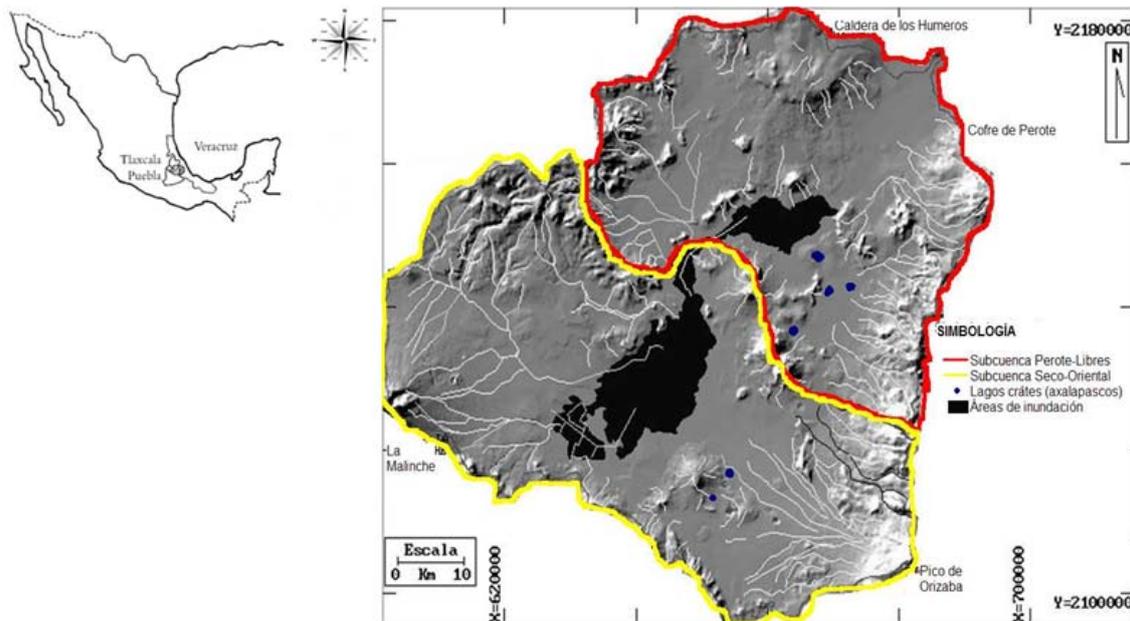


Fig. 1. Hidrología superficial de la Cuenca Oriental y representación de las subcuencas que la conforman (el Seco-Oriental y Perote-Libres) (Modificado de Alcocer *et al.*, 2004)

3.1.2) Formación de la cuenca Oriental:

Durante los periodos Jurásico y Cretácico (Mesozoico) la región estuvo sumergida en el mar, propiciando un largo periodo de sedimentación en distintos ambientes marinos. Posteriormente, antes de comenzar el Cenozoico se llevó a cabo el levantamiento que hizo emerger a las rocas sedimentaria marinas, provocando además, sistemas de fallas y estructuras originalmente con una dirección ONO-ESE y finalmente de forma más débil NO-SE. Sobre este último también se han reconocido lineamientos E-O y N-S (Moya, 1987) (*ver Anexos I y II*).

Durante la misma época se produjeron fuertes plegamientos con ejes NO-SE, llegando a formar un anticlinorio donde actualmente pueden observarse las direcciones de los ejes de plegamiento sobre algunas sierras de la cuenca (Reyes, 1979).

Hacia el periodo Terciario tardío se desarrolló una etapa de vulcanismo asociada a los lineamientos NO-SE donde se llevó a cabo el relleno de materiales volcánicos sobre lo que fue un relieve persistente en la cuenca. Así mismo, se originaron los basamentos de las estructuras volcánicas del Pico de Orizaba, Cofre de Perote, la sierra de Huamantla (bloque Tlaxco), la Malinche y la sierra Citlaltépetl, así como algunos sistemas menores como son los de San Salvador el Seco, las Derrumbadas y la caldera de los Humeros (Moya, 1987). El origen de la estructura Pico de Orizaba-Cofre de Perote se ha establecido a partir de un lineamiento regional N-S (Demant, 1978). Casi todas estas estructuras fueron de composición eminentemente andesítica y en menor grado basáltica (Moya, 1987).

Durante el periodo Cuaternario predominó el vulcanismo ácido, el cual originó un número importante de cuerpos cineríticos que permitieron aumentar el espesor de los materiales volcánicos sobre la cuenca, ocultando la mayor parte de las rocas pre-cuaternarias (Gasca, 1981). Sin embargo, aún durante el mismo periodo cuaternario se desarrollaron domos asociados a fracturas profundas NO-SE que dieron origen a las Derrumbadas y al Cerro Pinto como las más importantes (Reyes, 1987).

Durante el Pleistoceno ocurrió la formación de los lagos-cráter de la cuenca Oriental al interactuar el agua subterránea y el magma (Arredondo, 2002). Esta combinación provocó un choque térmico que generó explosiones freatomagmáticas violentas (Alcalá, 2004). La edad de los lagos se ha calculado entre 20,000 y 30,000 años (Moya, 1987).

3.1.3) Hidrología superficial:

En la cuenca Oriental se localizan dos lagunas temporales en el centro de la misma denominadas el Carmen (Totolcingo) y el Salado (Tepeyahualco). Estas lagunas cubren una superficie aproximada de 290 km² (Alcocer *et al.*, 2004). Se forman por el afloramiento de agua subterránea en época de lluvias (Cruickshank, 1992) y por la acumulación del agua pluvial debido a la presencia de una capa arcillosa impermeable (Reyes, 1979). El fondo de las lagunas se encuentra por debajo del nivel medio del manto freático por lo que su profundidad varía de acuerdo a la fluctuación del nivel de las aguas subterráneas (Knoblich, 1978).

Existen manantiales en las partes altas de los tres volcanes que rodean la cuenca (Arredondo, 2002), en el Cerro San Gabriel (Alcocer *et al.* 2004) así como en el Carmen, cerca de la estación los Manantiales y de Ciudad Serdán (Reyes, 1979). Así mismo, en la ciudad de Libres existe un manantial de aguas termales (Maderey, 1967).

En la planicie central de la cuenca se localizan los seis lagos-cráter que caracterizan a la región: Alchichica, Aljojuca, Atexcac, la Preciosa, Quechulac y Tecuitlapa (Lugo *et al.* 1994).

3.1.4) Hidrología subterránea:

El sistema hidrológico subterráneo de la cuenca Oriental está mejor desarrollado que el superficial debido a que la mayor parte de los escurrimientos pluviales se infiltran hacia el subsuelo, formándose un manto acuífero extenso que constituye un recurso de abastecimiento hídrico muy valioso (Alcocer *et al.* 2004). En esta región se localizan tres acuíferos: Libres-Oriental, Perote-Zalayeta y Huamantla (CONAGUA, 2002a, b, c) (Fig.2).

La unidad geohidrológica más importante de la cuenca es el acuífero Libres-Oriental el cual tiene una extensión superficial de 3,500 km² (CONAGUA, 2002a). Colinda con la sierra de Tlaxco y la caldera de los Humeros al norte, con la sierra del Citlaltépetl al oriente, con el volcán de La Malinche al poniente y la sierra de Soltepec al sur (CONABIO, 1998).

Al oeste, en la demarcación de los estados de Puebla y Tlaxcala, se encuentra el límite entre el acuífero Libres-Oriental y el de Huamantla (CONAGUA, 2002a, c). Este último cuenta con una extensión de 970 km² (CONAGUA, 2002c).

Hacia el este, en la demarcación de los estados de Puebla y Veracruz, se encuentra el límite entre el acuífero Libres-Oriental y el de Perote-Zalayeta (CONAGUA, 2002a, b). Este último cuenta con una extensión de 915 km² (CONAGUA, 2002b).

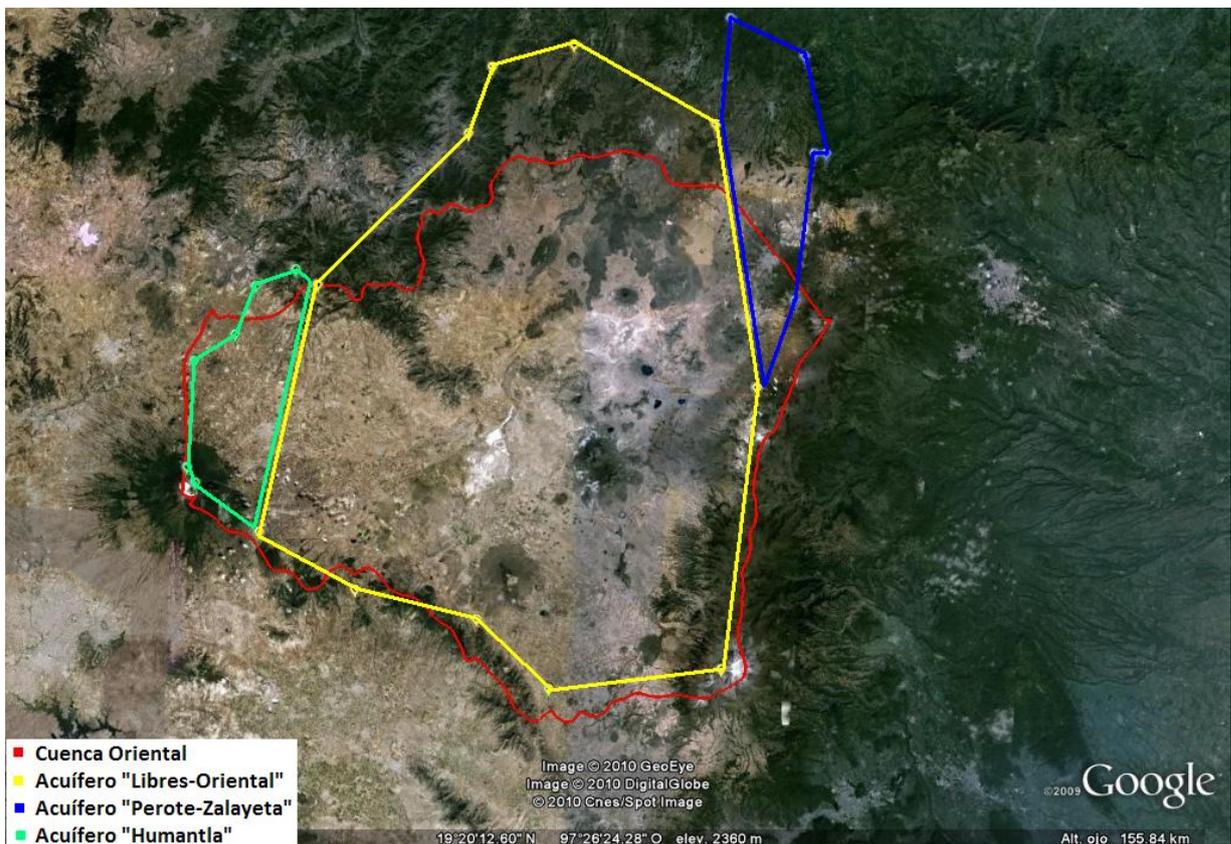


Fig. 2. Acuíferos en la cuenca Oriental (Google Earth, 2010: Lat: 19.360022'. Long: -97.613716'. Elev: 2360 m. Alt. Ojo: 155.84 km)

3.2 Subcuenca Perote-Libres

La cuenca Oriental se divide en dos llanos lacustres -San Andrés (subcuenca El Seco-Oriental) y San Juan (subcuenca Perote-Libres) (Knoblich, 1971).

La subcuenca Perote-Libres abarca aproximadamente la mitad de área de la cuenca Oriental (Arellano y Romero, 2005). La altitud máxima se localiza en la cima del Cofre de Perote (4200 m s.n.m) y la mínima corresponde a la extensa planicie central de la cuenca donde se localiza la laguna el Salado y cuatro axalapascos (Alchichica, La Preciosa, Quechulac y Atexcac). La altitud de esta planicie oscila entre los 2200 a 2400 m s.n.m, presentando un relieve de 2000 m (Alcocer *et al.* 2004) (Fig. 3).

En el extremo norte de la subcuenca se localiza el centro geotérmico de los Humeros, a una altitud de 2800 m s.n.m, misma altitud que se localiza en la sierra montañosa que delimita la cuenca en el límite este de la misma (sierra de Quimixtlán) (Reyes, 1979) (Fig. 7F).

La vegetación de la zona está constituida por bosques de pino, ciprés y encino, sabinales, izotal, matorral rosetófilo, nopaleras, pastizales halófitos y zacatonal alpino entre otros (Geréz, 1982).

La fauna está representada por 3 especies de peces del género *Poblana* endémicos de los axalapascos Alchichica, Quechulac y la Preciosa (Álvarez, 1950). Así mismo, se encuentran 16 especies de anfibios, 32 de reptiles, 104 de aves y 60 de mamíferos (Arellano y Romero, 2005).

3.2.1) *Clima:*

El clima predominante en el centro de la subcuenca es semiseco con lluvias en verano y escasas a lo largo del año (BS0kw y BS1kw). Presenta una temperatura media anual de 12.8 °C y una precipitación de 372.1 mm en la zona más seca y 519.1 mm en la más húmeda (Arellano y Romero, 2005).

Bordeando el clima semiseco se localiza un cinturón de clima templado subhúmedo (CW0) que abarca el límite norte de la subcuenca, donde comienza la transición hacia la sierra norte de Puebla (Fig. 8A).

En la zona este-sur se encuentra el corredor Cofre de Perote-Pico de Orizaba (Sierra de Quimixtlán) caracterizado por climas semifríos (C(w1), C(w0) y Cb(w1)). En los valles del Cofre de Perote domina el clima semifrío, subhúmedo con verano fresco, largo (Cb(w0) y una temperatura media anual entre 5 y 12°C. En la cima del Cofre de Perote se encuentra el clima más fresco de la región; semifrío húmedo con un verano fresco largo (Cb(w2)), y una temperatura media anual entre 5 y 12°C (Figs. 4A y 4B) (García y CONABIO, 1998a).

Debido a su régimen de precipitación, la subcuenca de Perote-Libres presenta un clima seco al centro de la misma y templado subhúmedo en las zonas de montaña que la rodean. La precipitación total anual oscila de 200 a 1200 mm/año y responde a los cambios de altitud en la región. Las menores tasas de precipitación se localizan al centro de la subcuenca, donde se tienen intervalos de precipitación de apenas 200 a 400 mm/año y que corresponden a la zona de climas secos (García y CONABIO, 1998c) (Fig. 4C).

Rodeando las zonas de escasa precipitación se encuentran zonas más húmedas donde las precipitaciones oscilan de los 400 a 600 mm/año. Corresponde en el este de la subcuenca al clima seco y al cinturón de zona templada subhúmeda donde comienza la transición de la planicie central hacia las serranías y montañas que delimitan a la subcuenca Perote-Libres. Este intervalo de precipitación es el que se encuentra representado en todo el límite norte de la región.

En las zonas montañosas que rodean la subcuenca tanto al este como al oeste (sierra de Libres y el Cofre de Perote), las precipitaciones se hacen más abundantes, con oscilaciones de los 600 a 1200 mm/año indicando la presencia de clima templado subhúmedo (Fig. 4C).

Las tasas de evaporación en la región son altas, considerando las tasas de precipitación ya descritas. Los intervalos de esta variable oscilan de 400 a 700 mm/año (Maderey, 1990). El intervalo más representado oscila de los 500 a 600 mm/año, tasa de evaporación que se localiza en la zona centro-este y en el límite montañoso al oeste de la subcuenca. Una parte de la isolínea de este intervalo converge con la zona de menor precipitación (200 a 300 mm/año), indicando una tasa de evapotranspiración que duplica la precipitación (Fig. 8D). Así mismo, se presenta una franja en la zona centro-oeste con la menor tasa de evaporación que es de 400 a 500 mm/año, donde se encuentran intervalos de precipitación que oscilan de los 200 a 600 mm/año, indicando la presencia de vastas zonas donde las tasas de evaporación son mayores a las de precipitación (Fig. 4D).

Las mayores tasas de evaporación oscilan de 600 a 700 mm/año en el Cofre de Perote, donde también se encuentran las isoyetas con mayores precipitaciones en la subcuenca (500 a 1200 mm/año), siendo esta región donde las precipitaciones superan la evapotranspiración (Fig. 4D).

3.2.2) Suelos (ver ANEXO III para descripción):

En la subcuenca Perote-Libres se encuentran presentes diez tipos de suelo: Andosol ócrico, Cambisol eutrítico, Feozem háplico y calcárico, Fluvisol eutrítico, Litosol, Regosol calcárico, éutrítico y dístrico así como Solonchak takírico (INIFAP y CONABIO, 1995) (Fig. 4E).

Los suelos más representados son el Regosol eutrítico y el Andosol ócrico. El primero se distribuye de manera heterogénea, encontrándose en la parte norte de la subcuenca y tiene su mayor presencia en la planicie central de la misma, extendiéndose hasta el extremo sur, en el valle de las Derrumbadas. Así mismo, se encuentra de manera importante en la serranía que limita la subcuenca al oeste, donde se encuentra la zona arqueológica de Cantona.

Por otro parte, el Andosol ócrico se localiza en toda la cadena montañosa del corredor Cofre de Perote-Pico de Orizaba así como en la parte oeste del área de estudio, formando una franja que la cruza de norte a sur.

El Litosol se encuentra principalmente en la parte norte de la subcuenca, donde se encuentran los Humeros, así como en zonas al sur de la laguna El Salado, donde se encuentran los axalapascos.

En la laguna el Salado, el suelo es Solonchak takírico, mientras que el área que conecta esta laguna con su contraparte en los Llanos de San Juan (Laguna del Carmen), los suelos son Feozem calcárico y Háptico.

Las Derrumbadas presentan Litosol en la parte alta y Feozem calcárico en la parte baja, mientras que el cerro aledaño a estas (cerro Pinto) está conformado por Regosol dístico y en las laderas del mismo por Regosol calcárico.

Los suelos restantes (Cambisol éutrítico y Fluvisol éutrítico) se encuentran representados pobremente en la región, únicamente en las faldas de la sierra que delimita a la subcuenca hacia el oeste.

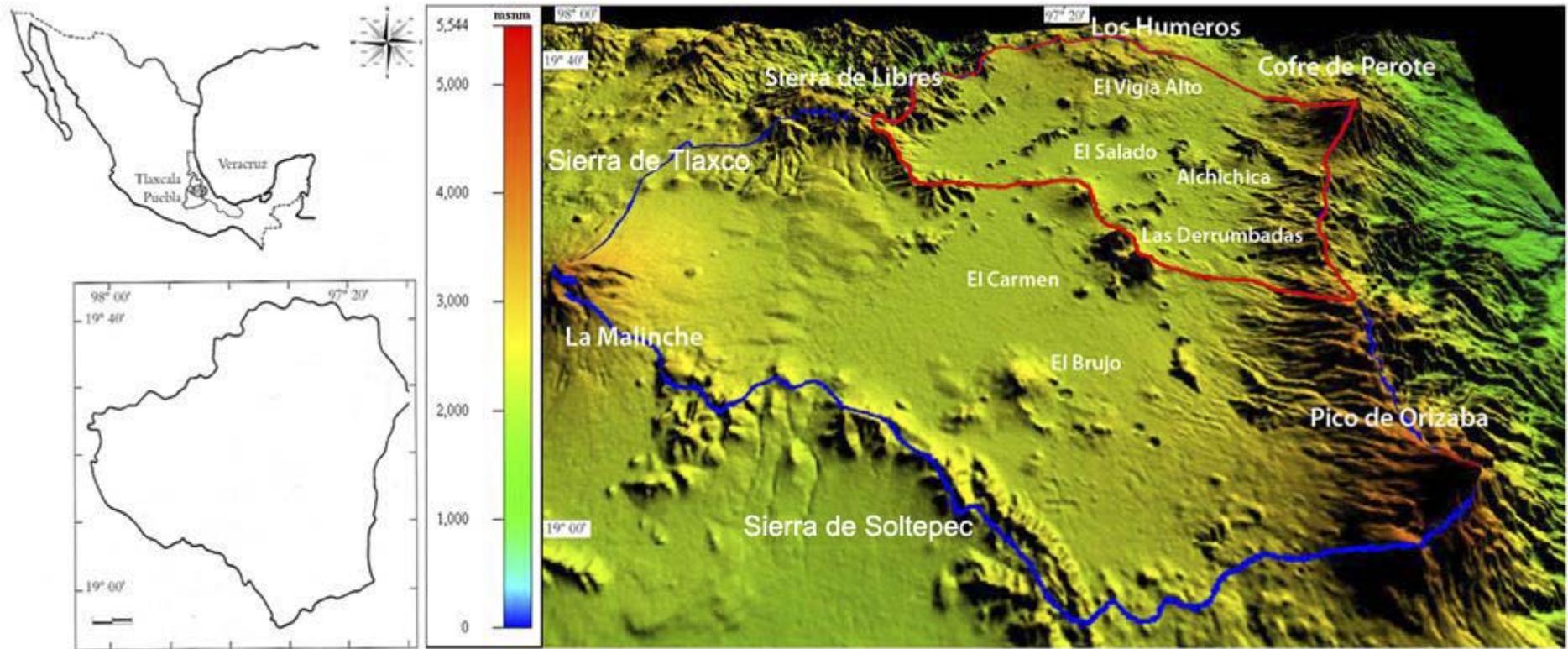


Fig. 3. Cuenca Oriental (azul) y subcuenca Perote-Libres (rojo): localización y principales accidentes geomorfológicos

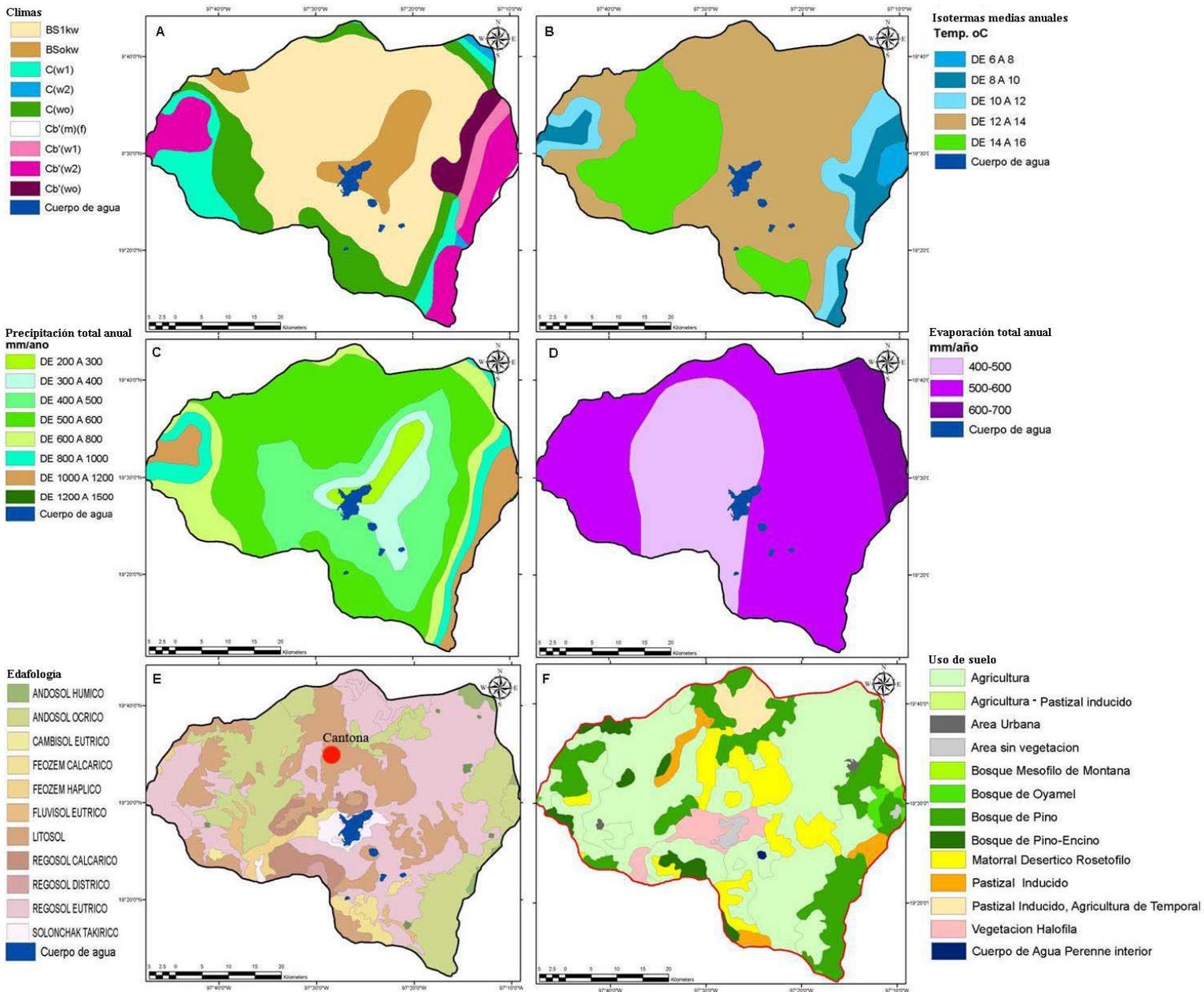


Fig. 4. Caracterización ambiental de la subcuenca Perote-Libres: climas (A), isotermas medias anuales (B), precipitación total anual (C), evapotranspiración total anual (D), edafología (E) y uso de suelo (F) (Fuentes: García & CONABIO, 1998a,b y c; INIFAP & CONABIO, 1995)

3.2.3) Aspectos socio-ambientales (Fig. 5):

La zona arqueológica de Cantona (*Casa del Sol*) es el registro más estudiado en la región para conocer la historia de los asentamientos humanos en la subcuenca Perote-Libres (Meehan, 2010).

Las primeras sociedades humanas se asentaron en el valle de Perote durante el Preclásico Superior. Dicha ocupación ocurrió durante el periodo del año 600-100 AEC¹ por grupos Olmeca-Xicalanca (García y Merino, 1998).

Alrededor del año 800 EC² se presentó el mayor apogeo de esta ciudad, estimándose una población de 87,000 a 93,000 habitantes (García y Martínez, 2008). Estos pueblos prehispánicos realizaban actividades agrícolas y utilizaban los recursos naturales de la región, como el ixtle, el zacatón, la madera y la obsidiana (Geréz, 1983). A partir del año 900 EC comienza el declive de la ciudad, la cual va a ser abandonada hacia el periodo del 1000-1050 EC (Meehan, 2010).

A partir de la conquista (siglo XVI), se fundaron numerosos pueblos en la zona y comenzó la repartición de tierras para la agricultura, al mismo tiempo que se introdujo el cultivo de trigo, cebada, haba y papa, y la ganadería de ovinos y caprinos (Geréz, 1983).

En el siglo XVII, la agricultura se expande por todo el valle de Perote y comienza la explotación a gran escala de los recursos forestales que son exportados al puerto de Veracruz para la construcción de barcos, y hacia Xalapa, Perote y Apizaco para la construcción de viviendas (Geréz, 1982).

En el siglo XVIII, un gran número de haciendas comienzan a invadir las zonas boscosas y continúa la expansión de la agricultura y la ganadería. Para el siglo XIX, comienza la construcción de vías de comunicación, siendo las más importantes la carretera Veracruz-Xalapa-Perote y el Ferrocarril Interoceánico. Esto apoya el continuo crecimiento de las actividades agrícolas y ganaderas en la región, por lo cual se tienen los primeros reportes de grandes zonas desmontadas y la presencia de erosión (Geréz, 1983).

¹AEC: Antes de la era común (antes del año 1)

²EC: Era común (después del año 1)

Para inicios del siglo XX se reporta una alta producción agrícola y un gran número de cabezas de ganado, así como una intensa actividad en la industria forestal (Ern, 1973). Comienza el cultivo y exportación de zacatón y en el año de 1937 se declara como Reserva Forestal Nacional al Cofre de Perote. En 1946 se considera como “área en reforestación” la cuenca del lago Alchichica (INE, 2000), mientras que en 1954 se decreta la primera veda de control del acuífero (CONAGUA 2002a). Así mismo, se reporta erosión eólica en las llanuras de la sierra (Arellano y Romero, 2005) y baja producción agrícola a finales del siglo (Geréz, 1983) así como la reducción en la superficie forestal (Alcocer *et al.* 2004).

En la actualidad, la problemática del aclareo de bosques continúa (García *et al.* 2010), la agricultura acapara cerca del 70% del área de la subcuenca (Fig. 7F) y está creciendo la industria de extracción de materiales para la construcción como la grava y arena, al mismo tiempo que CONAGUA ha declarado al acuífero Libres-Oriental como sobreexplotado y con una nueva veda de control (SEMARNAT, 2009).

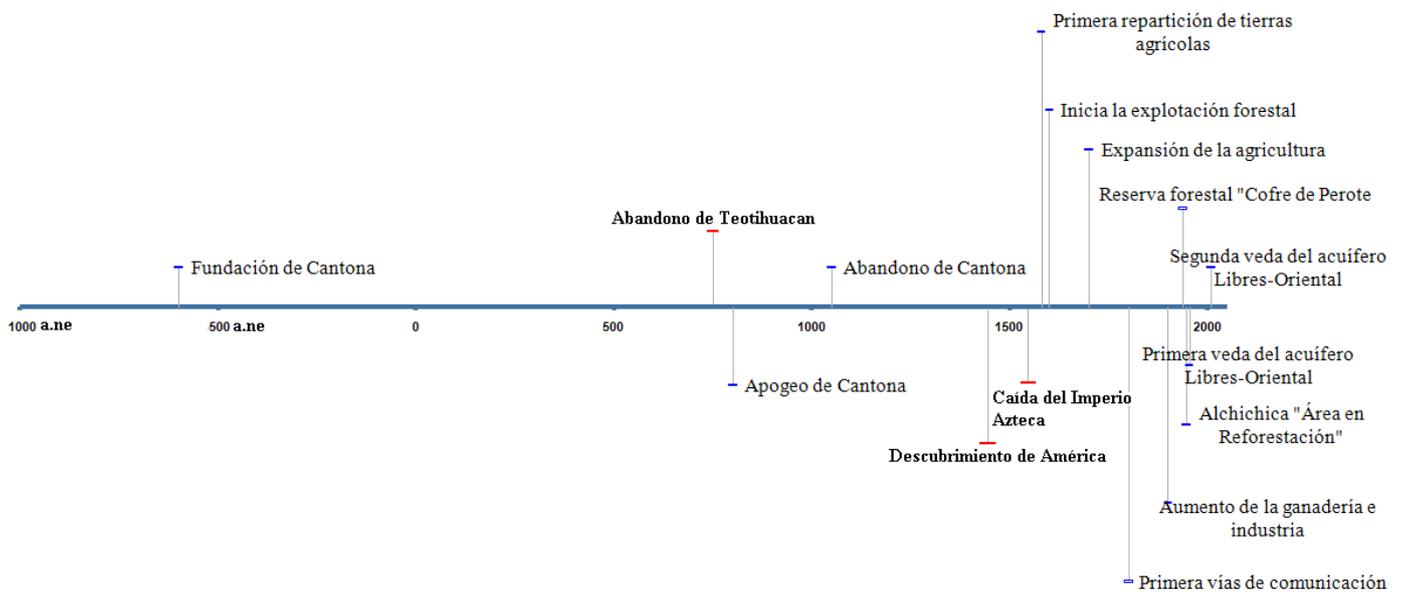


Fig. 5. Eventos históricos y ambientales en la subcuenca Perote-Libres (en rojo se marcan eventos relevantes de la zona centro de México que influyeron en el desarrollo histórico del área de estudio)

4) JUSTIFICACIÓN

Como se mencionó en la sección de antecedentes, el acuífero de la cuenca Oriental se ha considerado como una posible fuente de abasto de agua para las ciudades de Puebla y el Distrito Federal. Sin embargo, a través de los años se ha observado un descenso importante de los recursos acuáticos superficiales de la zona (axalapascos). Lo anterior se ha considerado como un indicador de sobreexplotación del acuífero con fines de irrigación, uso directo de agua, consumo humano y de ganado (Alcocer y Escobar, 1990) así como por cambio de uso de suelo (Alcocer *et al.* 2004).

Actualmente se ha intensificado la erosión eólica y pluvial, debido a la deforestación masiva de la cuenca y por el incremento de las actividades agrícolas, ganaderas y de explotación de materiales de construcción (Lugo *et al.* 1994).

La agricultura se ha reportado como un factor de presión y estrés en el recurso hídrico por su extracción para el riego de cultivos y por la contaminación generada por fertilizantes (Alfarra, 2004). A nivel mundial, el 70% del agua utilizada es consumida en campos de irrigación (GWP, 2000). De la misma forma, el incremento poblacional aumenta la demanda de agua por el aumento de actividades agrícolas, industriales y de otros sectores, lo cual ha llevado a la pérdida del recurso (Jackson *et al.* 2001).

La evaporación elevada y precipitaciones escasas que caracterizan a la cuenca Oriental (evaporación media anual = 1460 mm; evaporación real = 472 mm/año; precipitación media anual = 590 mm (CONAGUA 2002a)) junto con la contaminación por detergentes, jabones y basura sin tratamiento posterior para su reutilización, están amenazando los recursos acuáticos de la zona.

La falta de monitoreo hidrogeológico de largo tiempo no permite evaluar el origen del descenso del nivel en los lagos de la zona, ni en el acuífero regional. Como se mencionó anteriormente, dos hipótesis se han manejado para tratar de explicar este fenómeno: la sobreexplotación del acuífero aunado al efecto del cambio climático (Alcocer *et al.* 2004).

Existe una relación entre los lagos y el acuífero en esta zona. Analizando las entradas de agua al lago Alchichica (precipitación y agua subterránea) y las salidas (evapotranspiración y salidas subterráneas), el axalapasco presenta un déficit de almacenamiento de $-0.6 \text{ m}^3/\text{año}$, lo cual es la causa del descenso del nivel de este lago durante los últimos 40 años (Alcalá, 2004).

El presente estudio muestra el panorama actual del recurso hídrico en la subcuenca Perote-Libres, y ejemplifica adecuadamente la problemática en la cuenca Oriental, la cual puede extrapolarse a otras muchas zonas áridas y semiáridas del país. Se pretende que los resultados de este trabajo sirvan para proponer medidas que ayuden a tener un mejor aprovechamiento del agua en la región, en vista de un futuro aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en la zona, para el bien tanto de los ecosistemas como de las poblaciones que en ella residen.

5) OBJETIVOS

5.1) Objetivo general

Determinar la disponibilidad y uso actual del agua en la subcuenca semiárida Perote-Libres (Puebla-Veracruz).

5.2) Objetivos particulares

- 1) Determinar la dinámica hidrológica del área de estudio identificando la red de drenaje y a través de balances hídricos.
- 2) Describir los usos del agua y volúmenes utilizados del recurso en los municipios de la subcuenca Perote-Libres.
- 3) Identificar cambios en los patrones climáticos de la región que pueden estar afectando el recurso hídrico y los cuerpos acuáticos superficiales de la zona.
- 4) Elaborar un diagnóstico socio-ambiental a través de la descripción de las percepciones con respecto al agua por parte de autoridades encargadas del manejo del recurso en la región.
- 5) Determinar los factores tanto ambientales como sociales y productivos que afectan la disponibilidad de agua en el área de estudio.

6) METODOLOGÍA

En Latinoamérica están vigentes los planes de ordenamiento del uso del agua en cuencas. Existen dos motivos básicos para incorporar estos planes en la agenda de programas de manejo y distribución del recurso hídrico de los países: una mayor competencia por el agua y la constatación de la necesidad de incorporar investigaciones ambientales en las decisiones de los planes de desarrollo que consideran las futuras necesidades de agua de las poblaciones (CEPAL, 1985). En este sentido, la cuenca, en particular el agua de la cuenca, es un buen punto de partida para considerar el medio ambiente.

6.1) Delimitación de la subcuenca Perote-Libres y acuíferos de la región

La subcuenca Perote-Libres es uno de los once sitios de investigación de la Red Mex-LTER en el país. Dentro de este grupo de trabajo se propuso una estrategia metodológica para la delimitación de cuencas (Martínez, 2008) utilizando criterios topográficos (geomorfológicos) e hidrográficos (red de drenaje superficial) (Moreno, 2010). Actualmente es posible reconstruir la topografía de una región utilizando imágenes satelitales, generando un Modelo Digital de Elevación (MDE), el cual implica la representación de las elevaciones del terreno mediante valores numéricos (Euillades y Vénere, 2003). Esta representación es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno (INEGI, 2010b).

A partir de las curvas de nivel del área de estudio se realizó un MDE. Posteriormente se identificó e integró la red de drenaje y las curvas de nivel a escala 1:50 000. Lo anterior se aplicó a las cartas topográficas digitales E14B24 (Mexcaltepec), E14B25 (Xonacatlán), E14B26 (Perote), E14B34 (Huamantla), E14B35 (Guadalupe Victoria), E14B36 (Xico), E14B44 (Tepatlxco), E14B45 (San Salvador el Seco), E14B46 (Coscomatepec de Bravo).

Más adelante se identificó el punto de descarga de los escurrimientos de la zona, y se procedió a la localización de los puntos más altos de la cuenca y los puertos (picos, cerros y lomeríos) de la misma. Finalmente se unieron los puntos más elevados, siguiendo los bordes de las montañas para dejar delimitada el área de estudio.

6.1.1) Obtención de la red de drenaje de la subcuenca Perote-Libres:

INEGI ha publicado el simulador de flujos de aguas de cuencas hidrológicas (SIATL) con el objetivo de proveer un medio sencillo y gratuito para diseminar conocimiento geográfico del país. Éste simulador surge como resultado de la etapa 1 de conectividad del Proyecto de la Red Hidrográfica escala 1:50 000. A la vez, este deriva del producto “Red Hidrográfica Escala 1:

50,000 Edición: 1.0” el cual fue concebido como un sistema de circulación lineal estructurado que permite representar el drenaje de una cuenca hidrográfica (IMTA, 2010).

La información que se provee incluye la hidrografía superficial como sustento en la construcción de escenarios para diversos proyectos, tales como contingencias de eventos hidrometeorológicos, rutas de evacuación, construcción de infraestructura y ordenamiento ecológico. El uso de esta plataforma permitió generar un mosaico de imágenes del drenaje de la subcuenca Perote-Libres a escala 1:50,000 con las siguientes capas activadas:

- 1) Direcciones de flujo 1:50,000
- 2) Puntos de drenaje 1:50,000
- 3) Red hidrográfica 1: 50,000
- 4) Cuerpos de agua 1: 50,000
- 5) División hidrológica 1: 250,000
- 6) Ortofoto 1: 20,000

6.2) Análisis climatológico de la subcuenca Perote-Libres

Utilizando el Extractor Rápido de Información Climática vol. 3 (ERIC III) se determinaron las estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca y en los alrededores de la misma.

Con los datos meteorológicos del INIFAP (2007a,b) y del programa ERIC III se seleccionaron las estaciones que presentan la información más completa en tiempo y continuidad para realizar los análisis que se mencionan a continuación:

6.2.1) Polígonos de Thiessen

Los polígonos de Thiessen son uno de los métodos de interpolación más simples. Está basado en la distancia geométrica que existe entre un punto y el más cercano a dicho punto, en este caso estaciones meteorológicas cercanas (Moreno, 2010).

Los polígonos se crean uniendo puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Con los anterior, cada punto queda contenido dentro de un polígono en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados es equidistante a los puntos vecinos (Sánchez, 2004). Esta herramienta es utilizada para realizar análisis de proximidad o para definir áreas de influencia alrededor de los puntos. La red poligonal se traza formando los polígonos mediante las perpendiculares en el punto medio a los segmentos que unen cada dos estaciones (Moreno, 2010).

Utilizando la información de las estaciones meteorológicas que se localizan dentro del área de estudio se trazó la red poligonal. Para ellos se utilizaron las perpendiculares en el punto medio a los segmentos que unen cada dos estaciones. El programa Arc Map 9.3 se usó aplicando la herramienta *Thiessen Polygons*.

6.2.2) *Climogramas*

Un climograma es un gráfico de doble eje en el que se presentan resumidos los valores de precipitación y temperatura recogidos en una estación meteorológica. Los datos medios de cada mes del año se presentan teniendo en cuenta la precipitación y la temperatura media a lo largo de todos los años observados.

Se construyeron los climogramas de las estaciones que se encuentran dentro de la subcuenca y que cuentan con datos de 1961 a 2003 (INIFAP 2007a, b) utilizando el programa EXCEL.

6.2.3) *Balance hídrico*

Una herramienta que se ha utilizado para determinar el comportamiento de la dinámica del agua dentro de una cuenca es el balance hídrico (Jujnosvky, 2006), que de acuerdo con Moreno (2010) se define como “*el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan a un sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado. Citando la misma fuente: se refiere al balance entre la ganancia de agua por precipitación, menos la pérdida de agua por evapotranspiración, escurrimiento y considerando además el cambio en la humedad del suelo; por ello, es una herramienta muy útil en el análisis de los problemas de agua en una región determinada*”.

El método más utilizado para la realización del balance hídrico dentro de una cuenca es el de Thornthwaite–Mather (1955) el cual es utilizado en una variedad de suelos y tipos de vegetación. Este método contabiliza las ganancias de agua por lluvia o riego y las pérdidas por evaporación, escurrimiento, drenaje profundo y la variación del almacenamiento de agua en el suelo, además de analizar diversos componentes que se consideran primarios y secundarios. Dentro de los primeros se incluyen a la precipitación, escurrimiento, evapotranspiración real, escurrimiento; y los secundarios son la interceptación por dosel, retención de agua por el mantillo, aporte por rocío, precipitación efectiva, evapotranspiración potencial y almacén de agua en troncos (Dunne & Leopold 1978). De esta manera puede realizarse el balance hídrico de la región de estudio, donde se obtienen los parámetros siguientes:

$$\mathbf{BH} = \mathbf{Pp} - \mathbf{ETP} - \mathbf{Esc} - \mathbf{\Delta HS}$$

Dónde:

BH= balance hídrico

Pp= precipitación

ETP= evapotranspiración potencial

Esc= escurrimiento

ΔHS= cambio en la humedad del suelo

Los parámetros del balance hídrico se definen de la manera siguiente (Moreno, 2010):

1. *Precipitación mensual*: se utiliza el promedio de la precipitación mensual de un número determinado de años con los datos de las estaciones climatológicas con mayor influencia en la zona de estudio.

2. *Evapotranspiración potencial (ETP) mensual*: si no se tiene es necesario obtenerla por medio

$$E_t = 1.6 \left[\frac{10T_a}{I} \right]^a$$

de la fórmula por lo que se requieren los datos de temperatura media mensual, obtenida de la estación con mayor influencia en la zona de estudio y aplicar la siguiente fórmula:

T_a = Media mensual de temperatura del aire (°C).

$$I = \text{Índice de calor anual} = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T_{ai}}{5} \right]^{1.5}$$

i=1

$$a \text{ (Constante)} = 0.49 + 0.0179 I - 0.0000771 I^2 + 0.000000675 I^3$$

3. *Déficit de la precipitación* (deficiencia de agua de lluvia): resulta de restar la ETP a la precipitación. Los números negativos demuestran un déficit y los positivos que hay más entrada de lluvia con respecto a la pérdida.

4. *Déficit acumulado*: se determina de un mes a otro, consiste es sumar el déficit del mes actual con el del mes anterior.

5. *Humedad de suelo*: esta variable está relacionada con el tipo de suelo, la capacidad de retención de agua del mismo y de la profundidad de las raíces en él. Lo anterior es porque éstas

llevan a cabo la absorción de agua. Este parámetro se obtiene con una relación logarítmica del agua que es retenida en el suelo y el déficit que se ha ido acumulando de la precipitación (falta de agua). La determinación se realiza con la ecuación de una recta. Hay que considerar que en determinado momento no hay suficiente humedad por lo que la capacidad de retención del suelo de absorber agua está disminuida.

6. Cambio en la humedad del suelo: la variable se relaciona con el tipo de suelo, la capacidad de retención de agua del mismo y de la profundidad de las raíces en el suelo, ya que éstas llevan a cabo la absorción de agua. Se obtiene con una relación logarítmica del agua que es retenida en el suelo y el déficit que se ha ido acumulando de la precipitación (falta de agua). Hay que considerar que en determinados momentos y lugares no existe capacidad en el suelo de absorber agua por lo que la humedad puede llegar a ser nula. Con base en la fórmula, se determina a partir del valor del mes actual menos la del mes anterior.

7. Evapotranspiración actual/real (ETP): el valor describe la cantidad de agua que las plantas pueden evaporar. El valor se obtiene restando a la precipitación el cambio de humedad del suelo. Esto no se cumple cuando la ETP es mayor o la ETR actual la sobrepasa. Para este fin, los valores no pueden ser mayores por lo que se consideran los mismos de la ETP

8. Déficit de humedad del suelo: este valor se determina con la ETP restándole la ETR. Comúnmente es mayor la potencial y la cantidad de agua en el suelo no es suficiente para abastecer al suelo con la que necesitan las plantas.

9. Exceso de agua en el suelo: este valor se obtiene restando a la precipitación la ETP menos el cambio de humedad que ocurre en el suelo.

10. Agua que está disponible para escurrir proveniente del exceso de agua anterior: este valor se obtiene sumando el exceso de agua a la cantidad que es retenida en el suelo correspondiente al mes anterior.

11. Escorrentía: es el exceso de agua en el suelo, por lo que es la cantidad que está disponible para escurrir. Se obtiene restando la precipitación menos la ETP, menos el cambio de humedad que sucede en el suelo. De este exceso de agua, existe alguna que está disponible para escurrir y se obtiene sumando el exceso de agua y la que es retenida en el suelo del mes anterior.

12. Agua retenida: es la mitad de la cantidad que está disponible para escurrir y es la cantidad que no va a escurrir sino que se quedará almacenada en el suelo.

Para el cálculo del balance hídrico de las estaciones seleccionadas, se utilizaron dos plantillas EXCEL (a manera de comparativo) diseñadas por Rolim *et al.* (1998): BHseq Vol. 6 y VHaula. Se utilizaron los valores de temperatura y precipitación media del periodo 1961 a 2003 (INIFAP, 2007a, b) para las estaciones elegidas según el método de polígonos de Thiessen que se describió anteriormente. La Organización Meteorológica Mundial recomienda un registro mínimo de 30 años para realizar el cálculo del balance hídrico (Lozada y Sentelhas, 2003) por lo cual, el periodo de 42 años utilizado en el presente estudio cumple con la recomendación anterior.

Las plantillas EXCEL calcularon los balances hídricos mediante el método de Thornthwaite considerando a la lluvia como la única entrada al sistema, a la ETP como la salida debida a la demanda atmosférica y la capacidad de agua disponible (CAD) como la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Mediante este método, el software es capaz de estimar la evapotranspiración real (ETR), el déficit (DEF), el exceso (EXC) y el almacenamiento de agua en el suelo.

La variación del almacenamiento se estimó a través de la alteración (ALT) del contenido de agua en el suelo, mediante la ecuación: $\pm ALT = P - ETR - EXC$

Como precipitación efectiva fue considerada el 100% del total y un CAD de 100 mm. Este valor se toma como referencia climática para comparaciones entre distintas zonas (independientemente del suelo y vegetación). Thornthwaite y Mather (1955) dieron valores de reserva máxima entre 50 y 400 mm; por otro lado, Thornthwaite (1948) utilizó como reserva los 100 mm (es la que se utiliza en el presente estudio) y Turc y Lecerf (1972), en su índice de productividad agrícola emplean una reserva de 100 mm (RFU = “reservorio fácilmente utilizable”).

Dentro de los términos utilizados en este programa se definen los siguientes:

1. *Excedente hídrico*: es la cantidad de agua del suelo que se encuentra por encima de la capacidad de retención y que es sujeta a percolación.
2. *Retirada hídrica*: es la cantidad de agua retirada del suelo a través de la evapotranspiración cuando esta excede la precipitación.
3. *Deficiencia hídrica*: es la cantidad de agua que deja de ser evapotranspirada por falta de humedad en el suelo. Este valor corresponde a una cuantificación de la sequía.

4. *Reposición hídrica*: es la cantidad de agua repuesta en el suelo y que alcanza la capacidad máxima de retención, cuando la lluvia excede la evapotranspiración potencial.

6.2.4) *Análisis de la estación climatológica en el lago Alchichica*

Se utilizaron datos históricos de precipitación, evaporación y temperatura de la estación Alchichica (laguna) DGE del sistema CLICOM de CONAGUA para el periodo de 1970 a 2006. En el caso de aquellos años que no están completos (no tienen registro de los doce meses: 1983, 1998) y aquellos en los cuales no existe registro (2002 y 2003), se utilizó el valor promedio que resultó de sumar el valor del año inmediato anterior y del año inmediato posterior y dividirlo entre 2, con la finalidad de estandarizar la base de datos.

Los valores acumulados se obtuvieron al sumar los datos de los doce meses del año. Se considera el término “normal” desde el punto de vista estadístico. Este valor se obtiene al promediar los datos de precipitación, evaporación y temperatura de todo el periodo considerado, es decir, es un valor promedio histórico para la región considerada (Esquivel, 2002).

Se denomina “periodo seco” a la precipitación por debajo del promedio y “periodo húmedo” a la precipitación por encima del promedio, así como “periodo cálido” a la temperatura por encima del promedio y “periodo frío” a la temperatura por debajo del promedio. En el caso de la evaporación, se menciona como “periodo de mayor evaporación” o de “menor evaporación” al promedio.

La duración y ubicación temporal de estos periodos se cuantificó con gráficas de media móvil suavizadas y residuales acumulados que se elaboraron en EXCEL. El efecto de la media móvil es suavizar las irregularidades extremas, lo cual facilita la identificación de ciclos y tendencias de manera visual (Sumner, 1998). La media móvil con un periodo de cinco años suaviza el periodo anual de los datos para permitir observar otros periodos que puedan existir en los datos (Esquivel, 2002).

Por otra parte, los residuales acumulados permiten observar desviaciones significativas y sostenidas en las variables que se están midiendo (Sumner, 1998). En esta técnica se suman los residuales o diferencias respecto al promedio del periodo, ya sea como cantidades absolutas o relativas. Estas diferencias son positivas para valores mayores que el promedio y negativas para cuando son menores que el promedio. Cualquier cambio significativo es indicado por un cambio de dirección en la tendencia de los residuales acumulados (Esquivel, 2002).

6.3) Determinación de la disponibilidad de agua en la subcuenca Perote-Libres

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) establece el procedimiento para otorgar concesiones, asignaciones y permisos de uso de agua (el derecho de uso) a través de la CONAGUA y el Registro Público de los Derechos del Agua (REPDA) (Rubiños *et al.* 2004). Este último otorga seguridad jurídica a los usuarios de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Así mismo, salvaguarda los derechos inscritos y vigila que toda persona tenga derecho a que se le muestren los asientos registrales¹ y obtenga constancia de los mismos (CONAGUA, 2010b).

6.3.1) Volúmenes concesionados y usos

Se realizó una base de datos en EXCEL con la información disponibles en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) actualizada al periodo de Enero-Marzo de 2010 (CONAGUA 2010b) con la información de las concesiones inscritas en este registro dentro del área de estudio. La base de datos consideró los siguientes parámetros: coordenadas geográficas del aprovechamiento, volumen concesionado al año y uso del mismo.

La información se encuentra a escala municipal, por lo cual se realizó una proyección en ArcMap 9.2 con la delimitación municipal de CONABIO (2004). Esta delimitación muestra la distribución de los volúmenes de agua concesionados por municipio, ubicando entidades que presentan concesiones mayores del recurso y las de menor demanda del líquido. En el caso de aquellas entidades que se encuentran de manera parcial dentro de la subcuenca Perote-Libres, se utilizaron únicamente los datos de concesiones que están dentro del polígono del área de estudio.

6.3.2) Censo y profundidad de los pozos

El censo de los pozos registrados en la zona de acuerdo con el REPDA, provee coordenadas geográficas y uso de los mismos (agrícola, público u otros).

El registro de profundidad de extracción de los pozos del área de estudio usó el Sistema de Localización de Aprovechamientos de CONAGUA (2010c). Esta capa se analizó con ArcMap 9.2, proyectando un mapa de puntos para cada pozo según su posición geográfica y su profundidad. Posteriormente se creó una malla cuadrículada con celdas de 1 km² con la herramienta XTOOLS, con la finalidad de reconocer las zonas del área de estudio que presentan mayor densidad de pozos/km² y extracción de agua/km²/año.

¹Se denomina asiento registral a la constatación escrita en un registro y derivada de un título de concesión

6.3.3) Disponibilidad de agua per-cápita

El análisis de disponibilidad de agua *per/cápita* a nivel municipal se realizó dividiendo el volumen total concesionado en las entidades de la región para uso público-urbano y doméstico entre el total de habitantes de los municipios (datos de CONAPO, 2010). En el caso de aquellas entidades que se encuentran de manera parcial dentro de la subcuenca Perote-Libres, se utilizaron únicamente los datos poblacionales de las localidades que están dentro del área de estudio.

6.3.4) Consumo de agua en cultivos

El análisis de la dotación media de los cultivos de la subcuenca de Perote-Libres se realizó utilizando los datos del anuario estadístico de la producción agrícola de OIEDRUS para Puebla y Veracruz (OIEDRUS 2010a, b). La información de hectáreas agrícolas bajo la modalidad de riego se obtuvo tanto para cultivos cíclicos como perennes para cada municipio y se dividió el volumen concesionado para uso agrícola entre el total de hectáreas utilizadas para cultivos de riego en los municipios estudiados. En el caso de aquellas entidades que se encuentran de manera parcial dentro de la subcuenca Perote-Libres, se utilizaron únicamente los datos de las áreas agrícolas que están dentro del área de estudio.

6.4) Diagnóstico socio-ambiental

La cultura del agua puede entenderse como el resultado de un conjunto de dimensiones relacionadas con distintos niveles de la personalidad (valores, creencias, conocimiento, actitudes, comportamientos) que se expresan en forma de opiniones que emiten los ciudadanos sobre este tema. Estas varían en función de las características demográficas de la población (edad, sexo, nivel de estudios), así como de variables socio-estructurales (ocupación, niveles de renta), de situación (hábitat y lugar de residencia) o ideológicas (conciencia ecológica, ideología política), de tal modo que pueden distinguirse grupos diversos respecto a la cultura del agua (Moyano, 2002).

6.4.1) Entrevistas a informantes clave

El proyecto “Demandas hidrológicas de los ecosistemas naturales en México: Fase I” de la Red Mex-LTER tiene un componente social cuyo objetivo es “*describir las percepciones, estrategias y el manejo de los conflictos en torno al servicio ambiental del agua*”. Este componente parte de la premisa de que para comprender y analizar los procesos constituyentes que desencadenan grandes acontecimientos de luchas sociales, su carácter político y su radicalidad, hay que empezar por tomar conocimiento del modo y las circunstancias en que ciertos procesos sociales y políticos se convierten en relevantes en un determinado momento histórico. Por lo anterior, es necesario analizar qué es lo observable en el proceso histórico, que

es lo que se mantiene sin observaciones y sobre todo que es lo representativo de este momento específico en que los conflictos y el deterioro de la calidad del agua se agudizan, esto para comprender las percepciones y estrategias relacionadas al manejo del agua, así como explorar las luchas sociales en torno al agua y su evolución (Gutiérrez & Gerritsen, 2009).

Para realizar este análisis, se aplicó una encuesta semi-estructurada, cuya finalidad es conocer las percepciones de los diferentes actores involucrados en el uso y manejo del agua, así como su administración y gestión. Se concertaron citas con informantes clave (personas de acción directa en los planes de abastecimiento y gestión de obras del recurso hídrico) de los municipios que conforman la subcuenca Perote-Libres. Se lograron realizar entrevistas en nueve de los catorce municipios que conforman el área de estudio: Chignautla, Cuyoaco, Guadalupe Victoria, Lafragua, Libres, Ocotepéc, Perote, Tepayahualco y Xiutetelco. En los municipios de Altotonga, Ayahualulco, Ixtacamaxitlán, Jalacingo y Villa Aldama no se pudieron concretar citas para llevar a cabo las entrevistas.

6.4.2) Análisis de conflictos y potencialidades

Con los resultados de las entrevistas mencionadas anteriormente, se llevó a cabo un análisis de conflictos¹ y potencialidades² de acuerdo con la metodología propuesta por Moreno (2009). Para esto, se realizó un listado de conflictos y potencialidades en la zona y posteriormente se hicieron dos matrices con los parámetros mencionados.

¹ Los conflictos son aquellas situaciones o patrones que encierran una situación no deseada y por tanto apuntan hacia la problemática existente. Muestran la incompatibilidad entre lo que se desea y la realidad que se vive (Moreno, 2009).

² Las potencialidades son las fortalezas, las bondades, y las oportunidades que se presentan. Son los puntos de leva para producir los cambios en un proyecto planteado (Moreno, 2009).

En una hoja EXCEL (una para conflictos y otra para potencialidades) se anotó la lista, y la misma lista en la primera fila, a manera de matriz, para analizar y comenzar a valorar (valoración cualitativa) los conflictos. La valoración implica dos aspectos. Por un lado, se valora la intensidad del conflicto y su relación con otro conflicto, usando una escala cualitativa de cuatro niveles: 0=no existe relación, 1= existe relación pero es poca, 2= existe relación y es media, 3= existe relación y es alta o importante. De esta manera se analiza el primer conflicto del listado contra cada uno de los conflictos de la fila y se da un valor de 0 a 3. Un conflicto contra sí mismo no se puede valorar, por tanto hay un conjunto de cuadros que quedan vacíos. Por otro lado, y al mismo tiempo, se analizó qué conflicto es el que afecta, es decir, en qué sentido va. Para cada par de conflictos se analizó si el de la columna afecta al de la fila o viceversa. Cuando el conflicto de la columna afecta al de la fila, se indicó con un signo de + y cuando el de la fila afectó al de la columna con un signo de -. Ello permite discernir entre cuál es el conflicto alterante y cuál es el alterado. A la matriz se le añadieron tres columnas más al final. En la primera se anota la suma absoluta, es decir, sin tomar en cuenta los signos de + y -. En la segunda columna se anota la suma de todos los valores + y en la tercera de todos los valores -. La primera suma, sin valores, indica cuál es la relación más importante. Ello significa cual es el conflicto que guarda mayor número de relaciones y de mayor importancia. Este conflicto constituye el “subsistema decisor”, ya que dentro del conjunto de conflictos, es el elemento que realmente está provocando el desajuste más evidente, el desajuste más multiplicador, el que más influye y se relaciona (Moreno, 2009).

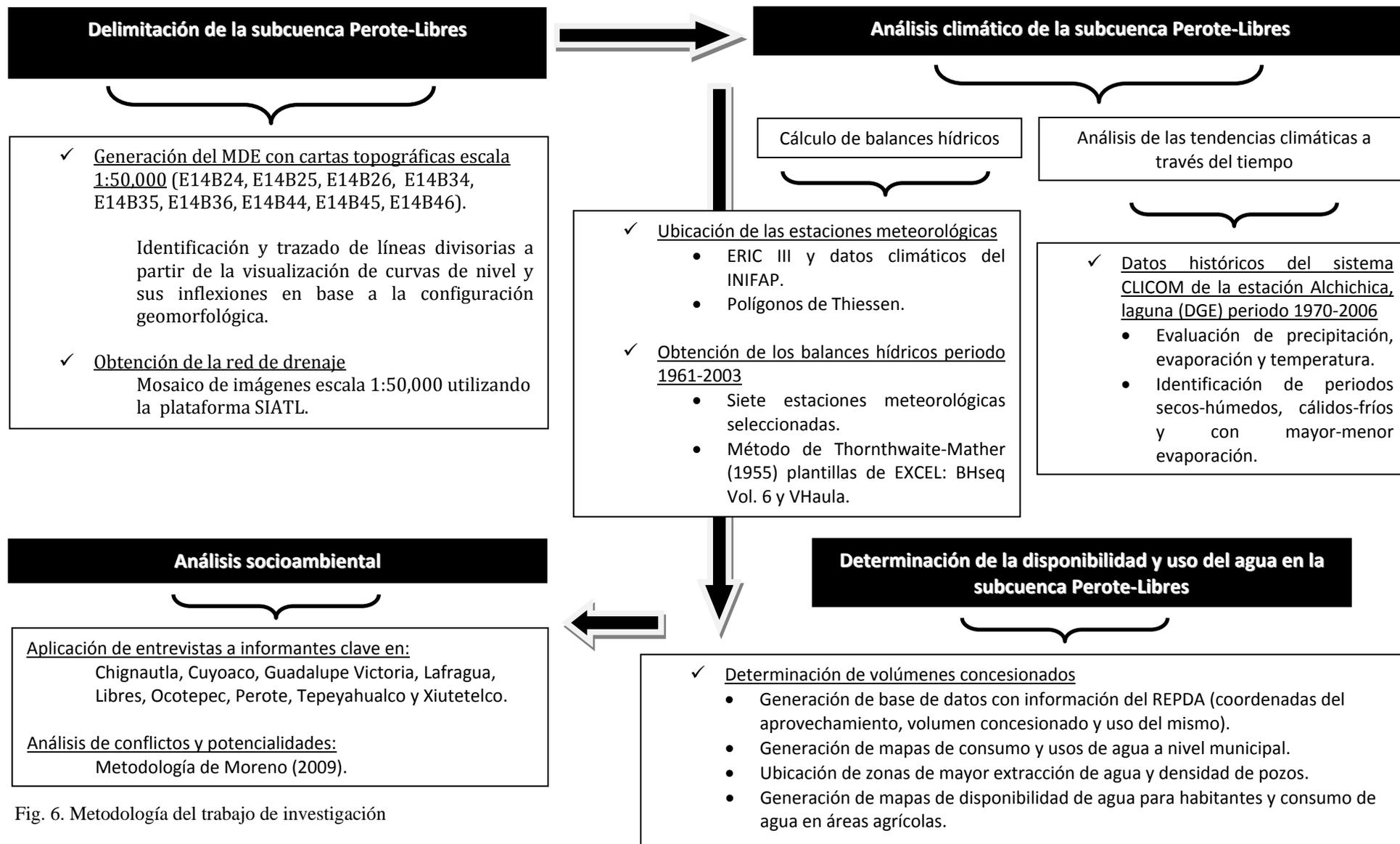


Fig. 6. Metodología del trabajo de investigación

7) RESULTADOS:

7.1) Delimitación de la subcuenca Perote-Libres y Modelo Digital de Elevación

La subcuenca Perote-Libres tiene una extensión de 2321.62 km² y un perímetro de 201.165 km y una longitud norte-sur de 60.2 km y Este-Oeste de 67 km. Presenta un coeficiente de compacidad de 1.17, lo cual indica una forma redonda a oval redonda.

La altitud máxima se localiza en la cima del Cofre de Perote (4,200 m s.n.m) y la mínima se encuentra en la extensa planicie central de la cuenca donde se localiza la laguna el Salado y los cuatro axalapascos, cuya altitud oscila entre los 2,200 a 2400 m s.n.m (Fig. 7), por lo tanto, la subcuenca Perote-Libres presenta un relieve de 2,000 m (es la diferencia entre la menor y mayor altitud en la región).

En el extremo norte se localiza el centro geotérmico de los Húmeros, a una altitud de 2,800 m s.n.m, misma altitud a la que se localiza la sierra de Quimixtlán que delimita la cuenca en el extremo este de la misma.

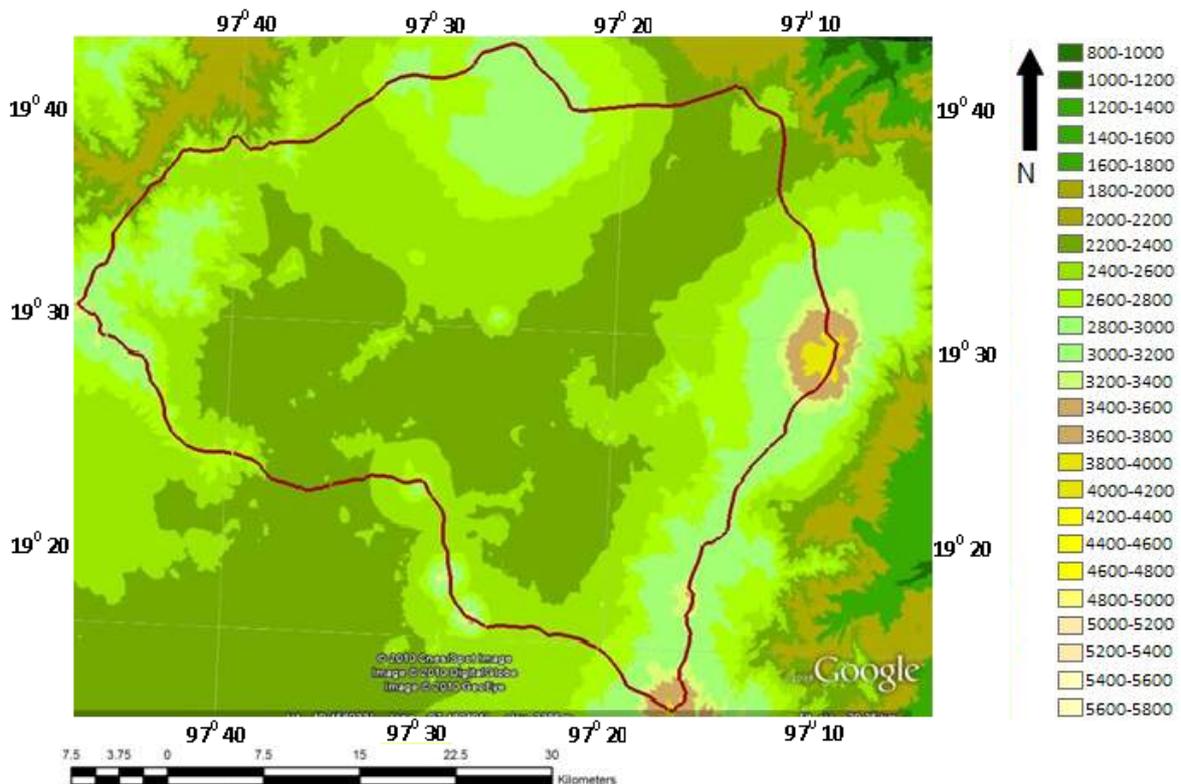


Fig. 7. Modelo Digital de Elevación de la subcuenca Perote-Libres

7.2) Red de drenaje (Fig. 8)

La subcuenca Perote-Libres presenta tres zonas de drenaje:

Zona centro:

Se localiza en la laguna El Salado, y es donde confluyen las redes de flujo de las partes altas. En esta laguna desembocan escurrimientos del este, provenientes del Cofre de Perote, y del corredor montañoso Cofre de Perote-Pico de Orizaba que se localiza al sureste de la subcuenca, así como del complejo montañoso Derrumbadas-Cerro Pinto al sur de la misma.

También confluyen escurrimientos provenientes de la serranía que se localiza en el municipio de Libres, donde sobresalen los cerros de San Gabriel, el Crestón, la Cantera, San Rafael, la Magdalena y Tres Cerros el cual alcanza más de 3200 m s.n.m. Así mismo, los escurrimientos provenientes de los cerros Pizarro, Las Águilas y el corredor montañoso al este de Tepayahualco formado por los cerros Xochitonal, Sotola, San Martín y Ponchitoc confluyen en este punto (*ver detalle en Anexo IV*).

Los escurrimientos de la zona norte que desembocan en la laguna provienen de las zonas altas formadas por “el Vigía Alto” (2800 m s.n.m). Esta estructura es el borde del cráter volcánico donde se encuentra la planta de energía geotérmica Los Humeros.

Zona sur:

Al sur de la subcuenca se localizan cuatro puntos de drenaje, tres de ellos representados por las cuencas lacustres de los lagos Atexcac, La Preciosa y Quechulac y el último de estos puntos se localiza en las faldas del Cerro Pinto (*ver detalle en Anexo IV*).

En el axalapasco La Preciosa confluyen los escurrimientos provenientes de la sierra con dirección este-oeste, que comienza en este lago y termina en las inmediaciones del axalapasco Atexcac. Esta serranía presenta una extensión de más de 7 km de largo y en ella destacan el cerro Siete Cuevas, así como el complejo montañoso del cerro Pinto Ancho y Alto. Esta formación que se levanta 600 metros sobre el nivel del valle. Así mismo, en la cuenca del lago desembocan escurrimientos provenientes de Las Derrumbadas y de los valles del sistemas montañosos Cofre de Perote-Pico de Orizaba, que se localizan al sur.

En el axalapasco Quechulac confluyen los escurrimientos que provienen de la sierra de Quimixtlán, la cual que se eleva a 3,200 m s.n.m. Así mismo, confluyen escurrimientos de los cerros Tetillán, Cristo Rey, el Rodeo, el Aire y Jesús, que se localizan al sur del lago.

En el axalapasco Atexcac únicamente confluyen los escurrimientos provenientes de la parte alta de la cuenca del lago, que se localiza al en la porción norte del mismo.

En las faldas del cerro Pinto se localiza otro punto de drenaje, en el valle de Jalapasquillo, el cual es el cráter de un volcán ya extinto. En este punto confluyen únicamente los escurrimientos que provienen del cerro Pinto y de los bordes del propio cráter.

Zona Norte:

En la parte norte de la cuenca se localizan cinco puntos de drenaje. La red hidrológica de esta zona está menos desarrollada que en el centro y sur de la subcuenca, esto se debe a la presencia del Cordón el Vigía Alto (2800 m s.n.m) que bordea la zona geotérmica de los Humeros e impide el paso de escurrimientos hacia el centro de la subcuenca. El cráter volcánico de esta zona forma una cuenca más pequeña (microcuenca). Por esta razón, los puntos de drenaje de esta zona son más locales que los que se localizan al centro y sur de la subcuenca. Los escurrimientos de estas zonas provienen de zonas altas, pero cercanas al punto de drenaje (*ver detalle en Anexo IV*).

Uno de estos puntos ellos se localiza en el cráter Xalapasco. En este lugar confluyen únicamente los escurrimientos provenientes de las partes altas del borde del mismo cráter.

Dos de estos puntos se localiza en depresiones (innominadas) en los valles volcánicos de esta zona geotérmica, donde confluyen los escurrimientos de las partes altas que bordean estas planicies.

Los dos puntos de drenaje restantes se localizan en el borde norte de la microcuenca, cercanos a la población de Oyameles. En estos dos puntos confluyen los escurrimientos que provienen de las zonas de lomeríos que se localizan al sur de los mismos.

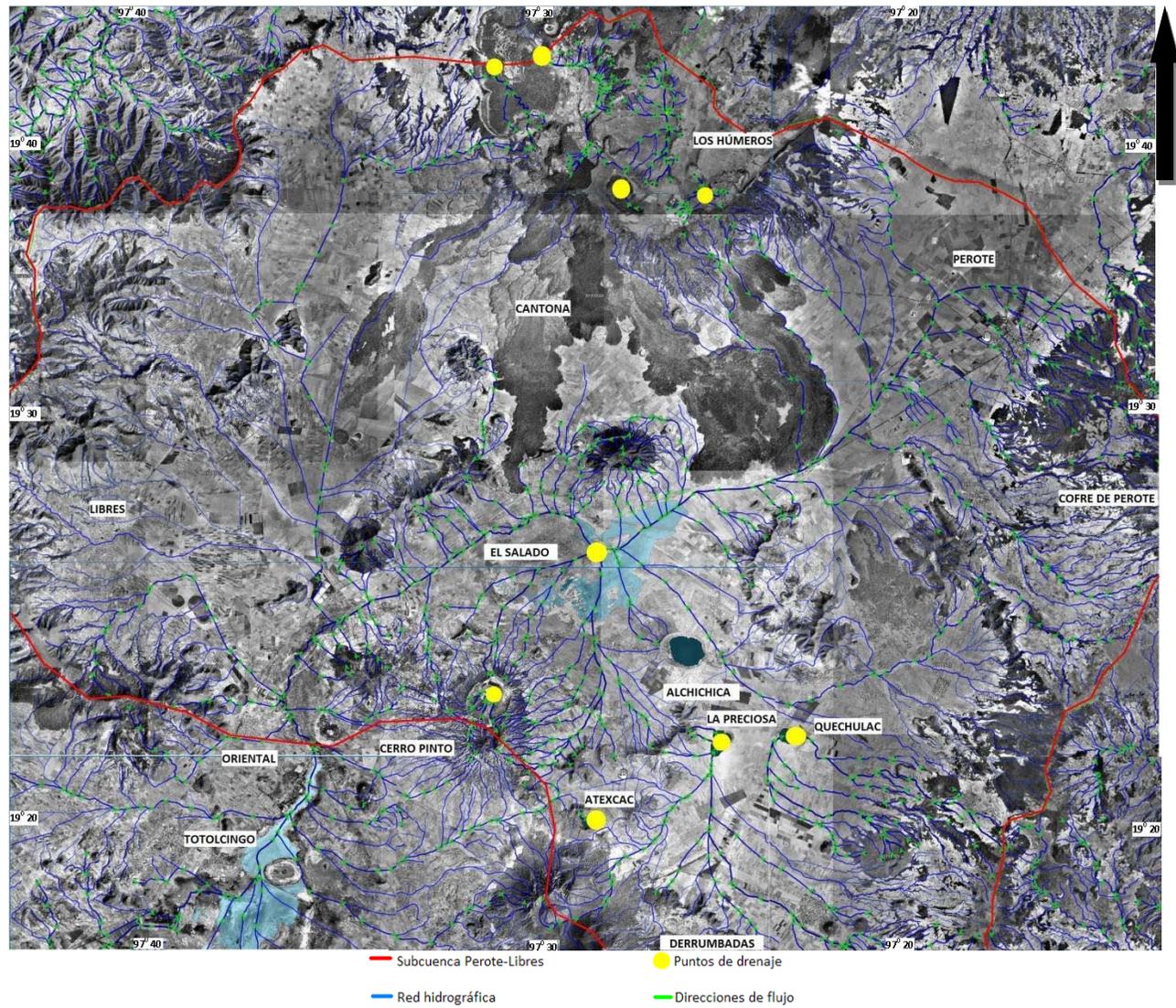


Fig. 8. Red hidrográfica de la subcuenca Perote-Libres

7.4) Balances hídricos (Tabla 1)

De las 44 estaciones que se encuentran dentro de la subcuenca y en sus alrededores, se seleccionaron siete. La selección se hizo con base en sus áreas de influencia y la calidad de sus datos, ya que se cuenta con los promedios de temperatura y precipitación para el periodo 1961-2003 (Fig. 9).

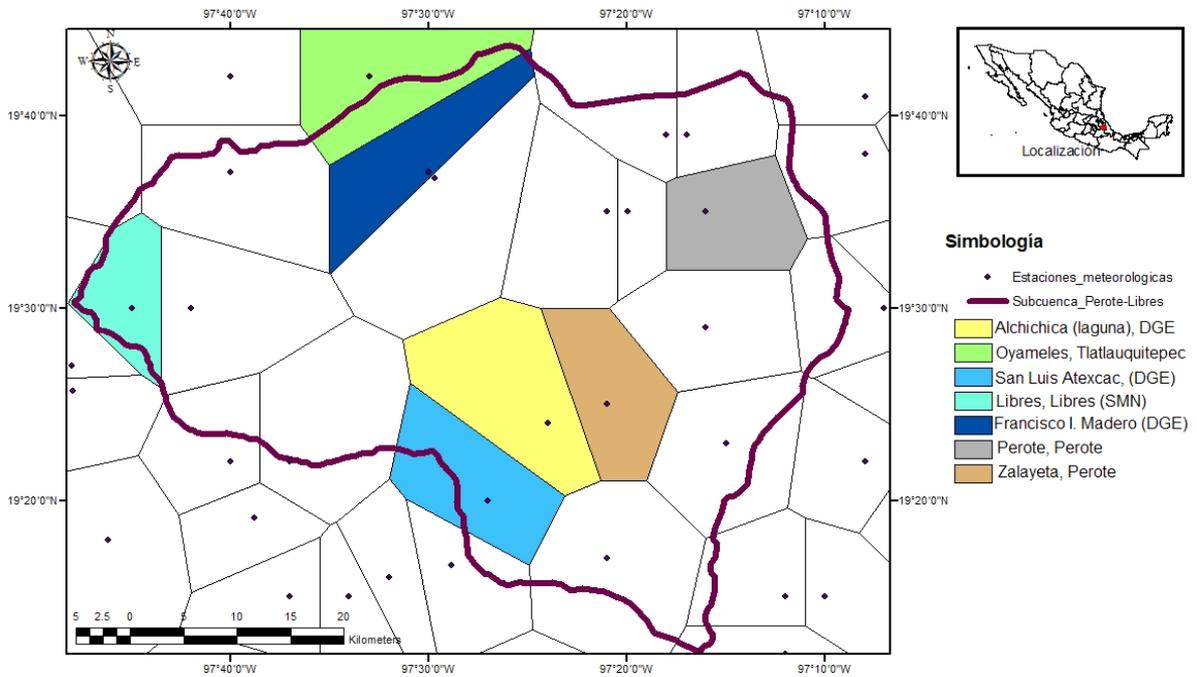


Fig. 9. Polígonos de Thiessen para las estaciones meteorológicas de la región

Los meses más lluviosos en la región son Junio y Septiembre. El mayor registro de precipitaciones (120.8 mm) ocurre en Junio en la estación Oyameles-Tlatlauquitepec, presentando un ARM¹ de 100 mm. El menor registro de precipitaciones para el mes más lluvioso corresponde a la estación Alchichica (laguna) DGE, con 84.1 mm en Junio y un ARM de 12.1 mm.

Los meses más secos son Enero y Diciembre, registrándose las menores precipitaciones (4.1 mm) durante Diciembre en las estaciones Alchichica (laguna) DGE y Zalayeta-Perote, con un ARM 6.85 y 8.66 mm respectivamente. El mayor registro de lluvias para el mes más seco corresponde a la estación Oyameles-Tlatlauquitepec, con 13.7 mm en Diciembre y un ARM de 74.09 mm.

¹ARM: Almacenamiento de agua en el suelo

Los meses más cálidos son Abril, Mayo y Junio, registrándose la mayor temperatura (17.0 °C) en el mes de mayo en la estación San Luis Atexcac (DGE). El menor registro de temperatura para el mes más cálido corresponde a la estación Oyameles-Tlatlauquitepec con 12.6 °C durante el mes de Junio.

Los meses más fríos son Enero y Diciembre, registrándose la menor temperatura (9.1 °C) durante Enero en la estación Zalayeta-Perote. El mayor registro de temperatura para el mes más frío corresponde a la estación Libres, Libres (DGE) con 12.0 °C durante el mes de Diciembre.

Los meses con mayor déficit hídrico son Marzo y Abril, registrándose los valores más altos en las estaciones Alchichica (laguna) DGE y Perote-Zalayeta durante el mes de Marzo con -40.0 mm y -40.1 mm y un ARM de 3.44 y 3.50 mm respectivamente. El menor valor para los meses con mayor déficit corresponde a la estación Oyameles-Tlatlauquitepec con -23.1 mm durante el mes de Abril y un ARM de 21.28 mm.

Los meses con menor déficit hídrico son Junio y Septiembre registrándose en la estación Oyameles-Tlatlauquitepec, la única zona que presenta un excedente hídrico, el cual abarca el periodo de Julio, Agosto, Septiembre y Octubre, alcanzando el máximo (98.6 mm) durante Septiembre y un ARM de 100 mm durante los cuatro meses. En el resto de las estaciones no hay excedente hídrico a lo largo del año. Durante los meses más lluviosos (Junio y Septiembre) presentan un balance entre las precipitaciones y los cálculos de ETP y ETR.

Tabla 1. Resumen de las variables obtenidas con el cálculo de los balances hídricos (ver tablas de resultados en Anexo VI)

	Alchichica (laguna DGE)	San Luis Atexcac (DGE)	Libres, Libres (DGE)	Francisco I. Madero (DGE)	Perote-Perote	Zalayeta-Perote	Oyameles-Tlatlauquitepec
Meses más lluviosos	Junio (84.10mm) Septiembre (71.30 mm) Agosto (56.80)	Junio (102.6 mm) Septiembre (80.2 mm) Julio (68.5 mm)	Junio (97.2 mm) Julio (79.2 mm) Septiembre (79.0)	Mayo (80.5 mm) Junio (79.7 mm) Septiembre (75.8 mm)	Septiembre (102.1 mm) Junio (73.4 mm) Octubre (66.2 mm)	Junio (75.7 mm) Septiembre (73.9 mm) Mayo (50.3 mm)	Junio (120.8 mm) Septiembre (146.0 mm) Octubre (103.6 mm)
Meses más secos	Diciembre (4.1 mm) Enero (6.8 mm) Noviembre (7.2 mm)	Enero (6.0 mm) Diciembre (5.7 mm) Febrero (12.1 mm)	Enero (7.9 mm) Diciembre (8.6 mm) Noviembre (10.9 mm)	Diciembre (6.6 mm) Enero (8.7 mm) Febrero (9.5 mm)	Enero (10.1 mm) Febrero (11.0 mm) Marzo (13.2 mm)	Diciembre (4.1 mm) Enero (6.3 mm) Febrero (7.8 mm)	Enero (11.2 mm) Febrero (12.0 mm) Diciembre (13.7 mm)
Meses más cálidos	Mayo (16.0 °C) Junio (15.7 °C) Abril (15.3 °C)	Mayo (17.0 °C) Junio (16.7 °C) Abril (15.9 °C)	Junio (16.6 °C) Mayo (16.5 °C) Abril (16.1 °C)	Mayo (15.5 °C) Abril (15.5 °C) Junio (15.0 °C)	Mayo (15.1 °C) Abril (14.6 °C) Junio (14.3 °C)	Mayo (15.3 °C) Junio (15.3 °C) Abril (14.9 °C)	Mayo (13.4 °C) Abril (12.9 °C) Junio (12.6 °C)
Meses más fríos	Enero (10.0 °C) Diciembre (10.1 °C) Febrero (11.0 °C)	Enero (11.1 °C) Diciembre (11.5 °C) Febrero (12.1 °C)	Enero (11.7 °C) Diciembre (12.0 °C) Febrero (13.1 °C)	Enero (11.0 °C) Diciembre (11.2 °C) Noviembre (12.0 °C)	Enero (10.1 °C) Diciembre (10.4 °C) Febrero (11.0 °C)	Enero (9.1 °C) Diciembre (9.7 °C) Febrero (10.3 °C)	Diciembre (9.5 °C) Enero (9.6 °C) Noviembre (9.9 °C)
Mayor déficit hídrico	Marzo (-40.0 mm) Abril (-34.7 mm) Mayo (-29.9 mm)	Marzo (-36.8 mm) Abril (-27.7 mm) Diciembre (-24.4 mm)	Marzo (-34.4 mm) Febrero (-24.0 mm) Enero (-23.7 mm)	Marzo (-38.9 mm) Abril (-33.2) Febrero (-29.5 mm)	Mayo (-37.4 mm) Abril (-35.9 mm) Marzo (-35.3 mm)	Marzo (-40.1 mm) Abril (-38.6 mm) Diciembre (-27.1 mm)	Marzo (-24.0 mm) Abril (-23.1 mm) Febrero (-14.7 mm)
Menor déficit hídrico*	Junio (0 mm) Septiembre (0 mm) Octubre (-23.2 mm)	Junio (0 mm) Septiembre (0 mm) Julio (-2.2 mm)	Junio (0 mm) Julio (0 mm) Septiembre (0 mm)	Mayo (0 mm) Junio (0 mm) Septiembre (0 mm)	Junio (0 mm) Septiembre (0 mm) Octubre (0 mm)	Junio (0 mm) Septiembre (0 mm) Octubre (-14.9 mm)	Septiembre (98.6 mm) Octubre (58.0 mm) Agosto (25.3 mm)

* En el caso de la estación Oyameles-Tlatlauquitepec los números son positivos porque en esos meses se presente un excedente hídrico

Tabla 1. (Continuación)

	Alchichica (laguna) DGE	San Luis Atexcac (DGE)	Libres, Libres (DGE)	Francisco I. Madero (DGE)	Perote-Perote	Zalayeta-Perote	Oyameles- Tlatlauquitepec
Mayor valor de ARM	Septiembre (17.0 mm) Octubre (12.9 mm) Junio (12.1 mm)	Septiembre (49.6 mm) Octubre (41.6 mm) Junio (32.1 mm)	Septiembre (48.5 mm) Octubre (41.8 mm) Julio (36.7 mm)	Septiembre (39.7 mm) Octubre (38.5 mm) Noviembre (27.5 mm)	Octubre (70.8 mm) Noviembre (60.7 mm) Diciembre (47.6 mm)	Septiembre (18.9 mm) Octubre (15.8 mm) Noviembre (11.7 mm)	Julio (100 mm) Agosto (100 mm) Septiembre (100 mm) Octubre (100 mm)
Menor valor del ARM	Mayo (1.77 mm) Abril (2.41 mm) Marzo (3.4 mm)	Mayo (6.6 mm) Abril (7.8 mm) Marzo (10.5 mm)	Mayo (8.1 mm) Abril (8.4 mm) Marzo (10.1 mm)	Abril (5.0 mm) Marzo (7.0 mm) Febrero (10.8 mm)	Mayo (7.7 mm) Agosto (10.0 mm) Julio (11.1 mm)	Mayo (1.8 mm) Abril (2.3 mm) Marzo (3.5 mm)	Mayo (18.0 mm) Abril (21.3 mm) Marzo (28.9 mm)
Mayor ETP	Mayo (76.4 mm) Junio (73.8 mm) Julio (71.1 mm)	Mayo (79.8 mm) Junio (77.0 mm) Julio (71.6 mm)	Mayo (75.3 mm) Junio (75.3 mm) Julio (72.4 mm)	Mayo (73.3 mm) Junio (69.4 mm) Abril (68.7 mm)	Mayo (73.7 mm) Junio (68.1 mm) Abril (66.2 mm)	Mayo (73.8 mm) Junio (73.1 mm) Julio (71.2 mm)	Mayo (68.6 mm) Junio (63.3 mm) Julio (62.7 mm)
Menor ETP	Diciembre (34.4 mm) Enero (34.6 mm) Febrero (36.8 mm)	Enero (37.0 mm) Diciembre (38.5 mm) Febrero (39.1 mm)	Enero (38.8 mm) Diciembre (39.6 mm) Febrero (42.9 mm)	Enero (39.4 mm) Diciembre (39.6 mm) Noviembre (43.2 mm)	Enero (37.6 mm) Diciembre (38.4 mm) Febrero (39.3 mm)	Enero (32.0 mm) Diciembre (34.2 mm) Febrero (35.2 mm)	Diciembre (39.0 mm) Enero (39.8 mm) Noviembre (40.3 mm)
Mayor ETR	Junio (73.8 mm) Septiembre (63.0 mm) Agosto (58.0 mm)	Junio (77.1 mm) Julio (69.5 mm) Mayo (64.9 mm)	Junio (75.3 mm) Julio (72.5 mm) Mayo (71.8 mm)	Mayo (73.3 mm) Junio (69.4 mm) Julio (65.3 mm)	Junio (68.1 mm) Septiembre (58.0 mm) Agosto (52.8 mm)	Junio (73.1 mm) Septiembre (57.9 mm) Mayo (50.8 mm)	Junio (63.3 mm) Julio (62.0 mm) Agosto (59.5 mm)
Menor ETR	Diciembre (6.5 mm) Enero (9.0 mm) Noviembre (10.0 mm)	Enero (13.8 mm) Diciembre (14.2 mm) Febrero (15.7 mm)	Enero (15.2 mm) Diciembre (16.5 mm) Febrero (18.9 mm)	Febrero (13.9 mm) Enero (14.2 mm) Diciembre (14.4 mm)	Febrero (21.4 mm) Enero (21.8 mm) Marzo (22.0 mm)	Diciembre (7.1 mm) Enero (8.4 mm) Febrero (9.5 mm)	Febrero (25.8 mm) Enero (29.7 mm) Marzo (30.2 mm)

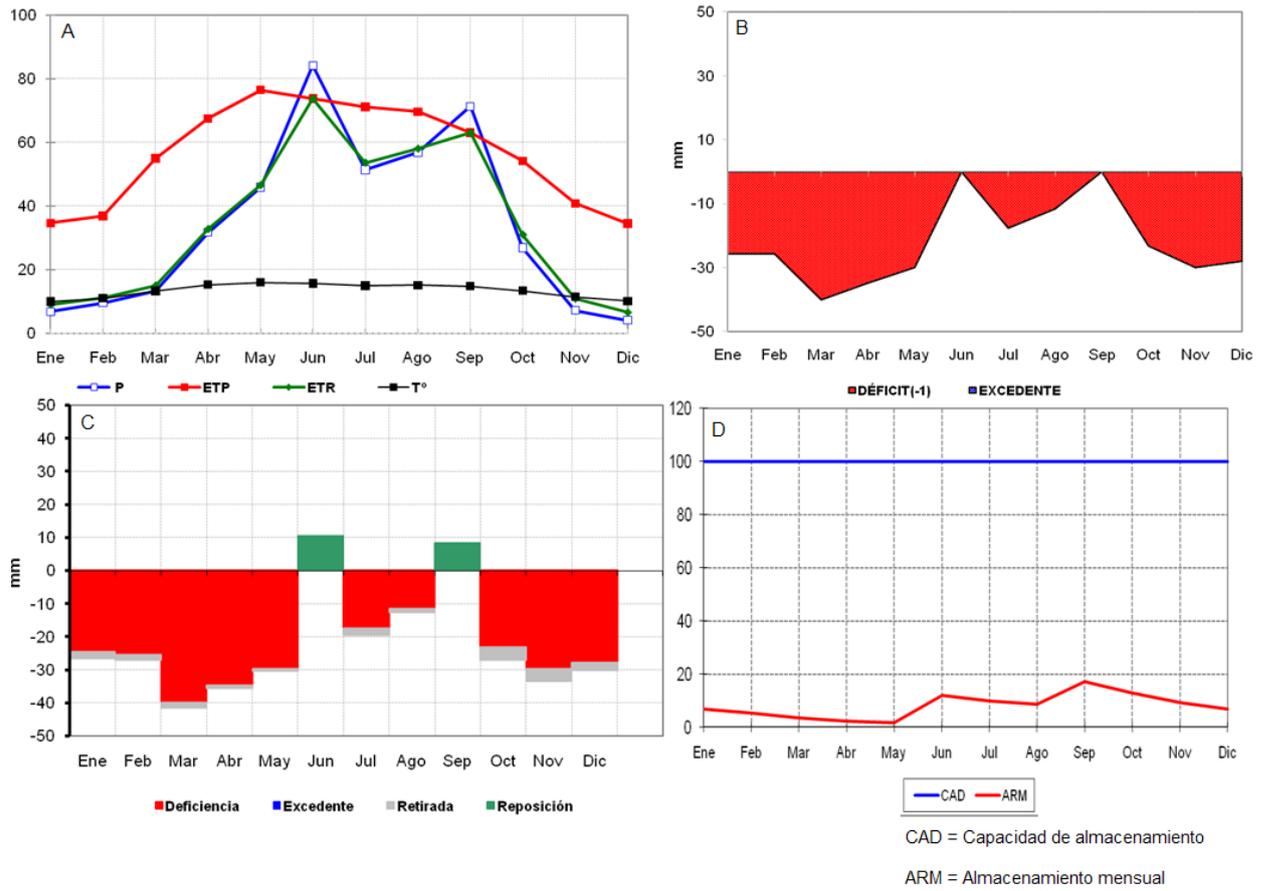


Fig. 10. Estación Alchichica (laguna), DGE: balance hídrico (A), extracto del balance hídrico (B), deficiencia, excedente, retirada y reposición hídrica a lo largo del año (C), almacenamiento mensual (D) y climograma (E)

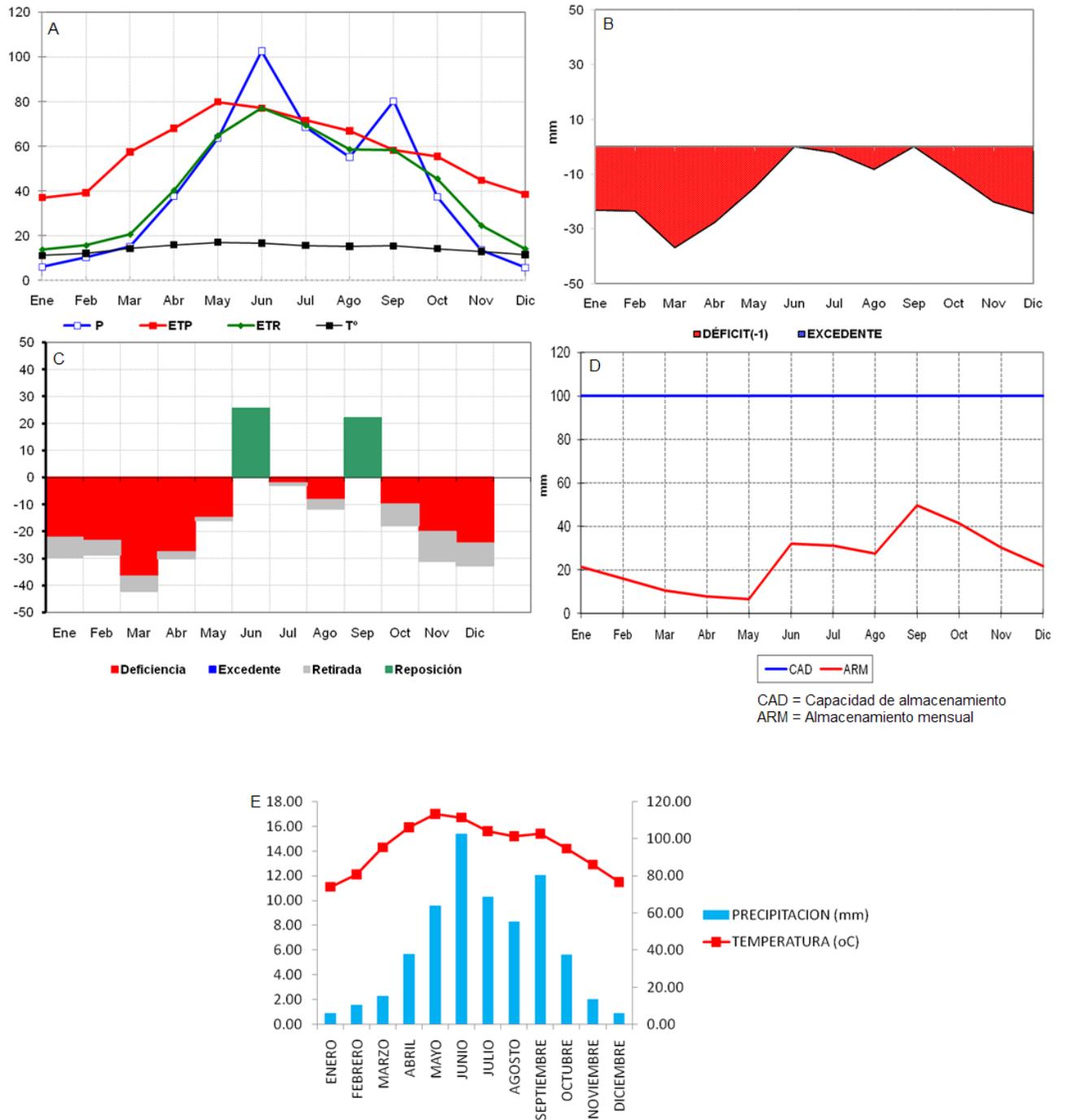


Fig. 11. Estación San Luis Atexcac (DGE): balance hídrico (A), extracto del balance hídrico (B), deficiencia, excedente, retirada y reposición hídrica a lo largo del año (C), almacenamiento mensual (D) y climograma (E)

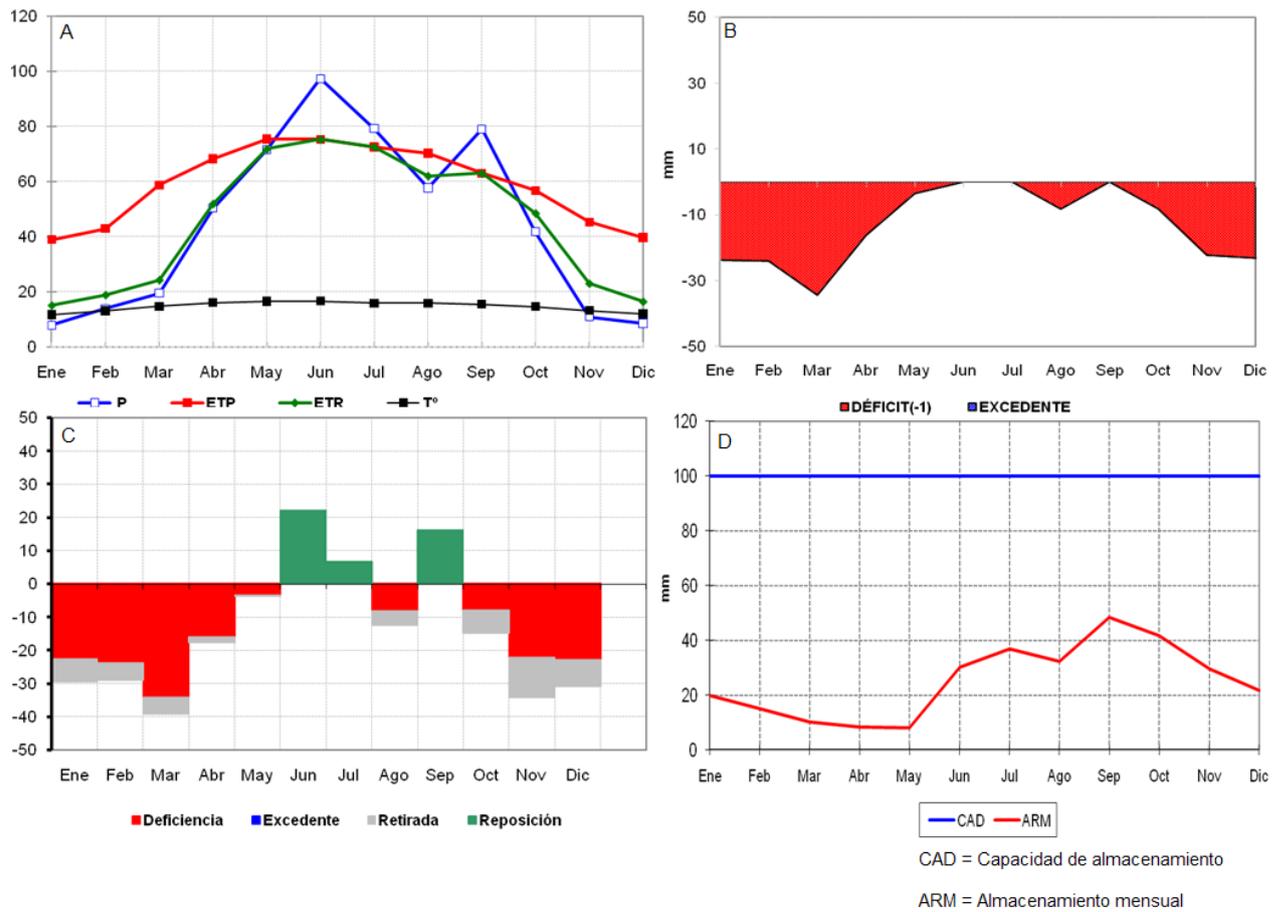


Fig. 12. Estación Libres, Libres (DGE): balance hídrico (A), extracto del balance hídrico (B), deficiencia, excedente, retirada y reposición hídrica a lo largo del año (C), almacenamiento mensual (D) y climograma (E)

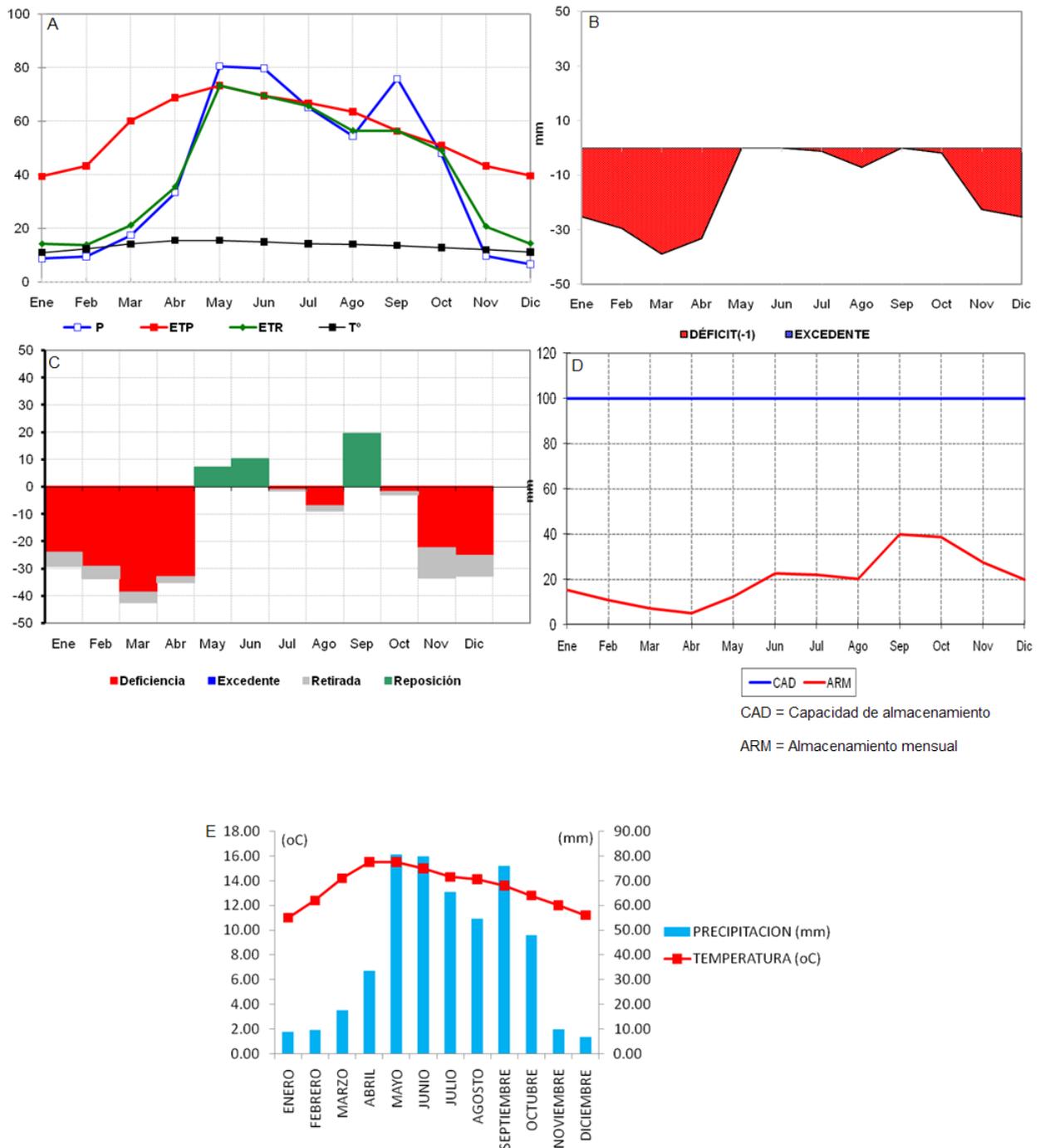


Fig. 13. Estación Francisco I. Madero (DGE): balance hídrico (A), extracto del balance hídrico (B), deficiencia, excedente, retirada y reposición hídrica a lo largo del año (C), almacenamiento mensual (D) y climograma (E) así como los resultados del balance hídrico

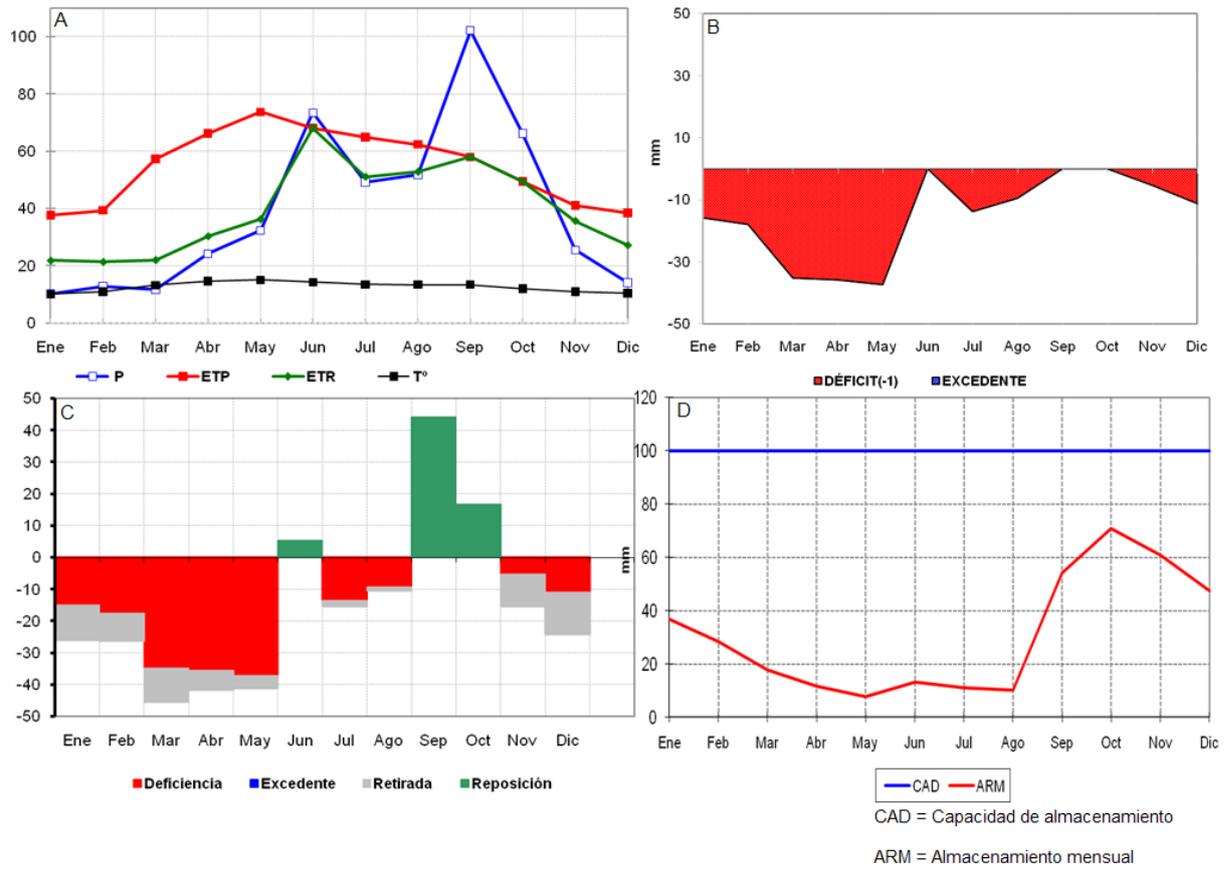


Fig. 14. Estación Perote, Perote: balance hídrico (A), extracto del balance hídrico (B), deficiencia, excedente, retirada y reposición hídrica a lo largo del año (C), almacenamiento mensual (D) y climograma (E)

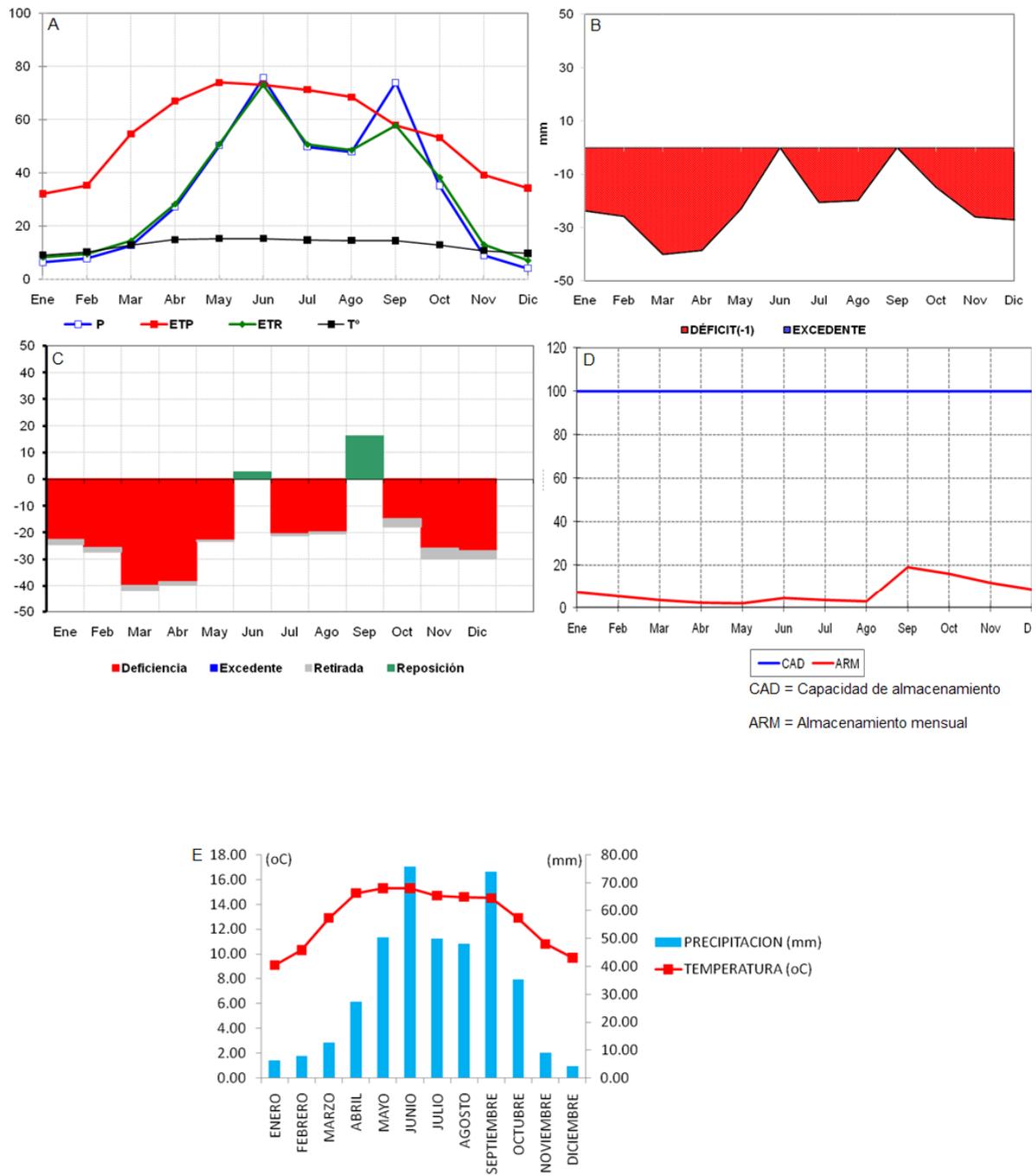


Fig. 15. Estación Zalayeta-Perote: balance hídrico (A), extracto del balance hídrico (B), deficiencia, excedente, retirada y reposición hídrica a lo largo del año (C), almacenamiento mensual (D) y climograma (E)

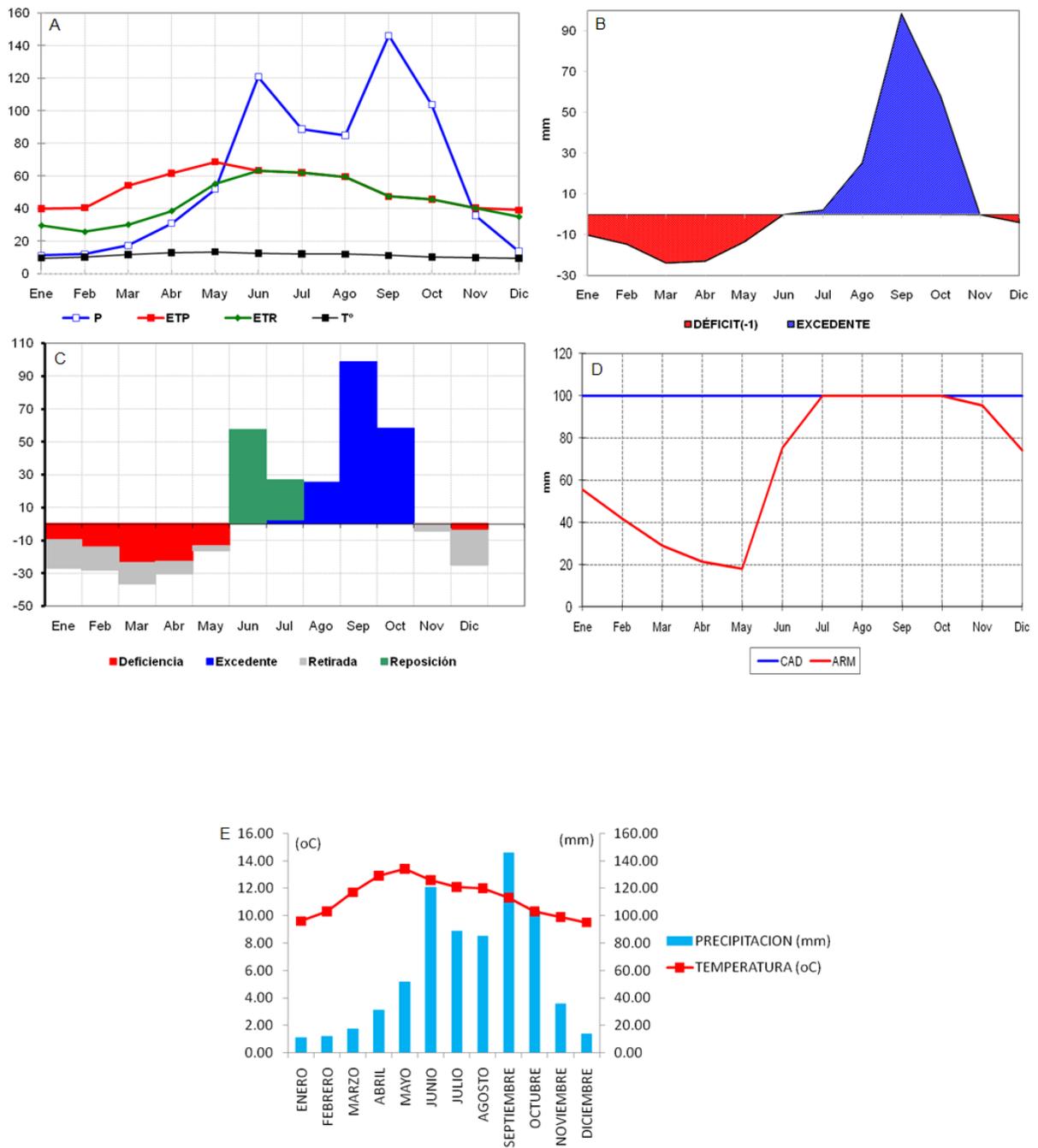


Fig. 16. Estación Oyameles, Tlatlauquitepec : balance hídrico (A), extracto del balance hídrico (B), deficiencia, excedente, retirada y reposición hídrica a lo largo del año (C), almacenamiento mensual (D) y climograma (E)

7.5) Variabilidad climática en la estación Alchichica (laguna), DGE

7.5.1) Precipitación:

El análisis de la precipitación no indica una tendencia definida en el comportamiento de las lluvias (Fig 17-P1). El valor del coeficiente de determinación de la regresión lineal es de 0.02, indicando que no existe una disminución o aumento de la precipitación través del tiempo.

El valor promedio de las precipitaciones es de 394 mm anuales. El análisis con medias suavizadas (n=5) (Fig 17-P2) y la gráfica de residuos (Fig 17-P3), muestran una fuerte variabilidad alrededor del valor normal, con periodos húmedos y secos a lo largo de la serie.

Se presentan dos periodos secos en la serie: el primero de 1985 a 1991 y el segundo de 2000 a 2006, dando un total de 14 años (38%) en los cuales las precipitaciones fueron menores que el promedio. En los años 1982 (276 mm acumulados), 1986 (239 mm acumulados) y 1987 (233 mm acumulados) es cuando se tienen registradas las sequías meteorológica más intensas. Así mismo, se tienen dos periodos húmedos: el primero de 1970 a 1984 y el segundo de 1992 a 1999, dando un total de 23 años (62%) en los cuales las precipitaciones fueron más altas que el promedio. Los años con mayores precipitaciones registradas en el área de influencia de la estación meteorológica fueron 1981 (581 mm acumulados), 1974 (556 mm acumulados), 1995 (555 mm acumulados) y 1976 (542 mm acumulados).

7.5.2) Evaporación:

El análisis de la evaporación no indica una tendencia definida en el comportamiento de esta variable. El valor del coeficiente de determinación de la regresión lineal es de 0.01, indicando que no existe una disminución o aumento de la evaporación través del tiempo. (Fig. 17-E1).

El valor promedio de la evaporación es de 1711 mm anuales. El análisis con medias suavizadas (n=5) (Fig 17-E2) y la gráfica de residuos (Fig 17-E3) indican una fuerte variabilidad alrededor del valor normal, con periodos de mayor y menor evaporación al promedio a lo largo de la serie.

Se tienen cuatro periodos de menor evaporación al promedio: el primero de 1970 a 1978, el segundo de 1983 a 1984, un tercero de 1992 a 1994, y el último de 2002 a 2006, dando un total de 19 años (52%) donde la evaporación fue menor al promedio. Los años 2005-2006 son los que presentan la menor tasa de evaporación en la serie (1543 y 1444 mm acumulados respectivamente). Por otra parte, existen 3 periodos de mayor evaporación al promedio: el primero de 1979 a 1982, el segundo de 1985 a 1991 y el último es de 1995 a 2001, dando un total de 18 años (48%) donde la evaporación fue superior al promedio. Los años 1987 (1891

mm acumulados) y 1977 (1850 mm acumulados) así como 1996 (1838 mm acumulados) y 1986-1987 (1829 y 1891 mm acumulados respectivamente) presentan el registro de la mayor evaporación en la serie.

7.5.3) Temperatura:

El análisis de la temperatura muestra el aumento de este parámetro a través del tiempo. El valor del coeficiente de determinación de la regresión lineal es de 0.61, el cual verifica que a través del tiempo existe un aumento en la temperatura en la región (Fig. 17-T1).

El valor promedio de la temperatura es de 13.5⁰C. El análisis con medias suavizadas (n=5) (Fig. 23-T2) y la gráfica de residuos (Fig. 17-T3) muestran el incremento en la temperatura.

Se tiene un periodo frío de 1970 a 1986, dando un total de 17 años (46%) en los cuales la temperatura fue menor al promedio. La menor temperatura promedio se tiene registrada en el periodo de 1974-1975-1976 (12.4⁰C, 12.7⁰C y 12.5⁰C respectivamente). Por otra parte, el periodo cálido abarca de 1987 a 2006, dando un total de 20 años (54%) donde la temperatura fue mayor al promedio. La mayor temperatura promedio se tiene registrada en los años 1995 y 1997 (14.6⁰C y 14.5⁰C respectivamente).

7.5.4) Correlación entre las variables precipitación/temperatura/evaporación

Precipitación/temperatura (Fig. 17-P4): el análisis de correlación indica un valor de -0.11 que no es concluyente respecto de cómo varía la precipitación en relación con la temperatura.

Evaporación/precipitación (Fig. 17-E4): El análisis de correlación indica un valor de -0.3 que no es concluyente respecto de cómo varía la evaporación en relación con la precipitación.

Temperatura/evaporación (Fig. 17-T4): el análisis de correlación indica un valor de 0.2 que no es concluyente respecto de cómo varía la evaporación en relación con la temperatura.

Tabla 2. Análisis de correlación de las variables climáticas de la estación Alchichica

	<i>Precipitación</i>	<i>Evaporación</i>	<i>Temperatura</i>
Precipitación	1		
Evaporación	-0.3	1	
Temperatura	-0.1	0.2	1

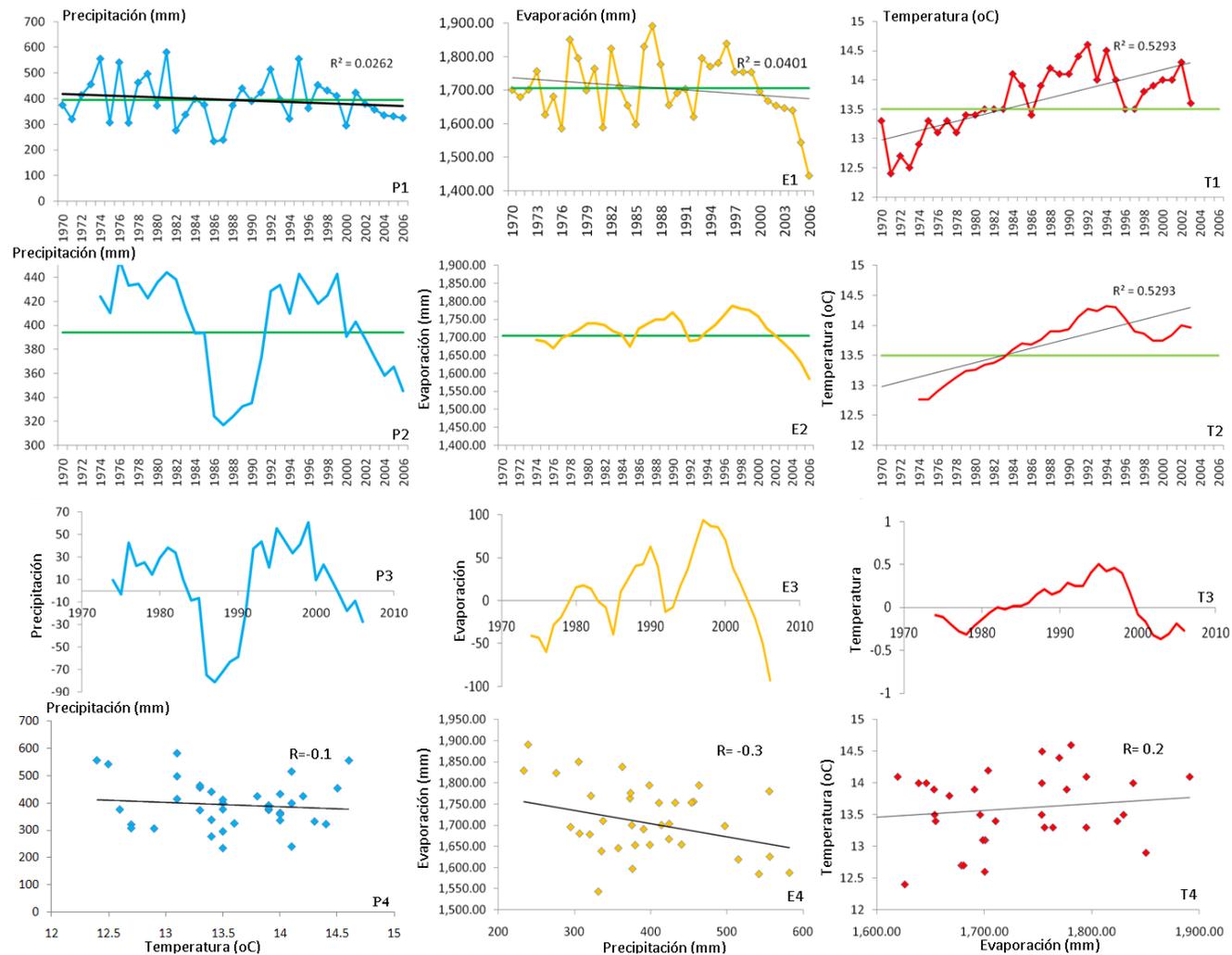


Fig. 17. Distribución de las variables climáticas a través del tiempo en la estación Alchichica (1= serie a través del tiempo; 2= gráficas de medias suavizadas; 3= gráficas de residuos; 4= gráficas de dispersión). En azul se muestra las tendencias de las precipitaciones, en amarillo las tendencias de la evaporación y en rojo las tendencias de la temperatura

7.6) Disponibilidad y uso de agua en la subcuenca Perote-Libres:

Dentro de la subcuenca Perote-Libres se encuentra la totalidad de los municipios Libres, Ocoatepec, Cuyoaco, Tepeyahualco y Guadalupe Victoria (en el estado de Puebla), mientras que de manera parcial se encuentran los municipios de Ixtacamaxtitlán, Xiutetelco, Chignautla Lafragua y Oriental (Puebla), así como Perote, Ayahualulco, Jalacingo, Altotonga y Villa Aldama (Veracruz) (Fig. 18).

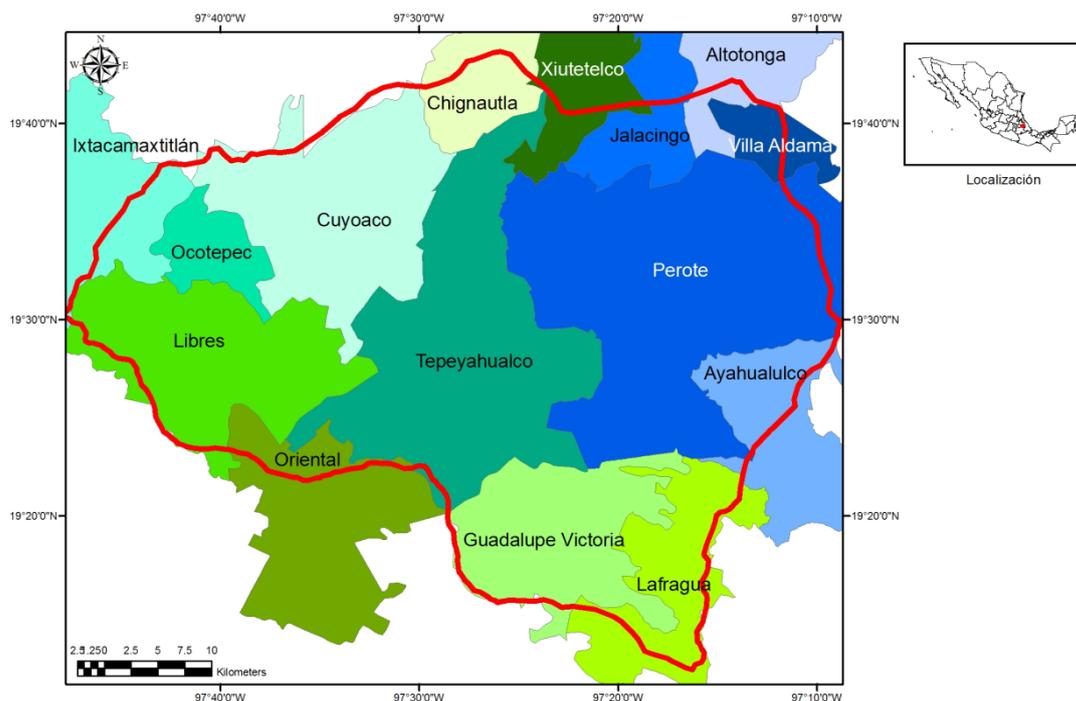


Fig. 18. División municipal de la subcuenca Perote-Libres

7.6.1) Uso de agua en la subcuenca Perote-Libres (Fig. 19)

El volumen total de agua concesionado en el área de estudio es de 91.2 Mm³/año de los cuales el 96% (87.0 Mm³/año) es agua subterránea y el 4% restante (4.2 Mm³/año) es agua superficial.

El agua subterránea, se extrae principalmente del acuífero Libres-Oriental (75% = 65.6 Mm³/año) y en menor proporción del acuífero Perote-Zalayeta (25% = 21.4 Mm³/año). El agua superficial es obtenida de arroyos y ríos que se localizan en las zonas altas de la subcuenca.

El uso agrícola del recurso acapara el 82% (74.7 Mm³/año) del total del agua utilizada en el área de estudio, mientras que el uso público-urbano y doméstico utiliza el 11% (10.0 Mm³/año). El resto de las actividades (ganadería, mixto, industria, acuacultura y servicios) emplean el 7% (6.5 Mm³/año) del agua concesionada en la subcuenca Perote-Libres.

En lo que se refiere al agua subterránea, el 86% (74.5 Mm³/año) es utilizada para la agricultura, mientras que el 7% (6.5 Mm³/año) es de uso público-urbano y doméstico. El 7% restante (5.9 Mm³/año) es de uso ganadero, industrial, mixto, acuicultura y servicios.

Por otra parte, el agua superficial es principalmente de uso público urbano y doméstico (82% = 3.5 Mm³/año). El uso agrícola es de únicamente 0.16 Mm³/año (4%) y el resto (14% = 0.6 Mm³/año) es de uso ganadero, industrial y mixto.

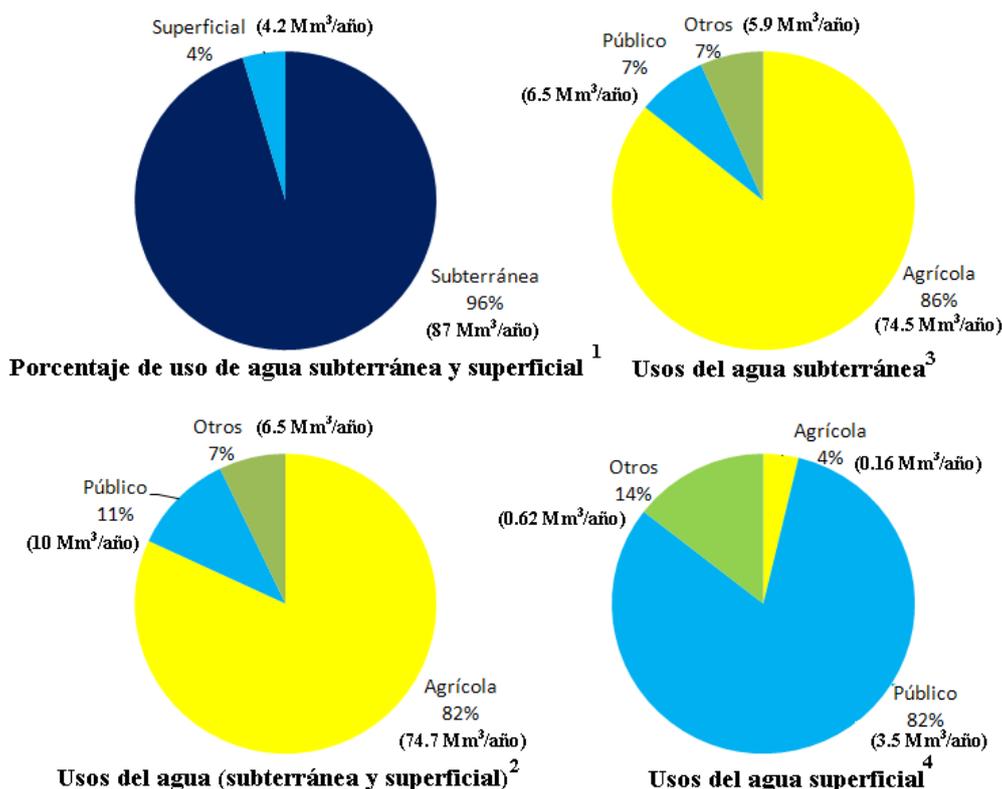


Fig. 19. Usos y volúmenes de agua en la subcuenca Perote-Libres

7.6.2) Consumo de agua en la subcuenca Perote-Libres

Consumo total:

Los municipios que presentan el mayor consumo de agua son Libres (25 Mm³/año), Tepeyahualco (13.8 Mm³/año), Perote (13.4 Mm³/año) y Guadalupe Victoria (13.2 Mm³/año). En estos municipios se consume el 71% (65.4 Mm³/año) del agua que está concesionada en el área de estudio (Figs. 20-A; y 21-A).

Uso agrícola:

El sector agrícola tiene las mayores concesiones de agua en los municipios de Libres (22.9 Mm³/año), Tepeyahualco (12.6 Mm³/año) Guadalupe Victoria (11.2 Mm³/año), y Perote (10.2

Mm³/año). Estos cuatro municipios consumen el 77% (57 Mm³/año) del agua concesionada para la agricultura en el área de estudio (Figs. 20-B y 21-B).

Uso público urbano:

Las mayores concesiones se encuentran en Perote (2.18 Mm³/año), Guadalupe Victoria (1.9 Mm³/año), Libres (1.7 Mm³/año), Cuyoaco (1.0 Mm³/año) y Tepeyahualco (0.9 Mm³/año). En estos municipios se concesiona el 77% (7.7 Mm³/año) del agua para este sector (Figs. 20-C y 21-C).

Otros usos:

En el resto de los usos de agua (pecuario, industrial, múltiple, servicios y acuacultura) los municipios de Chignautla (3.4 Mm³/año) y Perote (1.0 Mm³/año) tienen las mayores concesiones; en estas dos entidades se presenta el 68% (4.4 Mm³/año) del consumo total en estos sectores (Figs. 20-D y 21-D).

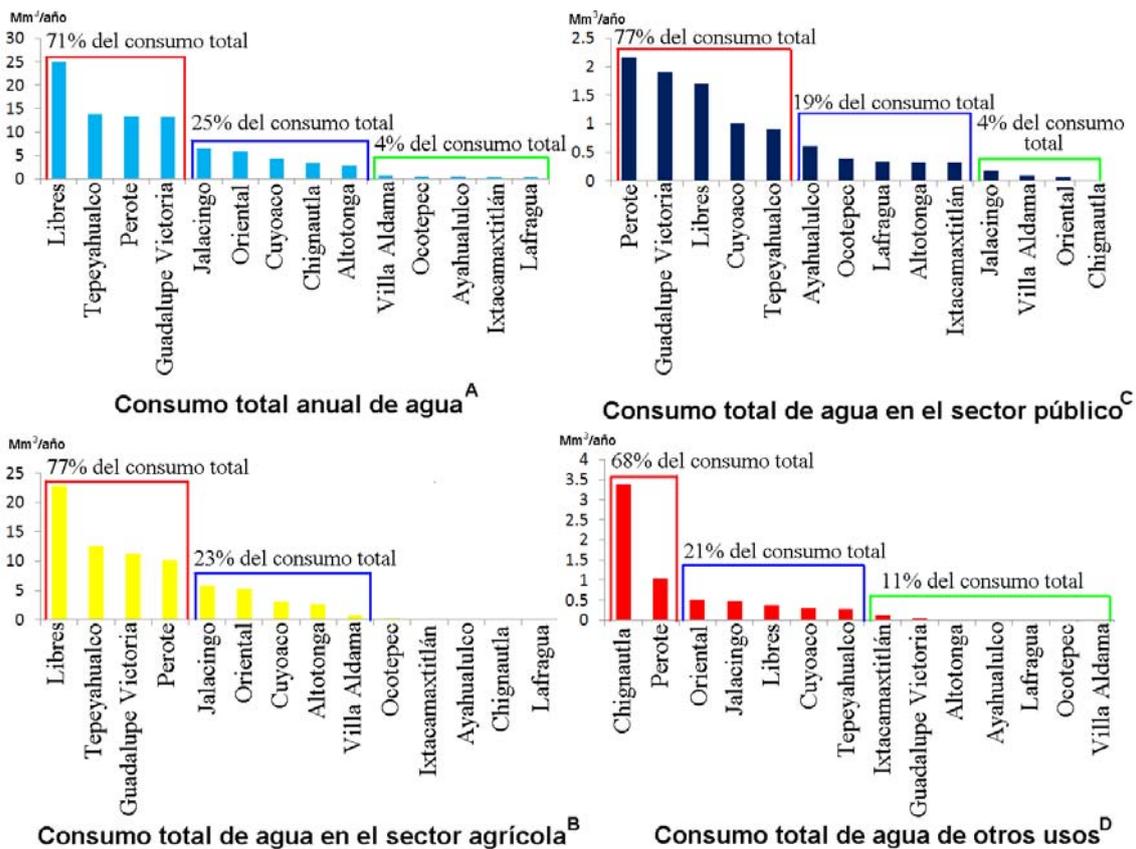


Fig. 20. Consumo de agua en los municipios de la subcuenca Perote-Libres (Mm³/año)

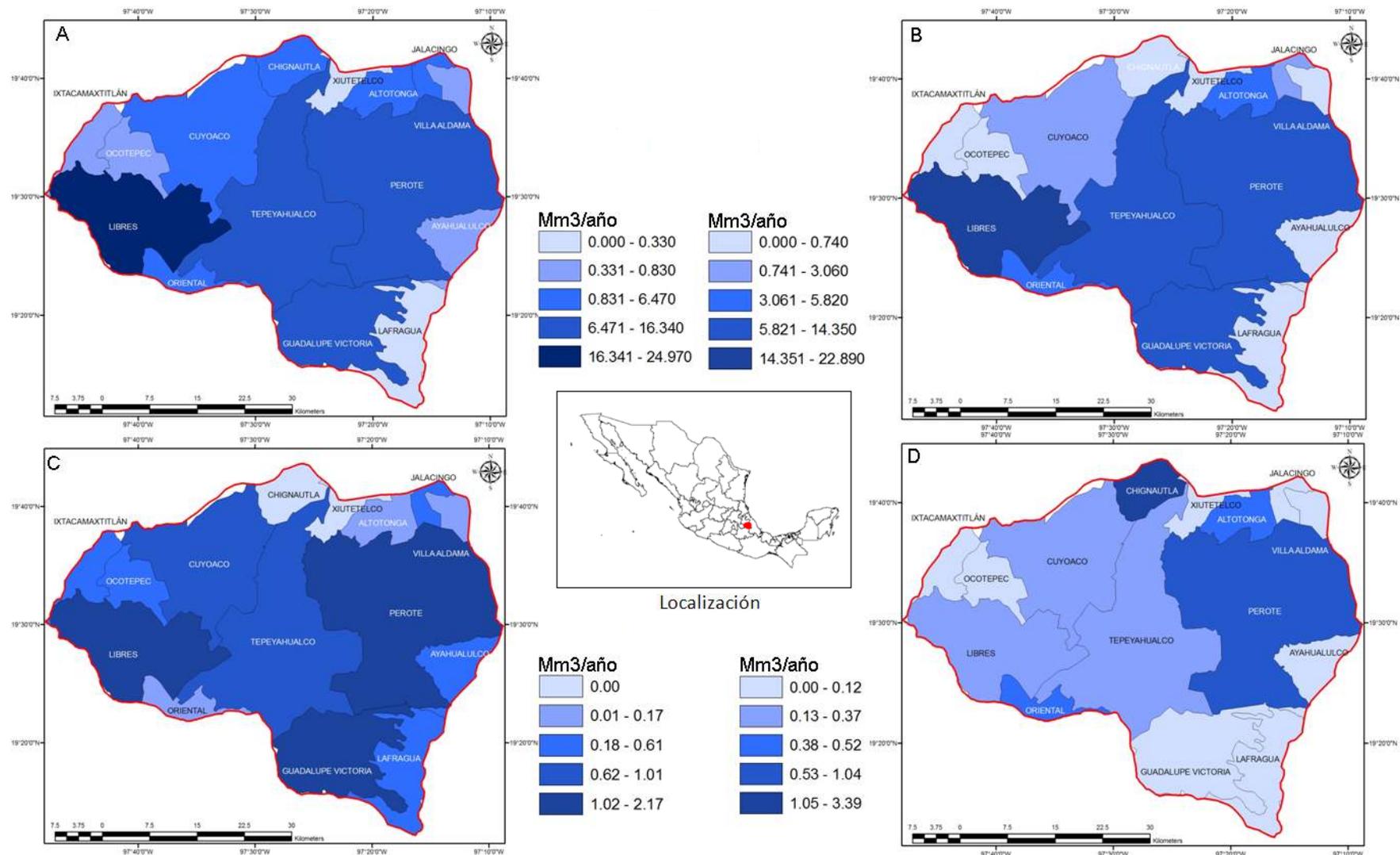


Fig. 21. Distribución de los volúmenes concesionados de agua (Mm³/año) en la subcuenca Perote-Libres: volumen total concesionado (A), volumen total concesionado para uso agrícola (B) y volumen total concesionado para uso público (C) y volumen total concesionado para otros usos (D)

Pozos:

En el área de estudio se encuentra un total de 593 pozos censados. De estos, 459 (77%) son utilizados para la agricultura, 95 (16%) son de uso público-urbano-doméstico y los 40 restantes (7%) se utilizan para los usos ganadero, industrial, mixto, servicios y acuicultura (Fig. 23B). Así mismo, existen 99 tomas de agua superficial, representadas por bombas de extracción y norias. Un total de 30 tomas de agua superficial (30%) se utilizan para la agricultura, mientras que las 69 restantes (70%) son para uso público-urbano.

En el municipio de Tepeyahualco es donde se encuentra la mayor concentración de pozos de uso agrícola con 183 (40%), mientras que en los municipios de Ayahualulco, Chignautla, Ixcatacamxtitlán, Lafragua y Xiutetelco (que se encuentran de manera parcial en la subcuenca) no hay registrados pozos de extracción del recurso (Fig. 23-B).

El promedio de extracción de agua de los pozos agrícolas en el área de estudio es de 421 m³/pozo/día. Los municipios donde se encuentran los pozos con mayor extracción promedio de agua al año son Villa Aldama (936.6 m³/pozo/día), Altotonga (725.4 m³/pozo/día) y Guadalupe Victoria (701.7 m³/pozo/día). Los municipios donde se localizan los pozos con menor extracción promedio son Oriental (313 m³/pozo/día) y Tepeyahualco (188.5 m³/pozo/día) (Figs. 22 y 23-C y Tabla 4).

Los pozos se encuentran a una profundidad promedio de 83.6 m, sin embargo, en la zona de la laguna el Salado se pueden encontrar entre 4-6 m de profundidad y hasta un máximo de 40 m. En las partes altas del área de estudio y en la zona de los municipios de Perote y Villa Aldama, los pozos se encuentran entre 130 y hasta 490 m de profundidad. En la zona geotérmica de los Humeros, los pozos se encuentran perforados a una profundidad promedio de 2,124 m (Fig. 23-D).

En la mayor parte del área de estudio no hay pozos. En las zonas con poblaciones y campos agrícolas, la densidad es en promedio de 1-3 pozos/km². La mayor densidad se encuentra en los límites de Tepeyahualco y Libres, donde se presentan zonas con densidades de 4-5 y hasta de 6-7 pozos/km². En el límite Este de la subcuenca, en el municipio de Oriental, se localiza otra zona con una densidad de 4-5 pozos/km² (Fig. 24-A).

Por otra parte, en el centro de la subcuenca (municipio de Tepeyahualco) la extracción de agua por km² es la más baja en la región. El volumen concesionado en esta zona oscila de 0.27 a 70 m³/km²/año con algunas zonas donde se extraen hasta 166.4 m³/km²/año. En las áreas cercanas a

los lagos Alchichica y Quechulac existen puntos aislados que oscilan de los 324 a 600 $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ (Fig. 24-B).

Las extracciones son más altas cerca de los núcleos urbanos importantes de la zona: Libres, Perote y Guadalupe Victoria, donde se tienen varias zonas que oscilan de 324 a más de 1,000 $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ (Fig. 24-B).

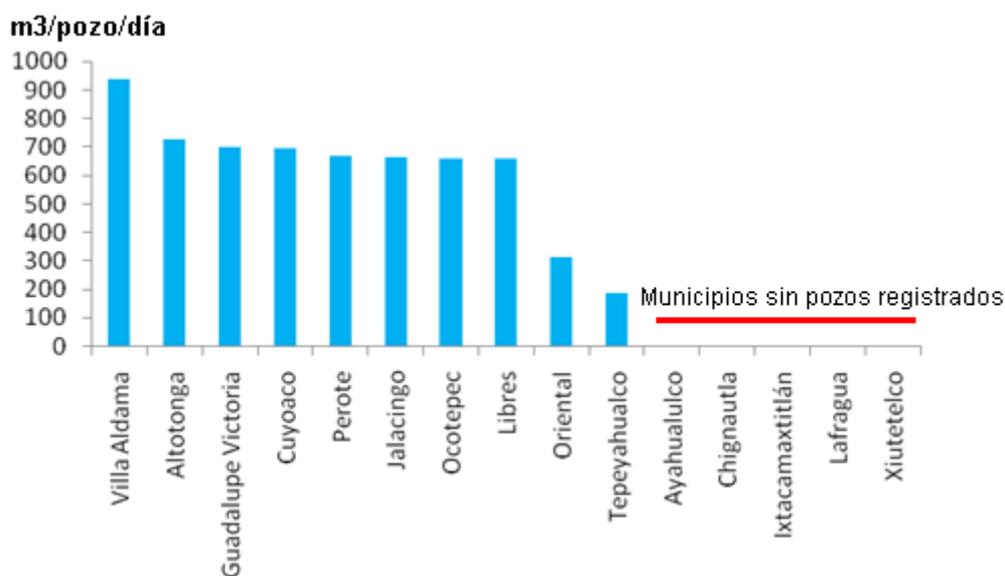


Fig. 22. Volumen promedio de extracción de los pozos de uso agrícola de la subcuenca Perote-Libres

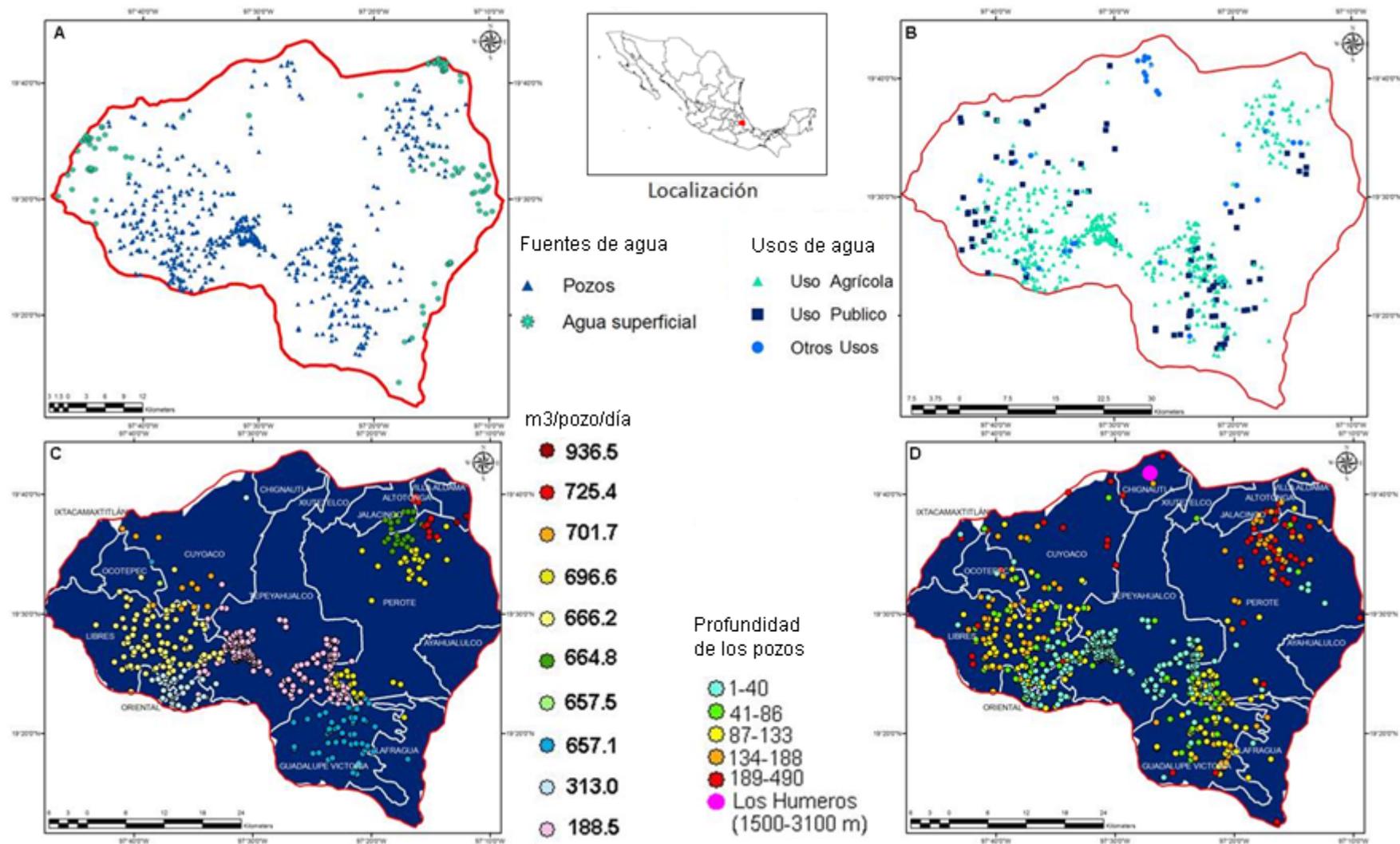


Fig. 23. Distribución de las fuentes de agua en la subcuenca Perote-Libres: pozos y tomas de agua superficial (A), distribución de los pozos según el uso (B), promedio de extracción de pozos según el municipio (C) y profundidad de los pozos (D)

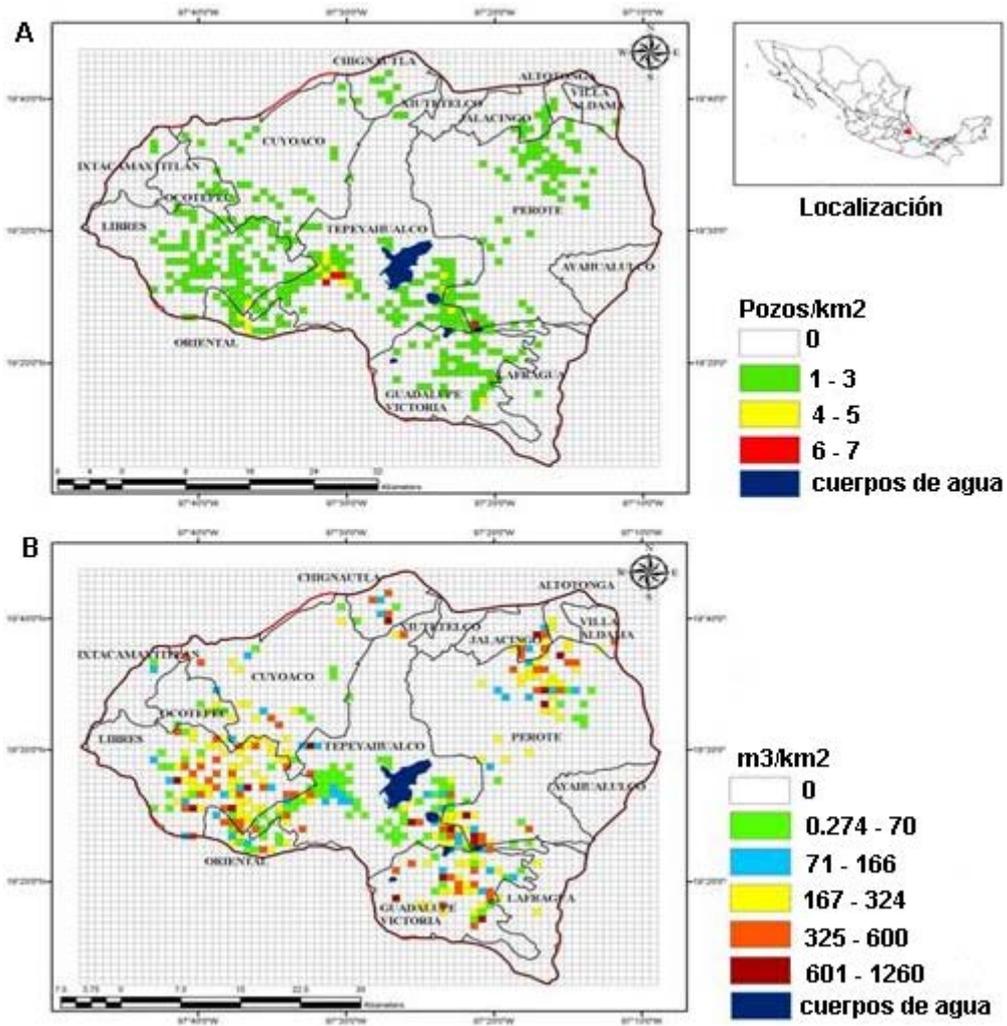


Fig. 24. Distribución de la densidad de pozos/km² (A) y extracción anual de agua (m³/km²) (B)

Consumo de agua en la agricultura

La agricultura de riego ocupa 11,083 ha en el área de estudio. El 84% (8,359 ha) de las zonas agrícolas de riego se encuentran en los municipios de Libres (4,229 ha), Guadalupe Victoria (2,650 ha), Perote (1,305 ha) y Tepeyahualco (1,075 ha). El 16% restante (1,824 ha) se localizan en los municipios de Jalacingo (867 ha), Altotonga (469 ha.), Cuyoaco (418 ha) y Villa Aldama (70 ha). En el resto de los municipios (Oriental, Ocotepéc, Ixtacamaxtitlán, Lafragua, Chignautla, Ayahualulco y Xiutetelco) no se presenta la agricultura de riego (Fig. 27-A).

Los cultivos más representados son: maíz de grano (3,671 ha), haba de grano (1,845 ha), papa (1,394 ha), maíz forrajero (1,000 ha) y alfalfa (983 ha). Estos cinco cultivos ocupan el 81% (8,893 ha) del total de superficie sembrada bajo modalidad de riego (Fig. 25 y Tabla 3)

El promedio de consumo de agua en el sector agrícola es de 6,740 m³/ha/año. El mayor consumo se localiza en los municipios de Tepeyahualco (11,711 m³/ha/año) y Villa Aldama (10,428 m³/ha/año). En los municipios de Libres (5,410 m³/ha/año) y Guadalupe Victoria (4,226 m³/ha/año) es donde se presenta el menor consumo de agua/ha (Figs. 26 y 27-B y C).

Tabla 3. Cultivos de riego en los municipios de la subcuenca Perote-Libres (valores en hectáreas)

Municipios Cultivos									
	Altotonga	Cuyoaco	Guadalupe Victoria	Jalacingo	Libres	Perote	Tepeyahualco	Villa Aldama	Total
Maiz grano	200	80	1000	276	1100	300	700	15	3671
Haba grano	110	0	400	105	1000	230	0	0	1845
Papa	159	0	500	295	0	400	0	40	1394
Maiz forrajero	0	0	0	0	1000	0	0	0	1000
Alfalfa verde	0	13	300	0	400	0	270	0	983
Brocoli	0	300	0	20	300	0	0	0	620
Zanahoria	0	25	100	0	20	300	60	0	505
Haba verde	0	0	200	0	150	0	0	0	350
Tomate verde	0	0	0	15	120	15	25	15	190
Avena forrajera	0	0	0	156	0	0	0	0	156
Frijol	0	0	150	0	0	0	0	0	150
Pastos	0	0	0	0	105	0	0	0	105
Ajo	0	0	0	0	0	60	0	0	60
Lechuga	0	0	0	0	10	0	20	0	30
Calabacita	0	0	0	0	20	0	0	0	20
Tomate rojo	0	0	0	0	4.7	0	0	0	4.7
Total	469	418	2650	867	4229.7	1305	1075	70	11083.7

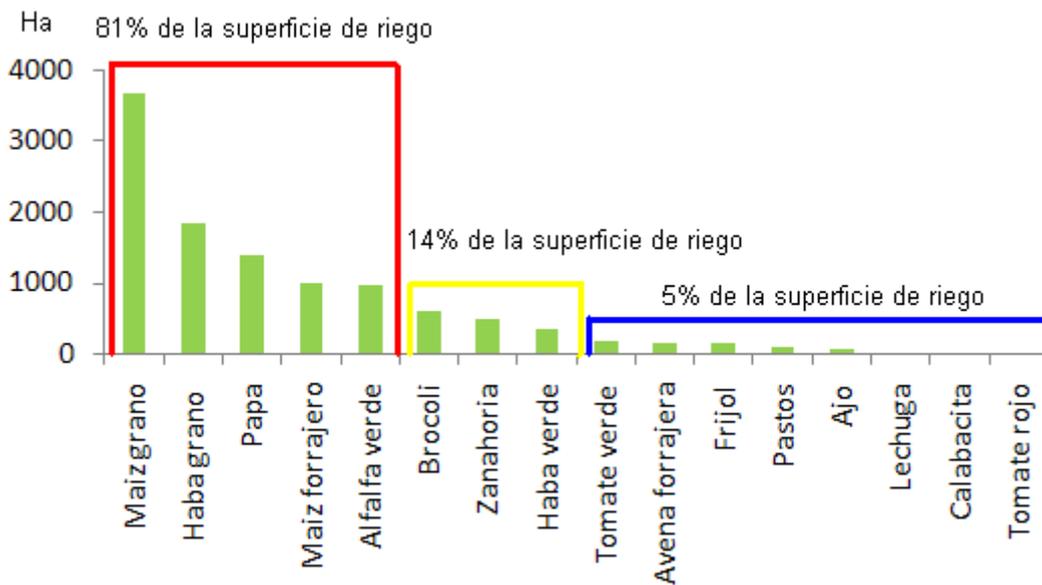


Fig. 25. Extensiones (ha) de los cultivos bajo la modalidad de riego en la subcuenca Perote-Libres

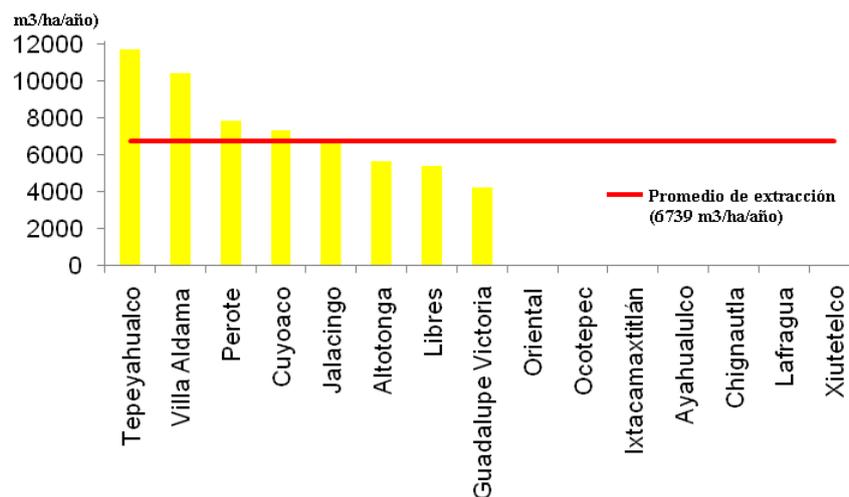


Fig. 26. Volumen concesionado de agua de uso agrícola y dotación media anual de agua por hectárea según el municipio

Granjas Carroll:

La empresa Granjas Carroll de México tiene once concesiones de agua subterránea (cuatro en el municipio de Jalacingo, dos en Guadalupe Victoria, Oriental y Tlachichuca y una en Perote) que le permiten la extracción de 1.4 Mm³/año de agua. Cuatro de estas concesiones son para uso agrícola, cuatro para uso pecuario, dos para uso múltiple y una para uso industrial. En total, se encuentran 46 granjas productoras de cerdos de esta empresa, por lo cual, cada granja utiliza en promedio 83.8 m³/día (83,798 L/día) (ver ubicación de pozos en Anexo VII).

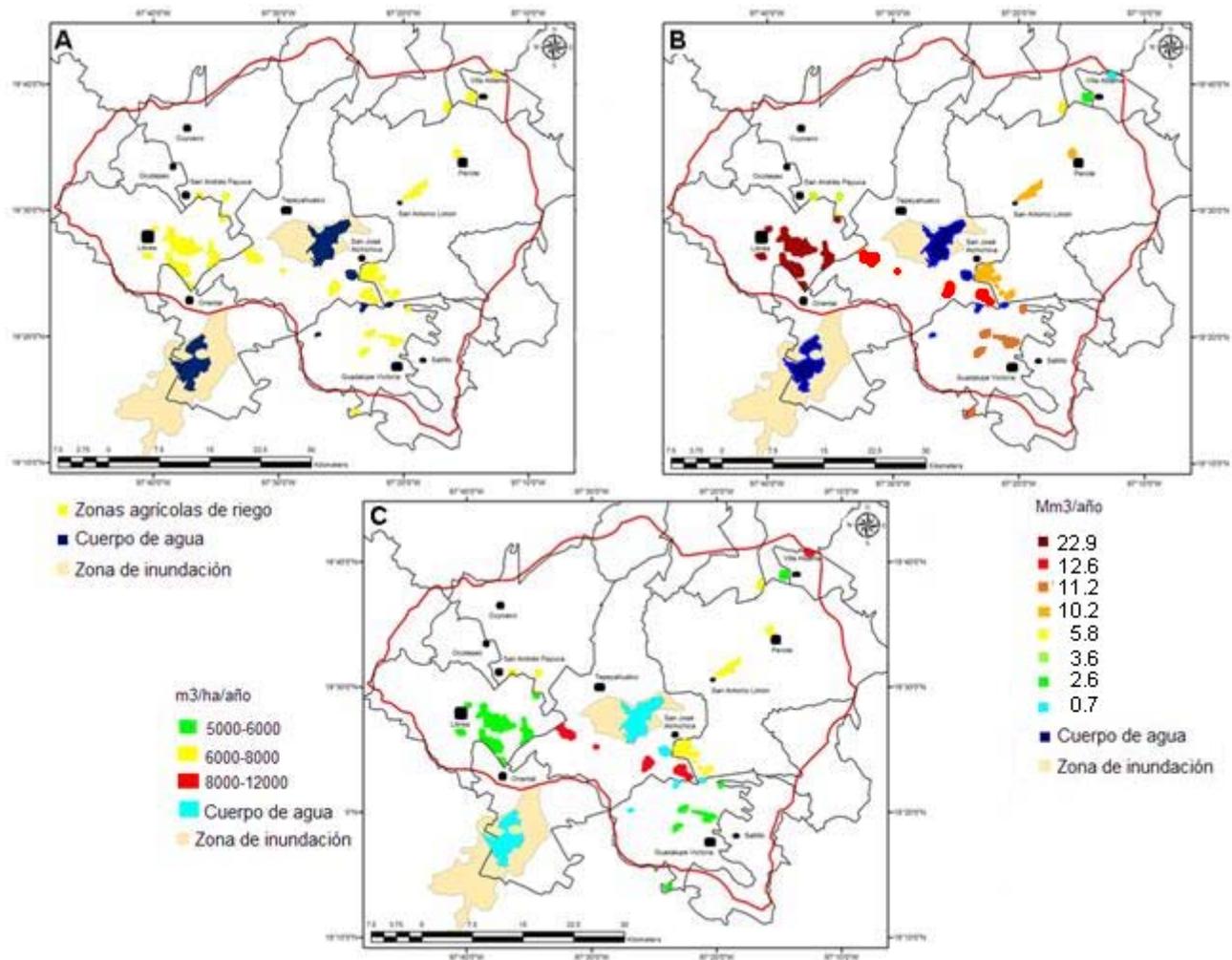


Fig. 27. Áreas agrícolas de riego en la subcuenca Perote-Libres y consumo de agua: localización de zonas de riego (A), volumen concesionado para riego según el municipio (B) y dotación media anual de agua por hectárea según el municipio (C) (Fuentes: INEGI, 2010c; OEIDRUS, 2010a,b; CONAGUA, 2010b)

7.6.3) Disponibilidad de agua per-cápita

La población total en la subcuenca Perote-Libres es de 167,467 habitantes a 2005. El municipio de Perote presenta la mayor población de la región (50,989 h), seguido por Libres (25,719 h), Tepeyahualco (15,268 h), Guadalupe Victoria (14,833 h) y Cuyoaco (14,147 h). Los municipios que se encuentran de manera parcial en el área de estudio presentan las menores poblaciones, siendo Chignautla (365 h) y Xiutetelco (237 h) las regiones del área de estudio con menos habitantes (Fig. 29-A).

Los habitantes de la subcuenca Perote-Libres reciben un promedio de 164 L/hab/día (0.164 m³/día). En el municipio de Guadalupe Victoria se tiene la mayor dotación *per-cápita* de la zona (351 L/hab/día = 0.351 m³/día), seguido por las zonas parciales de Altotonga (272 L/hab/día = 0.272 m³/día), Ayahualulco (222 L/hab/día = 0.222 m³/día) y el municipio de Ocoteppec (216 L/hab/día = 0.216 m³/día). En el municipio de Oriental (18 L/hab/día = 0.018 m³/día), Ixtacamaxtitlán (20 L/hab/día = 0.020 m³/día) y Villa Aldama (41 L/hab/día = 0.41 m³/día) se tiene la menor disponibilidad de agua *per-cápita*. Se debe mencionar que estos municipios se encuentran de manera parcial dentro de la subcuenca Perote-Libres. El promedio de dichos municipios considerando su territorio y concesiones fuera de la subcuenca es de 176 (0.176 m³/día), 698 (0.698 m³/día) y 111 (0.111 m³/día) L/hab/día respectivamente (Figs. 28 y 29-B).

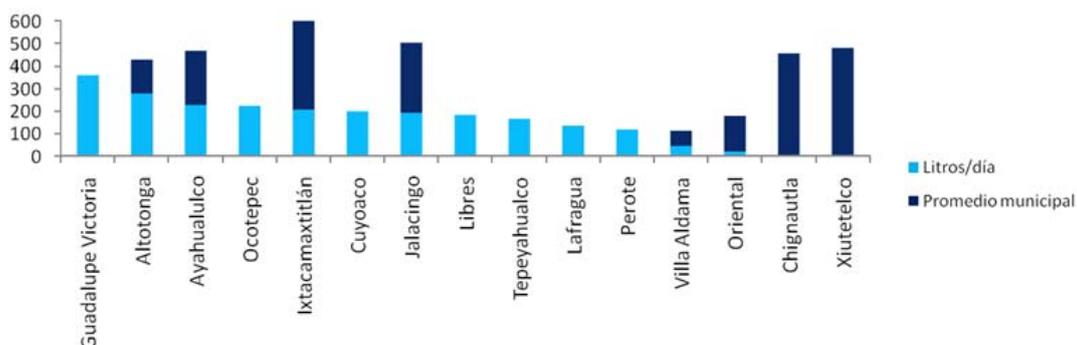


Fig. 28. Dotación per-cápita de agua (volumen destinado en valores redondeados) en los municipios de la subcuenca Perote-Libres (en azul marino se encuentra el promedio municipal de aquellos municipios que se encuentran de manera parcial en el área de estudio)

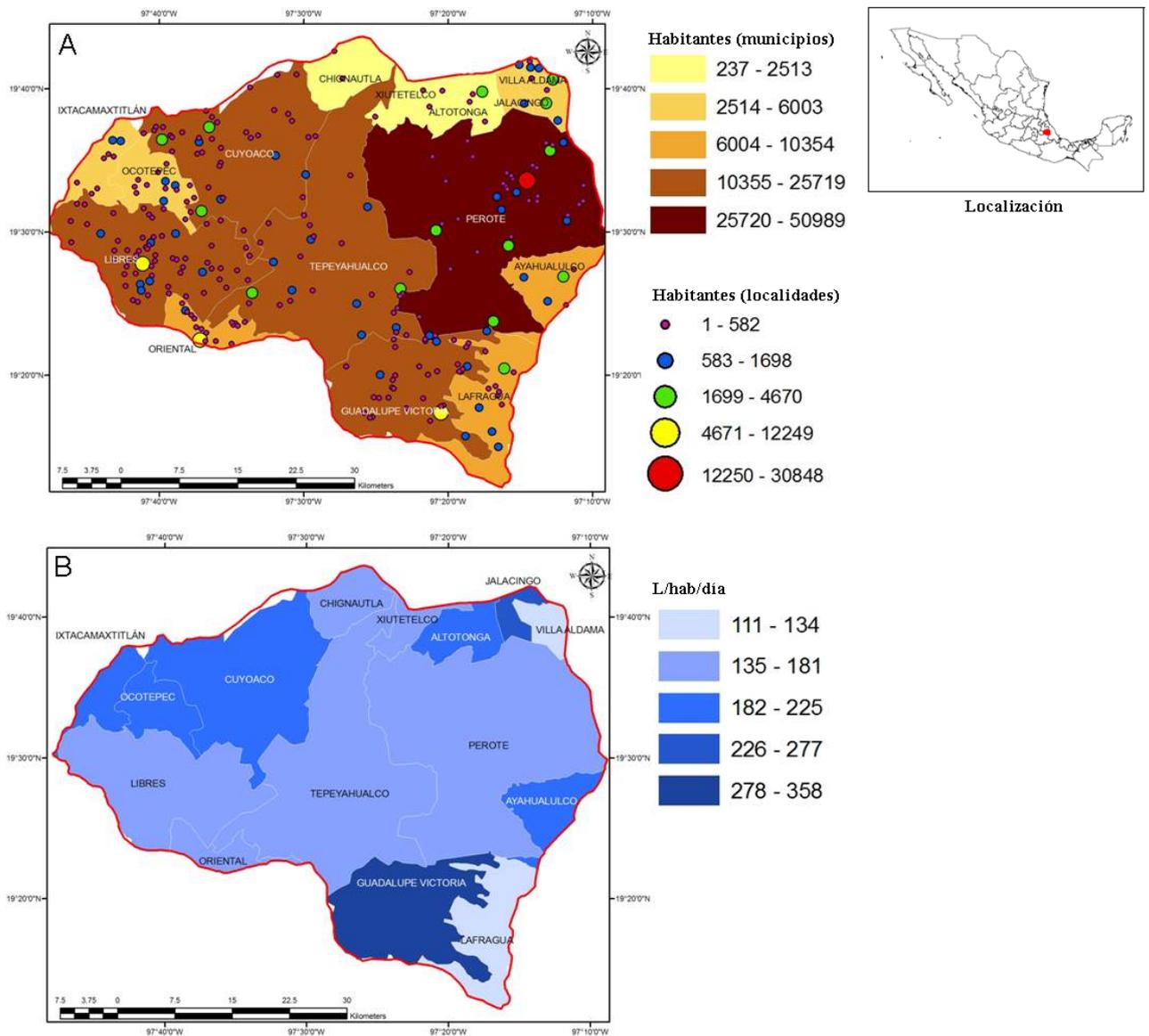


Fig. 29. Población municipal y localidades según el número de habitantes (A) y dotación per-cápita de agua en los municipios de la subcuenca Perote-Libres (en los municipios de Chignautla, Xiutetelco y Oriental se utiliza el promedio del área de estudio, dado que no hay concesiones de agua para uso público en el área de los municipios que se localiza dentro de la subcuenca)

7.7) Diagnóstico socio-ambiental: Percepción de las autoridades con respecto a los usos, manejo y acceso al agua

7.7.1) Entrevistas (Tabla 4)

Se realizaron 19 entrevistas en total a informantes clave de los municipios: Ocotepc (4), Tepeyahualco (3), Cuyoaco (2), Guadalupe Victoria (2), Perote (2), Xiutetelco (2), Lafragua (1), Libres (1), Oriental (1) y Chignautla (1).

Del total de entrevistados, diecisiete fueron hombres y únicamente dos (11%) fueron mujeres. El 37% de los entrevistados tiene una licenciatura, 26% tiene estudios de secundaria, 21% concluyó la preparatoria, 11% tiene una maestría y 5% estudió hasta la primaria.

Problemas relacionados con el agua

La escasez del recurso hídrico es considerada como la problemática principal del agua en los municipios (65% de los entrevistados). También es mencionada la ineficiencia de la infraestructura de la red pública de drenaje (26% de los entrevistados) y la ausencia de problemas relacionados con el recurso (11% de los entrevistados).

Una problemática local ocurre en Tepeyahualco, donde las autoridades indican que el agua extraída presenta una salinidad alta.

En los municipios de Oriental y Ocotepc, por lo menos uno de los entrevistados consideró que en su municipio no se presentan problemas relacionados con el agua.

Intervención de los entrevistados para solucionar los problemas del agua

La gestión de pozos e infraestructura es la manera en que las autoridades de los municipios de la subcuenca Perote-Libres intervienen para dar solución a los problemas de escasez del recurso (57% de los entrevistados). Los programas de concientización de la población (16% de los entrevistados) también son mencionados, así como la nula intervención para solucionar la problemática (16% de los entrevistados) y el apoyo a otros interventores (11% de los entrevistados).

En el municipio de Lafragua, la gestión de infraestructura incluye también la construcción de estructuras de captación y almacenaje de agua, así como la construcción de presas en los arroyos de las partes altas de la demarcación.

Por otra parte, los programas de concientización a la población incluyen planes de reforestación en Lafragua y Ocotepc, así como esquemas educativos para incentivar el correcto uso del agua

en las escuelas oficiales de Perote, donde se pide a los alumnos que denuncien ante el CAEV el mal uso del recurso por parte de la ciudadanía.

Causas de la problemática del agua

La infraestructura deficiente en cuanto a pozos, sistemas de bombeo y red de distribución, es la causa principal de la escasez de agua en los municipios del área de estudio (31% de los entrevistados). También se considera que el crecimiento poblacional repercute en la disponibilidad de agua para la población (22% de los entrevistados). Así mismo, se menciona que la deforestación está causando problemas en cuanto a la cantidad de agua disponible (17% de los entrevistados). Las sequías también se consideraran como un factor que influye en la disponibilidad de agua en la zona (13% de los entrevistados). De la misma forma, la falta de pagos por el suministro del recurso incide en los servicios de agua de los municipio (13% de los entrevistados) así como la mala administración del recurso por parte del Comité de Agua (COTAS) (4% de los entrevistados).

Calidad del agua

La calidad del agua es buena en la subcuenca Perote-Libres (84% de los entrevistados), la mala calidad (16%) se debe a la cantidad de sales que se presenta en los pozos de Tepeyahualco.

Uso del agua en el sector doméstico

Para el 84% de los entrevistados, el uso del agua en este sector se considera de regular a inapropiado (84% de los entrevistados). El 16% lo considera apropiado.

Uso del agua en el sector agrícola

El 42% de los entrevistados considera apropiado en uso del agua en este sector. Un 32% declaró desconocer el manejo del agua en los campos agrícolas, mientras que 21% considera el uso de regular a inapropiado. El 5% mencionó que no existe el uso agrícola del agua en su municipio.

Uso del agua en el sector industrial

El 47% de los entrevistados considera de regular a inapropiado el uso del agua en la industria de su municipio. El 26% indicó que no existe el uso del agua en este sector, mientras que el 16% considera apropiado el uso industrial del recurso hídrico. Por otra parte, el 11% declaró desconocer cómo se emplea el agua en este sector.

Disponibilidad de agua

El 53% de los entrevistados considera como regular la disponibilidad del agua en su municipio, mientras que 26% la considera buena y el 26% la considera excelente.

Tratamiento de aguas residuales

El 79% de los entrevistados mencionó que en su municipio no se lleva a cabo ningún tipo de tratamiento a las aguas residuales y/o son descargadas a cielo abierto, principalmente en barrancas y arroyos. El 21% indicó la presencia de plantas de tratamiento ya operativas en su municipio para el manejo de aguas residuales.

En Tepeyahualco y Oriental es donde se menciona la presencia de plantas de tratamiento, mientras que en Cuyoaco, Libres, Perote y Ocotepéc se tienen proyectos para instalarlas a futuro, sin definir fechas precisas para que comiencen a funcionar.

Pago por servicio de agua¹

Los pagos por servicio de agua son diferentes de acuerdo al municipio y la administración encargada, así como por el uso que se tiene concesionado.

El uso doméstico tenía un costo en 2009 de \$24.00 mensuales en Oriental, \$35.00 en Perote y \$50.00 en Libres. Los entrevistados indican que el consumo de agua para uso agrícola y ganadero se paga directamente a CONAGUA y las autoridades locales desconocen las tarifas que se manejan en este rubro.

Las autoridades entrevistadas consideran que el servicio es barato, ya que los costos de mantenimiento son altos y no se cubren en ocasiones con los ingresos generados por el servicio; sin embargo, las cuotas se deben de regir por la ley de ingresos del estado.

Causas de la contaminación del agua

Para el 37% de los entrevistados, la contaminación del recurso hídrico no es una problemática en su municipio. El 21% considera que las descargas a cielo abierto filtran agua contaminada a los mantos freáticos. Otro 21% indica las lagunas de oxidación de Granjas Carroll como un foco de contaminación en la región. Para el 16%, los desechos sólidos son los principales contaminantes de los cuerpos acuáticos superficiales, mientras que el 5% menciona a la ganadería como un factor de contaminación del agua en su municipio.

¹ La subcuenca Perote-Libres se localiza en el área geográfica C para fines de salarios mínimos con un monto de \$56.75 diarios (actualizado a 2011)

Principales afectados por la contaminación del agua

Para el 58% de los entrevistados, la sociedad y los recursos naturales son los principales afectados por la contaminación del agua. El 37% indica que no hay afectados, puesto que no hay problemas de contaminación en su municipio. Únicamente el 5% considera que la economía municipal es la principal afectada por esta problemática.

Acciones realizadas para evitar la contaminación del agua

El 36% de los entrevistados mencionó que, al no haber problemas de contaminación en su municipio, no se llevan a cabo acciones para mitigar este problema. El 21% indicó la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales como la principal acción realizada en su demarcación para conservar el recurso. Un 16% indicó la cloración del agua de consumo humano, mientras que para el 11% la limpieza de manantiales es la acción principal para evitar la contaminación del recurso. Otro 11% mencionó el cuidado de los pozos como una acción prioritaria para evitar este problema, mientras que el 5% declaró desconocer las acciones realizadas en su municipio para conservar el recurso hídrico.

Actores involucrados en el manejo del agua

El 90% de los entrevistados tiene contacto con el ayuntamiento municipal para gestionar el manejo del recurso. 74% tiene contacto con las autoridades de CONAGUA, mientras que 53% se comunica con el Estado (Puebla o Veracruz) para este efecto. El 47% tiene relación con SEMARNAT para el manejo de los recursos en su municipio.

Relación Estado-Municipio con respecto al manejo del agua

El 84% de los entrevistados considera buena esta relación, mientras que el 16% menciona como deficiente la comunicación de su municipio con el estado.

Conflictos sociales relacionados con el agua

El 58% de los entrevistados mencionó tener conocimiento de algún tipo de conflicto relacionado con el agua en su municipio. El 42% desconoce la existencia de esta problemática.

Sobre el origen de estos conflictos, 43% mencionó que las fallas en la distribución del recurso y los servicios de agua son la causa principal. Para el 19%, es la escasez del recurso el motivo principal del descontento en las comunidades. El 38% mencionó no tener conocimiento de conflictos en su municipio.

De acuerdo con los entrevistados, todos estos conflictos (100%) han sido desde grupos informales de la sociedad y la totalidad de ellos se ha resuelto por medio del diálogo y la

reunión en asambleas informativas, donde se hace del conocimiento de la ciudadanía las acciones realizadas por el municipio para proveer de agua a la mayor parte de las comunidades.

Tabla 4. Resultados de las preguntas más relevantes de la entrevista

Problemática relacionada al agua	Autoridades que lo mencionaron	Porcentaje
Escasez de agua	12	63%
Infraestructura deficiente	5	26%
No hay problemas	2	11%
Intervención de las autoridades ante la problemática del agua		
Gestión de pozos e infraestructura	11	57%
Programas de coeducación	3	16%
No interviene	3	16%
Aoyo a otros interventores	2	11%
Causas de los problemas relacionados con el agua		
Infraestructura deficiente	7	37%
Incremento poblacional	5	26%
Deforestación	4	21%
Sequías	3	16%
Falta de pagos	3	16%
Mala administración	1	5%
Calidad del agua		
Buena	16	84%
Regular	2	11%
Mala	1	5%
Uso de agua en el sector doméstico		
Regular	12	63%
Inapropiado	4	21%
Apropiado	3	16%
Uso del agua en el sector agrícola		
Apropiado	8	42%
No sabe	6	32%
Inapropiado	3	16%
Regular	1	5%
Sin uso	1	5%
Uso del agua en el sector industrial		
Regular	7	36%
Sin uso	5	26%
Apropiado	3	16%
Inapropiado	2	11%
No sabe	2	11%
Disponibilidad de agua		
Regular	10	53%
Buena	5	26%
Excelente	4	21%
Tratamiento de aguas residuales		
Cielo abierto	8	42%
Ninguno	7	37%
Plantas de tratamiento	4	21%

Tabla 4. Continuación

Causas de contaminación	Autoridades que lo mencionaron	Porcentaje
No hay contaminación	7	37%
Descargas a cielo abierto	4	21%
Granjas Carroll	4	21%
Residuos sólidos	3	16%
Ganadería	1	5%
Afectados por la contaminación		
Sociedad y recursos naturales	11	58%
No hay afectados	7	37%
Economía	1	5%
Acciones para mitigar la contaminación		
Ninguna	7	36%
Plantas de tratamiento	4	21%
Cloración	3	16%
Limpieza de manantiales	2	11%
Cuidado de pozos	2	11%
No sabe	1	5%
Actores involucrados en el manejo del agua		
Ayuntamiento	17	90%
CNA	14	74%
Estado	10	53%
SEMARNAT	9	47%
Relación Estado-Municipio con respecto al manejo del agua		
Buena	16	84%
Mala	3	16%
Conflictos sociales relacionados con el agua		
Si	11	58%
No	8	42%
Causas de los conflictos sociales		
Distribución y servicios de agua	9	47%
Escases de agua	4	21%
Sin conflictos	8	42%
Grupos de los conflictos sociales		
Informales	11	100%
Formales	0	0%
Solución a los conflictos sociales		
Diálogo en asambleas	11	100%

Conflictos y potencialidades (Tablas 5 y 6)

Los conflictos más representados en la subcuenca Perote-Libres son la falta de agua (valor absoluto=34; +34 y -0) y el desperdicio del recurso por los usuarios (valor absoluto=34; +25 y -9). Así mismo, el agotamiento de manantiales (valor absoluto=34; +25 y -9) y el descenso del acuífero (valor absoluto=34; +25 y -9) son una problemática grave en la zona. Por otro lado, resalta la mala administración del recurso por las asociaciones de usuarios agrícolas (valor absoluto=30; +2 y -28) y la poca disposición de las autoridades para llevar a cabo acciones de protección de los recursos de la región (valor absoluto=30; +0 y -30). De la mano con la mala administración del agua, el uso de sistemas de riego inadecuados (valor absoluto=21; +7 y -14) y el uso excesivo de agua de Granjas Carroll (valor absoluto=22; +8 y -14) está relacionados con la escasez de agua en la región.

Por otro lado, las potencialidades que ofrece la subcuenca Perote-Libres se enfocan en su valor como área hidrológica prioritaria (valor absoluto=20; +7 y -13). La presencia del ANP Cofre de Perote (valor absoluto=18; +0 y -18) y el interés de algunas autoridades para llevar a cabo planes de reforestación (valor absoluto=17; +15 y -2) en las partes altas de su municipio pueden favorecer la implementación de sistemas de Pagos por Servicios Ambientales (valor absoluto=17; +12 y -5). Así mismo, los endemismos, escasa contaminación y la presencia de los axalapascos permiten considerarla como una zona de importancia para la investigación (valor absoluto=17; +14 y -3).

Tabla 5. Matriz de conflictos en la subcuenca Perote-Libres (0=no existe relación; 1=existe baja relación; 2=existe relación intermedia; 3=existe mucha relación). El signo + indica que la afectación se da en sentido de arriba hacia abajo; y de abajo hacia arriba el signo - indica lo contrario. Las últimas tres columnas muestran la suma de los valores. En negritas se marcan los conflictos con mayor valor absoluto y en cuadros grises los que obtuvieron el mayor valor positivo y negativo

	Falta de agua	Desperdicio de agua	Falta de mantenimiento de la red	Deforestación	Crecimiento demográfico	Cambio climático (sequías)	Contaminación de Granjas Carroll	Falta de plantas de tratamiento de agua	Pozos clandestinos	Agua salobre en algunas zonas	Mala administración de la CONAGUA	Agotamiento de manantiales	Zonas donde no se cobra el agua	Marginación de la población	Descenso del nivel del acuífero	Descargas al aire libre	Sistemas de riego inadecuados	Uso de agua excesivo de Granjas Carroll	Poca disposición de autoridades de la zona	ABSOLUTO	POSITIVO	NEGATIVO
Falta de agua	x	3	3	3	3	3	0	1	2	0	2	3	0	1	3	0	3	2	2	34	34	0
Desperdicio de agua	-3	x	3	0	1	1	0	2	3	0	3	-3	3	1	-3	0	3	3	2	34	25	9
Falta de mantenimiento de la red	-3	-3	x	0	1	0	0	2	0	0	2	2	3	2	2	1	0	0	2	23	17	6
Deforestación	-3	0	0	x	3	1	0	0	0	0	0	-2	0	1	-2	0	0	0	2	14	7	7
Crecimiento demográfico	-3	-1	-1	-3	x	0	0	0	-2	0	0	-3	0	1	-2	0	0	0	0	16	4	12
Cambio climático (sequías)	-3	-1	0	-1	0	x	0	0	0	0	0	-3	0	0	-3	0	0	0	0	11	0	11
Contaminación de Granjas Carroll	0	0	0	0	0	0	x	3	0	0	1	0	0	0	0	3	0	2	3	12	12	0
Falta de plantas de tratamiento de agua	-1	-2	-2	0	0	0	-3	x	0	1	2	1	0	0	1	-3	0	1	2	19	8	11
Pozos clandestinos	-2	-3	0	0	2	0	0	0	x	0	3	-3	0	0	-3	0	-1	0	3	20	8	12
Agua salobre en algunas zonas	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Mala administración del agua en el sector agrícola	-2	-3	-2	0	0	0	-1	-2	-3	0	x	-3	0	0	-3	-3	-3	-3	2	30	2	28
Agotamiento de manantiales	-3	3	-2	2	-3	3	0	-1	3	0	3	x	0	0	3	0	3	3	2	34	25	9
Zonas donde no se cobra el agua	0	-3	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	3	0	0	0	0	0	9	3	6
Marginación de la población	-1	-1	-2	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	-3	x	0	0	0	0	0	9	0	9
Descenso del nivel del acuífero	-3	3	-2	2	2	3	0	-1	3	0	3	-3	0	0	x	0	3	3	3	34	25	9
Descargas al aire libre	0	0	-1	0	0	0	-3	3	0	0	3	0	0	0	0	x	0	0	1	11	7	4
Sistemas de riego inadecuados	-3	-3	0	0	0	0	0	0	1	0	3	-3	0	0	-3	0	x	-2	3	21	7	14
Uso de agua excesivo de Granjas Carroll	-2	-3	0	0	0	0	-2	-1	0	0	3	-3	0	0	-3	0	2	x	3	22	8	14
Poca disposición de autoridades de la zona	-2	-2	-2	-2	0	0	-3	-2	-3	0	-2	-2	0	0	-3	-1	-3	-3	x	30	0	30

Tabla 6. Matriz de potencialidades en la subcuenca Perote-Libres (0=no existe relación; 1=existe poca relación; 2=existe relación intermedia; 3=existe mucha relación). El signo + indica que la afectación se da en sentido de arriba hacia abajo; y de abajo hacia arriba el signo – indica lo contrario. Las últimas tres columnas muestran la suma de los valores. En negritas se marcan los conflictos con mayor valor absoluto y en cuadros grises los que obtuvieron el mayor valor positivo y negativo

	Valores culturales y escenicos para eco-turismo	Programas de reforestación	Presencia de un ANP	Área terrestres prioritaria	Área agrícola importante con un manejo adecuado	Pago de servicios ambientales	Escasa contaminación del agua y ambiental	Área hidrológica prioritaria	Presencia de especies acuáticas endémicas	Zona de importancia para la investigación	ABSOLUTO	POSITIVO	NEGATIVO
Valores culturales y escenicos para eco-turismo	x	-3	3	3	0	0	3	0	1	-2	15	10	5
Programas de reforestación	3	x	3	3	1	3	0	2	0	-2	17	15	2
Presencia de un ANP	-3	-3	x	-3	0	-3	-2	-2	0	-2	18	0	18
Área terrestres prioritaria	-3	-3	3	x	0	-3	0	3	0	0	15	6	9
Área agrícola importante con un manejo adecuado	0	-3	0	0	x	0	0	2	0	-2	7	2	5
Pago de servicios ambientales	0	-3	3	3	0	x	2	3	0	-3	17	12	5
Escasa contaminación del agua y ambiental	3	0	2	0	0	-2	x	-2	-2	3	14	8	6
Área hidrológica prioritaria	0	-2	2	-3	-2	-3	2	x	3	-3	20	7	13
Presencia de especies acuáticas endémicas	-1	0	0	0	0	0	2	-3	x	3	9	5	4
Zona de importancia para la investigación	0	2	2	2	0	2	3	-3	3	x	17	14	3

8) DISCUSIÓN

Para comprender el problema genérico del manejo del agua, es necesario pensar en la cuenca como unidad de estudio (Seckler, 1996). La cuenca es reconocida como la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada del recurso hídrico. En principio, es simplemente porque son las formas terrestres dentro del ciclo hidrológico que captan y concentran la oferta del agua que viene de las precipitaciones (Dourojeanni *et al.* 2002). La cuenca hidrográfica funciona como un sistema con *entradas y salidas* de agua que permiten cuantificar la cantidad del recurso que ingresa (por medio de la precipitación y de manera subterránea por medio de acuíferos adyacentes) y la cantidad que sale de la misma (por medio de su río principal en las desembocaduras, por evapotranspiración o por el uso que adquiera el agua) (World Vision, 2004).

Además de esta condición física y biológica básica, debe mencionarse la interrelación e interdependencia entre los usos y los usuarios en una cuenca: las aguas superficiales y subterráneas forman, con relación a una cuenca, un sistema integrado e interconectado. En sus territorios se produce la interrelación e interdependencia entre los sistemas físicos, bióticos y el sistema socio-económico (formado por los usuarios de las cuencas, sean habitantes o interventores de la misma). La dependencia de un sistema hídrico compartido y de los caminos y vías de acceso, y el hecho de que deban enfrentar riesgos similares, confieren a los habitantes de una cuenca características socio-económicas y culturales comunes (IDEAM, 2003). Es por ello que las cuencas constituyen un área donde interactúan, en un proceso permanente y dinámico los recursos naturales y la sociedad.

8.1) Patrón de drenaje y características ambientales

La delimitación de la subcuenca utilizada en esta tesis tiene diferencias con respecto a los estudios realizados anteriormente en el área de estudio (Geréz, 1983; Arellano y Romero, 2005). De manera particular, Arellano y Romero (2005) delimitan la subcuenca con una extensión de 2,166.51 km² sin mencionar el perímetro de la misma. La delimitación actualizada del área de estudio aumenta la extensión de la misma a 2,321.62 km² y establece un perímetro de 201.165 km. Esta diferencia se explica porque en ambos casos se utilizaron estrategias metodológicas diferentes y existe una variación en la identificación de las elevaciones principales que delimitan los polígonos utilizados.

La importancia de lo anterior radica en el hecho de que se incluyen municipios dentro del área que antes no se contemplaban (Ixtacamaxtitlán, Altotonga y Villa Aldama) y que son

trascendentes para conocer el volumen de agua concesionado dentro de la subcuenca Perote-Libres. En estos tres municipios se tiene una extracción total del recurso de 3.4 Mm³/año.

El modelo de la red hidrológica muestra que la mayor parte de los escurrimientos se dirigen hacia la planicie de inundación al centro de la subcuenca, es decir, a la laguna el Salado. Sin embargo, la mayor parte de las corrientes superficiales y arroyos son efímeros y se infiltran al subsuelo mucho antes de llegar a esta zona (Meneses, 2002). La constitución litológica de la planicie de la cuenca (depósitos piroclásticos recientes) favorece la alta infiltración que caracteriza a la cuenca Oriental (Reyes, 1979). Únicamente cuando las lluvias son muy abundantes, los escurrimientos saturan el suelo y se presenta la esorrentía en la región (SEDUOP, 2009).

La laguna el Salado se inunda en temporada de lluvias debido a la presencia de una capa arcillosa impermeable que permite la acumulación de agua (Reyes, 1979; Gasca, 1981) y por el afloramiento del agua subterránea cuando las precipitaciones son abundantes (Cruickshank, 1992). El patrón endorreico de la subcuenca indica que esta laguna es la zona de descarga del agua que se infiltra en las partes altas del área de estudio. El hecho de que esta laguna que se mostraba permanente hasta la década de 1970 (Alcocer *et al.* 1998) sea en la actualidad temporal (Alcocer *et al.* 2004), es un indicador del abatimiento en el nivel del acuífero regional y de la disminución de las lluvias en la región.

Así mismo, existe en la planicie central de la subcuenca un río de bajo caudal denominada río Salado, el cual comunica a la laguna de Toltolcingo (que se localiza en la subcuenca el Seco-Oriental) con la laguna el Salado. Este río recibe la aportación de aguas residuales crudas del municipio de Oriental, así como descargas pluviales intermitentes de dos canales que provienen de la comunidad de Virreyes, además de recibir la incorporación del río Grande que viene del municipio de Libres (SEDUOP, 2009). La descarga directa de aguas residuales hacia la laguna del Salado y su impacto en el ambiente y las poblaciones de la zona es una problemática que no ha sido abordada aún. La planta de tratamiento más cercana a este sitio se localiza en el nodo logístico intermodal “La Célula¹”, sin embargo, hasta el momento este proyecto se encuentra aún en proceso y con problemas de retraso en la construcción del mismo (Díaz, 2011).

¹“La Célula” es un nodo logístico que se pretende sea una terminal interior con los servicios de transferencia entre modos de transporte ferroviario y carretero, con el suministro de servicios logísticos de valor agregado, incluyendo las ventajas que proporciona el nuevo régimen aduanero en México de un Recinto Fiscalizado Estratégico. El proyecto supone un punto de concentración de tránsitos de distinto origen geográfico y un medio para consolidar el corredor multimodal Ciudad de México-Veracruz.

Debido a lo anterior, resalta la importancia de las áreas boscosas conservadas en las partes altas de la subcuenca Perote-Libres (Cofre de Perote, Sierra de Quimixtlán y de Libres, así como los Humeros) ya que en las áreas de recarga cubiertas por bosque, se presenta una mayor capacidad para almacenar humedad (Oyarzún *et al.* 2005). Por consiguiente, tanto la retención de humedad como la percolación, hacen posible el flujo de agua superficial y subterránea a lo largo de todo el año, aun cuando no ocurren precipitaciones; mientras que las áreas de recarga de una cuenca con ausencia de cobertura boscosa, presentan una menor capacidad para almacenar humedad y su aporte es debido a la percolación del agua, que en gran parte se presenta cuando ocurren las precipitaciones (Blanco, 2010).

Así mismo, es importante mencionar los servicios ambientales que ofrecen las zonas de bosque del Cofre de Perote, sierra de Quimixtlán y sierra de Libres que delimitan la subcuenca. Entre otros, se pueden mencionar la infiltración y regulación de los flujos de agua, conservación de la calidad del agua, control de erosión y sedimentación, reducción de la salinización del suelo y conservación de hábitats acuáticos (García *et al.* 2004).

Un solo individuo de la especie *Pinus montezumae* del Cofre de Perote es capaz de precipitar hasta 57.9 litros de agua por hora a partir de la niebla (Barradas, 1983). Sin embargo, la denudación de las zonas boscosas del área de estudio es una problemática mayor ya que únicamente el 21% (455.56 km²) de la subcuenca Perote-Libres presenta zonas conservadas de bosque, mientras que el 67% (1473.28 km²) es ocupada para la agricultura y los asentamientos humanos (Fig. 8F). Por otra parte, el Cofre de Perote presenta un índice de deforestación de 200 ha/año y una sustancial reducción de los bosques maduros, que en la actualidad comprenden solo el 56.8% del área, en tanto que la agricultura se distribuye en un área equivalente al 27% y los pastizales inducidos y cultivados ocupan el 15.1% (García *et al.* 2010). El aclareo de bosques también hace los suelos más susceptibles a la erosión (Alcocer *et al.* 2004), fenómeno que se está manifestando en la subcuenca Perote-Libres, donde se presentan índices de erosión medio-alto, agravándose este problema en las partes altas del Cofre de Perote (Ern, 1973).

A pesar de que la cuenca Oriental es considerada como una región hidrológica prioritaria (Arriaga *et al.* 2002) y que el acuífero “Libres-Oriental” se encuentra vedado desde 1954 (CONAGUA, 2002a), no se han observado acciones por parte de las autoridades de los diferentes niveles para proteger el valioso recurso subterráneo de la zona. Prueba de ello es que en el periodo 2002-2009 se concesionó un volumen extra de 30 Mm³, a pesar de que el estudio de CONAGUA de 2002 (CONAGUA, 2002a) indicaba que sólo se podía concesionar 17.3 Mm³ para que el acuífero quedara en equilibrado en cuanto a las entradas y las salidas de agua al sistema.

Cabe mencionar que CONAGUA ha decretado otra veda para este acuífero (Diario Oficial de la Federación, 2009a), debido a que el estudio más reciente de disponibilidad del recurso mostró un déficit de almacenamiento de $-13.4 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (Diario Oficial de la Federación, 2009b), panorama que ya había sido descrito por Cisneros (1991) quien menciona una disponibilidad de $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y una extracción de $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ en la cuenca Oriental, indicando la sobreexplotación del acuífero. Sin embargo, la cuenca Oriental queda comprendida en la Fracción III, la cual indica que “la veda se ha establecido con el fin de proteger los mantos acuíferos explotados con diversos fines, de los que, aún en el caso de que estén abatidos, es necesario extraer el agua para cubrir las necesidades de la región de que se trate” (Maderey, 1967).

Por otra parte, el Gobierno Federal (2010) en su Cuarto Informe de Gobierno, declara las acciones planeadas por las autoridades a nivel federal en colaboración de los gobiernos estatales y municipales, para llevar a cabo el manejo de los acuíferos de la zona. De manera textual dice: *“Durante 2009 se formularon tres planes de manejo de los acuíferos Huamantla, Libres-Oriental y Perote-Zalayeta, en los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, para que, mediante el consenso de usuarios y autoridad, se determine la forma como se ajustarán las extracciones de agua a los volúmenes sustentables de 20,159 y 41 millones de metros cúbicos anuales, respectivamente. En dichos planes se han introducido acciones tendientes a reducir la demanda, tanto en el sector agrícola como en el público urbano, a incrementar la disponibilidad de agua, mediante la aplicación de tecnologías como la recarga artificial de agua de lluvia y residual tratada, y a una vigilancia conjunta entre usuarios y autoridad para que no se violen las leyes establecidas”*.

Sin embargo, este plan es cuestionable dado que es muy difícil llevar a cabo la recarga artificial de un acuífero utilizando el agua de lluvia en una zona que se caracteriza precisamente por la escasez de precipitaciones. Así mismo, se planea la recarga con agua residual, sin embargo, hasta el momento las plantas de tratamiento en la zona son escasas y algunas de ellas se encuentran detenidas por falta de presupuesto y cuando funcionan su operación es deficiente, lo cual hace, de momento, poco probable la implementación de las medidas mencionadas. Por otra parte, no se menciona la intención de generar programas de reforestación y/o conservación de zonas boscosas, lo cual es una acción importante si se pretende llevar un manejo integral de los recursos en la cuenca Oriental (Caire, 2004).

En regiones semiáridas como la subcuenca Perote-Libres, los sistemas de cultivo utilizan entre el 15% y el 30% del agua de lluvia; la mayor parte del agua se evapora (30-50%) y el resto deriva en escorrentía superficial (10-25%) y en agua de recarga subterránea (10-30%) (van Leeuwen y Beernaerts, 2002 en UNESCO, 2005). Las acciones de conservación del recurso en

este tipo de climas varían desde terraplenes de campo, arado de contorno y represas de roca en canales de drenaje, hasta la desviación de agua de inundación hacia áreas de cultivo. Lo anterior tiene como meta reducir la escorrentía y acumular el agua para ser almacenada en el perfil del suelo o en acuíferos más profundos. Cualquiera que sea el sistema usado, el objetivo es reducir la escorrentía superficial y la evaporación para aumentar la producción agrícola y, muchas veces y de manera no intencional, aumentar la recarga de agua subterránea (UNESCO, 2005).

La problemática de la gestión ambiental en la zona se observa también con el manejo de los recursos forestales, donde el decreto de la cuenca del lago Alchichica como “área de reforestación” desde 1946 (de la Maza, 2000) no ha cumplido con las metas esperadas, ya que como se mencionó anteriormente, la deforestación y el cambio de uso de suelo es un grave problema que se observa hoy en día en la subcuenca Perote-Libres y en toda la cuenca Oriental.

8.2) Análisis climatológico de la subcuenca Perote-Libres:

El balance hídrico de la zona permite conocer las propiedades y variables de las entradas (precipitación) y salidas (evapotranspiración) de agua y los cambios en el almacenamiento del recurso en el suelo de una cuenca (Dunne y Leopold 1978). Calcular las pérdidas por la evapotranspiración real a través de valores de temperatura y precipitación permite localizar los cambios en el funcionamiento hidrológico de un sistema, tanto en el suelo como en la vegetación. Dichas pérdidas dependen del uso del suelo y la presencia de humedad en el mismo (Devito *et al.* 2005).

La subcuenca Perote-Libres, se localiza en el sotavento del corredor Cofre de Perote-Pico de Orizaba. Esta formación montañosa funciona como una barrera que impide el paso de los vientos húmedos provenientes del Golfo de México (Caballero *et al.* 2010). Este efecto se conoce como sombra de lluvia (Morales y Aguilar, 2000) y provoca la escasez de precipitaciones que caracterizan a la región (Arellano y Romero, 2005).

Las escasas precipitaciones y las altas tasas de evaporación de la subcuenca Perote-Libres la hacen susceptible a la desertificación y conlleva a que la recarga de los acuíferos de la zona sea pobre y se muestre un balance hídrico negativo con relación a la disponibilidad del agua subterránea (Alcocer *et al.* 2004). En las estaciones meteorológicas seleccionadas para el presente estudio, las precipitaciones oscilaron entre los 200 a 400 mm/año, indicando que el clima semiárido es dominante en la región (Fries, 1991).

Las mayores precipitaciones dentro de la subcuenca Perote-Libres son durante el verano y ocurren en los meses de Junio y Septiembre, que son los meses en los cuales se presenta la

recarga del acuífero en las zonas de montaña y los valle de la subcuenca Perote-Libres. En los meses de Julio y Agosto se observa un fuerte descenso de las lluvias, como consecuencia de la sequía intraestival (Pereyra *et al.* 1994). Esta sequía, también conocida como canícula, se registra sobre la mitad oriente y sur del país y obedece a cambios en la circulación atmosférica que anualmente tiene lugar en el Golfo de México y mares adyacentes. Esto debido a la presencia de una vaguada polar (sistemas de vientos, donde el aire se mueve horizontalmente con carácter ciclónico en forma ondulatoria) que bloquea la entrada de vientos alisios y de ciclones tropicales del Golfo, provocando la disminución en la precipitación (Mosiño y García, 1968). Así mismo, una causa parcial de la sequía intraestival son los ciclones tropicales que se forman en el Golfo de México sin entrar al territorio mexicano. Estos se asocian a una configuración de las isohipsas en forma de un área anticiclónica que los abraza por el norte, produciendo una lengua de aire seco, subsidente dentro del área del anticiclón, cuya presencia ocasiona la recesión en las lluvias, sobre la mitad oriente del país (Mosiño y Reyna, 1988).

Las mayores lluvias en el valle de la subcuenca se registran en el área de influencia de las estaciones San Luis Atexcac (Junio) y Perote-Perote (Septiembre), alcanzando 102 mm acumulados. Durante Junio y Septiembre se presenta la reposición hídrica en la región, sin embargo, este aumento de las precipitaciones no es suficiente para que se observe un excedente hídrico en la zona. La sequía intraestival (Julio-Agosto) y la disminución de lluvias en el otoño vuelven a determinar el déficit hídrico que caracteriza a la región.

El mayor déficit hídrico ocurre en Marzo y Abril, que es el final de la temporada seca en la región. Las escasas precipitaciones y el aumento de temperatura por el inicio de la primavera acentúan la pérdida de agua en la subcuenca. Los valores mayores de déficit se registraron en las estaciones Alchichica y Zalayeta-Perote en el mes de Marzo (-40.0 y -40.1 mm respectivamente). Estas dos estaciones se localizan en la parte central de la subcuenca, la cual es la zona más árida del área de estudio.

Por otra parte, la estación meteorológica Oyameles muestra el contraste que existe entre el interior de la subcuenca y los bordes montañosos de la misma. En esta zona periférica, en el periodo de Julio a Octubre se observa una ganancia hídrica producto de las mayores precipitaciones de esta región (hasta 146 mm). Este comportamiento de las lluvias indica la transición de la zona semiárida del centro de la subcuenca y la región lluviosa de la sierra norte de Puebla. Debe mencionarse que el 60% (1,402 km²) de la subcuenca Perote-Libres se caracteriza por tener un clima semiárido, mientras que el 23% (538 km²) presenta clima templado y 17% (381 km²) es de clima semifrío.

En zonas como la subcuenca Perote-Libres, donde la precipitación es menor que la ETP durante en gran parte del año, la ETR es igual a la precipitación más la cantidad de agua contenida en el suelo, por lo que ésta decrece de forma tal que el suelo se seca, provocando que el agua sea más difícil de remover y esté menos disponible para la ETR. Por otra parte, cuando la precipitación es mayor como en los bordes montañosos de la subcuenca, la evapotranspiración real se iguala a la potencial habiendo más humedad en el suelo que puede llegar a superar la capacidad de almacenaje del mismo, de esta manera el agua en exceso eventualmente constituirá la escorrentía (McCabe, 2007).

El cambio climático global está produciendo variaciones en los niveles de agua de los lagos y la disponibilidad de agua en los acuíferos (Gleick, 2000), por lo que se considera como un factor de presión de los recursos acuáticos tanto superficiales como subterráneos (Alfarra, 2004). Al existir modificaciones en la escorrentía debido al efecto invernadero, se afecta la capacidad de almacenamiento de los reservorios de agua (Dracup y Kendall, 1989). Este factor pudiera considerarse como un agente que potencialmente esté alterando la dinámica hidrológica de los axalapascos de la región.

El presente estudio muestra que en la subcuenca Perote-Libres existe una marcada variabilidad en las precipitaciones y la evaporación. Existen periodos de sequías y periodos de lluvias abundantes. Los años con menores precipitaciones (1982, 1986 y 1987) así como el último periodo de sequía intensa (2004-2006) coinciden con eventos considerados “fuertes” del fenómeno de El Niño (ENSO) (Dajoz, 2002; NOAA, 2009). Por otra parte, el periodo con lluvias por arriba del promedio (1970-1984) coincide con la presencia de tres eventos de La Niña durante ese intervalo de tiempo (1970-1971, 1973-1974, 1975-1976). En el periodo de 1992-1999, el cual también fue húmedo, no se tiene registrada la presencia de eventos El Niño o La Niña (año normal) (NOAA, 2009).

El mismo patrón de variabilidad se presenta en las tasas de evaporación. En este caso, los años con mayor evaporación (1977, 1986 y 1987) coinciden con la presencia del fenómeno de El Niño, (Dajoz, 2002; NOAA, 2009).

Por otra parte, la temperatura presenta un aumento constante a través del tiempo. En el periodo con la temperatura por debajo del promedio (1970-1986) se presentaron tres eventos de La Niña (1970-1971, 1973-1974, 1975-1976) y dos eventos de El Niño (1977 y 1982-1983), mientras que el periodo cálido (1987-2006) se tiene la presencia de seis eventos El Niño (1986-1987, 1981-1982, 1997-1998, 2002-2003, 2004-2005 y 2006-2007) y únicamente tres eventos de La Niña (1988-1989, 1999-2000 y 2000-2001) (NOAA, 2009).

A pesar de que los datos obtenidos en esta tesis no son suficientes para mostrar el efecto del cambio climático en la subcuenca Perote-Libres (ya que la variabilidad mostrada por la precipitación y la evaporación parece seguir patrones similares de hace 30 años) los escenarios del CCC (*Canadian Climate Center*) y el GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) que parten del supuesto de que el contenido de CO₂ atmosférico se duplicará entre los años 2025 y 2050 (Maderey y Jiménez, 2000), predicen un impacto de fuerte a muy fuerte en la sequía meteorológica de la región (Hernández, 2000) así como el aumento de la temperatura y una disminución en la humedad de la subcuenca Perote-Libres (Villers y Trejo, 2000).

Actualmente, los cambios en el patrón de las lluvias y la temperatura han propiciado que las áreas agrícolas de riego se estén extendiendo para poder asegurar la producción (Hargreaves, 1981). En la subcuenca Perote-Libres, la agricultura de riego se ha venido incrementando con el tiempo como respuesta a las escasas precipitaciones de la región (Alcocer *et al.* 2004). Los efectos de la variabilidad climática tienen un mayor impacto en las zonas áridas y semiáridas, donde mantener los niveles de irrigación se convierte en factor de presión para los acuíferos adyacentes (Peterson y Keller, 1989). Al existir a lo largo del año un déficit hídrico, la agricultura de temporal se ve restringida y se favorece el desarrollo de técnicas de riego que permitan la producción, lo cual tiene un efecto directo en acuíferos de las zonas semiáridas como la subcuenca Perote-Libres (das Neves *et al.* 2007). Por esta razón, es necesario enfocar los esfuerzos hacia la optimización del uso del recurso hídrico y de prácticas de riego más eficientes y amigables con el ambiente.

Lo anterior tiene impacto en los axalapascos: la variabilidad climática es más evidente con la presencia del fenómeno de El Niño, provocando el incremento en la evaporación de los lagos y la disminución en las precipitaciones, ocasionando el abatimiento del nivel estático de los lagos-cráter de la subcuenca Perote-Libres (García, 2010). Así mismo, la presencia del fenómeno de El Niño incrementa la presencia e intensidad de la sequía intraestival en las partes altas de Veracruz, como el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba, haciendo más fuerte también la sequía en la zona de sotavento de estos volcanes (Pereyra *et al.* 1994), que es la cuenca Oriental. Lo anterior acentuaría la problemática del agua en la región, ya que ante escenarios de sequía, se incrementa la escases de agua para los diferentes usos (agrícola, público-urbano, industria etc.) así como para los cuerpos acuáticos superficiales (Esquivel, 2002).

Al existir evidencia de la disminución de las precipitaciones y del aumento de la temperatura y evapotranspiración, es de esperarse que los niveles de agua de los axalapascos continúen abatiéndose (García, 2010). En el lago Alchichica, la contribución de las precipitaciones y agua

subterránea con respecto a la tasa de evaporación y salida subterránea arrojan un déficit de almacenamiento de $0.6 \text{ m}^3/\text{año}$, valor que se ve reflejado en el descenso del nivel del lago en los últimos 40 años, que es de 4.5 m, esto es, 11 cm/año considerando un tasa constante (Alcalá, 2004).

Desde 1970 es más frecuente el fenómeno El Niño y más inusual el de La Niña, probablemente debido al efecto del cambio climático (Trenberth y Hoar, 1997). Si la temperatura y la evaporación continúan en aumento y cada vez son más frecuentes los eventos de El Niño (que disminuyen las precipitaciones y aumentan la temperatura y evaporación), la recarga de los acuíferos de la región se va a ver disminuida (Candela *et al.* 2009), así como el aporte por lluvias a los lagos (García, 2010), por lo cual sus niveles de agua continuarán abatiéndose. Los axalapascos entonces, verán disminuidos sus aportes superficiales (lluvia) y subterráneos (acuífero), acelerando el proceso de desecación que se ha venido reportando para estos lagos.

Las lagunas del Carmen y el Salado han sido consideradas como un remanente salino de un lago plio-pleistocénico de grandes dimensiones que existió en la cuenca Oriental (Barbour, 1973). Durante eventos de precipitaciones abundantes, este lago pudo mantener una conexión lacustre o fluvial con la cuenca del Valle de México, a través de los llanos de Apan en el estado de Hidalgo (Tamayo y West, 1969). Evidencia de esta conexión son los restos salinos de las lagunas de la cuenca Oriental, los cuales son similares a los lechos lacustres del valle de Apan. Por otra parte, el aterínido *Chirostoma jordani* se ha registrado tanto en la laguna del Carmen, como en la laguna de Atocha (en el valle de Apam) y en depósitos del Valle de México (Guerra, 1986).

Así mismo, la especiación del género *Poblana* en los axalapascos Alchichica (*P. alchichica*), Quechulac (*P. squamata*) y la Preciosa (*P. letholepsis*) se ha mencionado como resultado del aislamiento geográfico de los lagos-cráter (Arellano y Romero, 2005). Durante los eventos de precipitaciones abundantes mencionados anteriormente, el nivel del lago subía, cubriendo los axalapascos y creando la conexión que permitió la mezcla faunística entre ellos (Álvarez, 1972). Posteriormente, este lago sufrió fluctuaciones que provocaron la disminución de su volumen y extensión (Barbour, 1973), quedando aislados cuerpos lacustres muy someros que se separaron cada vez más. De esta manera, los axalapascos quedaron incomunicados y se generó el proceso de especiación (Guerra, 1986).

Lo anterior indicaría la presencia de un clima muy diferente durante el Pleistoceno en la cuenca Oriental, pues se necesitaría un clima más húmedo y un volumen considerable de agua para

poder mantener saturado el suelo altamente poroso de la región y de esa manera, mantener un lago de semejantes dimensiones (Reyes, 1979).

Debe mencionarse que la cuenca Oriental ha tenido variaciones ambientales en el pasado, como consecuencia de las fluctuaciones climáticas generadas por las glaciaciones del Pleistoceno. En los volcanes la Malinche y el Pico de Orizaba se encuentra evidencia (morrenas, rocas estriadas y depósitos periglaciares) de cuatro avances glaciares (Heine, 1973): el primero de ellos (MI) ocurrió hace aproximadamente 39,000 a 26,000 cal AP¹, el segundo (MII) hace 18,500 a 14,000 cal AP. Un tercer avance glacial (MIII) tuvo lugar hace aproximadamente 10,000 a 9,000 cal AP, mientras que el último registro (MIV) es durante el la Neoglaciación del Holoceno, hace 2,000 años. Durante estas glaciaciones, las condiciones ambientales en la cuenca Oriental fueron más frías y con precipitaciones abundantes, mientras que en los periodos inter-glaciares, se dio la formación intensiva de suelos, debido a la presencia de condiciones más secas y cálidas (Straka y Ohngemach, 1989).

Así mismo, el lago Alchichica ha presentado fases de variabilidad en el nivel de sus aguas a través del tiempo. Hace más de 300 años, este axalapasco presentó un periodo con un menor nivel de agua y mayor alcalinidad que en el presente, el cual había sido precedido por un periodo de condiciones muy similares a las actuales (Caballero *et al.* 2003).

Debido a lo anterior, debe considerarse que los axalapascos se encuentran bajo un proceso de desecación producto de las fluctuaciones climáticas en la región. Basándose en investigaciones tefraconológicas y estratigráficas, existe una correlación entre la glaciación MII y los sedimentos lacustres del área de estudio, lo cual podría indicar que durante las glaciaciones se formaron uno o varios lagos de gran extensión en la cuenca Oriental que posteriormente desaparecieron por el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones (Heine, 1973).

Dos cráteres de la región actualmente secos tiene registro de que en el pasado presentaron agua en su interior: el registro palinológico del cráter Tlaloc, indica la presencia de especies acuáticas (*Potamogeton*, *Myriophyllum*, *Lemna* y *Utricularia*), indicando que en el pasado (sin fechar) presentó agua en su interior (Ohngemach, 1977), mientras que el cráter Jalapasquillo presenta depósitos de gyttja (lodos lacustres ricos en materia orgánica) que se acumularon hace 30,000 – 35,000 cal. AP (Ohngemach, 1973).

¹ cal AP: años calendarizados antes del presente

8.3) Disponibilidad y uso de agua en la subcuenca Perote-Libres y visión por parte de las autoridades encargadas del manejo del recurso:

Un problema en el manejo del recurso hídrico a nivel de cuencas, es el hecho de que las jurisdicciones político-administrativas no coinciden con los límites territoriales de las cuencas. Por esta razón, gran parte de las decisiones que afectan el ciclo hidrológico, el aprovechamiento del agua y a los habitantes de una cuenca, no consideran las interrelaciones que ocurren en la totalidad de este sistema integrado (Dourojeanni *et al.* 2002).

En la subcuenca Perote-Libres existen dos acuíferos (Libres-Oriental y Perote-Zalayeta) cuya delimitación (a cargo de la CONAGUA) se realizó en base a los límites estatales de Puebla y Veracruz (CONAGUA, 2002a, b) y cuyo aprovechamiento también está marcado por el límite estatal. El acuífero Perote-Libres es de uso exclusivo para los municipios del estado de Puebla, mientras que el de Perote-Zalayeta es de uso exclusivo del estado de Veracruz. Esto genera dos regiones de disponibilidad separadas dentro de la subcuenca: en los municipios del estado de Puebla ya no se pueden llevar a cabo más concesiones de agua puesto que el acuífero Libres-Oriental se encuentra sobreexplotado y vedado, mientras que en el estado de Veracruz se pueden dar en concesión todavía 19.7 Mm³ del recurso. Incluso se tienen planes para abastecer a la ciudad de Xalapa con agua del acuífero Perote-Zalayeta (de la Paz, 2011).

De la misma forma, los datos que provee CONAGUA de concesiones de agua están dados a nivel municipal por esta razón, se consideran los municipios que se encuentran de manera parcial en la subcuenca Perote-Libres, aunque parte de su territorio se localiza fuera de los límites de la misma. Más aún, en ocasiones las coordenadas geográficas de los pozos no son correctas y algunos puntos de concesión se encuentran fuera del espacio geográfico esperado.

En el acuífero Libres-Oriental se tiene un volumen total de extracción de 172 Mm³/año (Diario Oficial de la Federación, 2009a), esto indica que los 65.6 Mm³/año concesionados de este acuífero en los municipios de la subcuenca Perote-Libres representan el 40% del volumen aprovechado, es decir, la mayor extracción de agua de este acuífero (60%) se está dando en la otra mitad de la cuenca Oriental (la subcuenca “El Seco-Oriental”), donde se tiene un volumen concesionado de aproximadamente 106.4 Mm³/año.

Como se ha mencionado anteriormente, el descenso del nivel de agua de los axalapascos se ha atribuido a la sobreexplotación del acuífero que los alimenta (Alcocer *et al.* 2004). La conexión entre el lago Alchichica y el acuífero es comprobable por la presencia de manantiales localizados dentro del cráter del axalapasco, indicando que es un lago de tránsito que recibe un aporte de agua subterránea en la parte sur-sureste (Alcalá, 2004). Sin embargo, no se ha

realizado hasta el momento un estudio que muestre de manera directa la conexión entre la sobreexplotación del acuífero y el descenso en el nivel de los lagos de la cuenca Oriental.

Por otra parte, el mayor consumo de agua se da en el centro de la subcuenca, donde se localiza el Salado y los cuatro axalapascos. En esta zona el acuífero se localiza de 1- 4 m de profundidad y es donde se lleva la descarga del acuífero (Cruickshank, 1992), por eso es más somero que en el resto de la cuenca. En las zonas altas del área de estudio el acuífero se localiza hasta 500 m de profundidad y existe un mayor uso de agua superficial.

En 1984 se tenía registrada la presencia de 90 pozos en toda la cuenca Oriental (Carta de Aguas Subterráneas de 1984 en Alcocer *et al.* 2004). El censo realizado en el presente estudio indica la existencia de 593 pozos regularizados únicamente en la subcuenca Perote-Libres a pesar de la veda de control ya mencionada. Lo anterior es un indicador del aumento considerable en la necesidad de agua tanto en los campos agrícolas (por el aumento de zonas de riego) como en las poblaciones de la zona (por el crecimiento demográfico) y es además, un ejemplo de que promulgar leyes y establecer una política pública sin la capacidad correspondiente para implementarlas en campo no puede ser efectivo cuando tal política contradice las tendencias socioeconómicas de una región que son estimuladas por otras estrategias de desarrollo (Foster *et al.* 2004).

La cuenca Oriental es considerada como una área agrícola de gran importancia para el estado de Puebla (Arellano y Romero, 2005). En este tipo de regiones, el principal problema para un desarrollo sustentable es el manejo del agua, ya que la mayoría de las veces se lleva a cabo la sobreexplotación de los acuíferos (Flores y Del Rosal, 2004). Si bien es cierto que la mayor parte de las zonas agrícolas de la subcuenca Perote-Libres son de temporal (aprox. 90%), los municipios con mayor consumo de agua (Libres, Tepeyahualco, Guadalupe Victoria y Perote) presentan extensiones importantes de tierras de uso agrícola de riego y son los municipios que también presentan las mayores extracciones de agua/km² al año. Lo anterior se debe a la introducción de cultivos que requieren dotaciones de agua por encima de las que proveen las condiciones climáticas de la región: el maíz se desarrolla mejor en regiones donde la precipitación anual oscila de los 700 a 1,100 mm, mientras que para el haba, el nivel óptimo de precipitaciones debe estar en 1,000 mm (INIFAP y CIRPAC, 2011). En el caso de la papa, se requiere la irrigación constante para su óptimo crecimiento (Panigrahi *et al.* 2001) y para mantener un microclima favorable para el cultivo (French y Criddle, 1962). Por otra parte, la alfalfa se considera un cultivo de alto consumo de agua (hasta 1,630 mm/año) (Totos y Coca, 1998), al igual que el brócoli, que es una especie cultivada generalmente bajo riego ya que es

muy susceptible a la falta de humedad y requiere de 800 a 1,200 mm de agua durante el ciclo de producción (INIFAP y CIRPAC, 2011).

El cultivo de especies con altos requerimientos hídricos en la subcuenca Perote-Libres va de la mano con el uso de técnicas de riego inadecuadas. Es común observar zonas irrigadas por aspersión al mediodía (*ver Anexo IX-A*), cuando la insolación es mayor y provoca una pérdida importante de agua hacia la atmósfera. Para una región como la subcuenca Perote-Libres, la mejor técnica de riego es el goteo a nivel de suelo, en un horario en el cual no incida de manera directa la luz del sol (Arellano y Romero, 2005). Esta técnica implica que el agua se suministre en forma de gotas directamente a la zona radicular de cada planta y represente una eficiencia de riego del 95% así como un ahorro de hasta el 70% en comparación con el riego por aspersión (Fernández, 2005).

Así mismo, el ciclo de cultivo de riego en la subcuenca Perote-Libres es de Primavera-Verano (OEIDRUS 2010a, b), las siembra comienza en Abril y finaliza en Septiembre del mismo año. Generalmente las primeras cosechas de este ciclo inician en Junio y concluyen en Marzo del año subsecuente. Lo anterior indica que el inicio de la siembra ocurre cuando la humedad en el ambiente es mínima y el acuífero es más susceptible a las extracciones, pues finaliza la temporada de lluvias escasas (Diciembre-Marzo) donde se tiene una recarga menor.

En México, el volumen concesionado para uso agrícola en 2006 fue de 59,400 Mm³ que se utilizaron para regar 6.4 millones de hectáreas de cultivo (López, 2009), lo cual indica que, en promedio, en el país se utilizan 9,281 m³/ha/año de agua, lo cual varía de acuerdo al tipo de cultivo y la región de producción. Este volumen es considerable, a manera de comparación, en España la dotación media es de 7.010 m³/ha/año (Álvarez, 2004). Los municipios de Tepeyahualco (localizado en el centro de la subcuenca donde el acuífero es más somero y donde se encuentra la laguna El Salado) y Villa Aldama, presentan un promedio anual de dotación media de agua por encima de la media nacional, lo cual es una evidencia del mal uso del recurso hídrico en estos municipios.

El consumo de agua *per-cápita* en México es de aproximadamente 270 L/hab/día (CONAGUA 2002d), sin embargo este promedio es variable según la zona donde se localizan las poblaciones y el nivel de desarrollo de las localidades. Las áreas urbanas localizadas en climas templados y fríos presentan una dotación promedio de 200-250 L/hab/día, mientras que en las localidades rurales con el mismo clima la dotación promedio disminuye a 120 L/hab/día. En las zonas de climas cálidos, la dotación media de las áreas urbanas es de 200-300 L/hab/día, mientras que en las comunidades rurales, el promedio disminuye a 185 L/hab/día. En la subcuenca Perote-

Libres, el promedio de dotación de agua (164 L/hab/día) se encuentra por debajo de la media nacional y de localidades rurales de zonas cálidas. De los municipios que se encuentran totalmente dentro del área de estudio, únicamente Guadalupe Victoria presenta una dotación de agua superior al promedio nacional. Los municipios que tienen territorio en las zonas montañosas en el exterior de la subcuenca (Xiutetelco, Chignautla e Ixtacamaxitlán) presentan una disponibilidad superior a la media nacional, debido al abasto de agua superficial de ríos y manantiales. Sin embargo, en la parte de su territorio dentro de la subcuenca sufren de igual manera la baja disponibilidad del recurso.

A pesar del escenario descrito anteriormente, la visión de las autoridades con respecto al manejo del recurso hídrico en la región es contradictoria; consideran como adecuado el manejo que se está teniendo del agua en el sector agrícola e inapropiado en el sector público. Esto se explica por el hecho de que la agricultura es el motor económico de la región (Alcocer *et al.* 2004), factor que repercute de manera directa en la percepción que se tiene sobre el recurso.

Aunado a los problemas del uso agrícola del agua, se encuentran los relacionados con la distribución del agua potable en las comunidades donde las redes de distribución del líquido son muy antiguas y obsoletas y las fugas son un problema constante. A lo anterior se debe añadir la presencia de pozos clandestinos en los municipios de la subcuenca Perote Libres, los cuales, al no tener una regularización, extraen la cantidad de agua que el dueño del pozo considere necesaria. Las autoridades tanto municipales, estatales y federales no tienen control ni cifras exactas sobre este volumen que se está extrayendo de manera ilegal de los acuíferos de la región. A manera de ejemplo, las autoridades entrevistadas en el municipio de Tepeyahualco mencionaron la existencia de al menos 100 pozos clandestinos en la entidad.

Por otra parte, los municipios carecen de los recursos económicos y de personal técnico preparado para llevar a cabo la reparación y/o sustitución de estas redes. La problemática se agudiza por la falta de capacitación del personal encargado de generar los programas de obras y servicios necesarios, y por la falta de comunicación entre las autoridades locales y estatales que obedecen a diferentes políticas públicas. Estos problemas están más acentuados en las zonas altas de la subcuenca, donde se necesitan sistemas de bombeo para llevar el agua a las comunidades más alejadas y son las que han presentado el mayor descontento con las autoridades por los cortes en el suministro del recurso.

La falta de plantas de tratamiento de agua genera problemas de contaminación, ya que se promueve la descarga de aguas residuales domésticas e industriales a cielo abierto. Las autoridades locales consideran que actualmente los recursos subterráneos de la zona no están

contaminados, sin embargo ocurre lo contrario con los escasos recursos superficiales (manantiales y lagos), los cuales ya comienzan a verse afectados por lo menos, por la acumulación de residuos sólidos.

También se debe mencionar que Granjas Carroll de México es una de las empresas con mayor consumo de agua en México (Puga, 2010). Los datos del REPGA indican la concesión de 1.4 Mm³/año para uso de esta empresa. Los problemas generados por esta compañía incluyen el incremento en los problemas de salud entre los trabajadores de las granjas y los habitantes de las localidades cercanas a las mismas, así como el descenso en el nivel del acuífero y la contaminación del agua y el aire (Ponette & Fry, 2009).

Granjas Carroll pertenece a la transnacional Smithfield Foods, empresa que tiene entre sus antecedentes la mayor multa federal en Estados Unidos debido a la descarga ilegal de contaminantes en el río Pagan en el estado de Virginia. En el año de 1997 dicha empresa tuvo que pagar una multa de 12.6 millones de dólares por violar el Acta Federal de Aguas Limpias (US Department of Government, 1997). A este respecto, las autoridades tanto de Perote como de Guadalupe Victoria, así como sus habitantes no quieren tener relación alguna con dicha empresa ni llevar a cabo procedimientos legales por falta de apoyo estatal y federal, así como por temor a represalias de Smithfield Foods.

Existe una estrecha relación entre la pobreza de las poblaciones y la degradación de los recursos naturales. En estas condiciones, se acentúa la intensificación de actividades agrícolas, la extensión de agricultura en tierras marginales y la sobreexplotación de los recursos (Scherr, 2000). La pobreza rural, la ineficiente asignación de recursos económicos y la degradación de los recursos naturales son un fenómeno conjunto, inducido por la toma de decisiones equivocadas que favorecen la modernización de zonas agrícolas a gran escala dejando a un lado la eficiencia de la agricultura rural (Heat y Binswanger, 2006). La subcuenca Perote-Libres es un buen ejemplo de la relación anterior, ya que la mayor parte de las localidades de la región presentan un grado de marginación alto o muy alto (CONAPO, 2005). En el municipio de Lafragua por ejemplo, no se cobra el servicio de agua porque, de acuerdo con las autoridades, los pobladores no tienen los recursos económicos para pagarlo, por lo cual recibe el subsidio de parte del municipio y por lo tanto, no existen recursos para mejorar la infraestructura hidráulica municipal. Sin embargo, en contraste con lo anterior, en las zonas bajas de la subcuenca, principalmente en los municipios de Tepeyahualco, Libres, Guadalupe Victoria y Perote, se pueden observar grandes extensiones de terrenos agrícolas con maquinaria de riego de aspersión que es adquirida a través de programas de desarrollo agrícola federales y estatales (*ver Anexo IX-B*).

En México, la visión de cuenca de los problemas del agua subterránea y, por lo tanto, la comprensión del agua como recurso común, es un objetivo que aún no se ha alcanzado por los actores sociales ni institucionales. Los primeros, especialmente los agrícolas, no conocen las fronteras geográficas del acuífero; los segundos sí, pero no los problemas que trascienden los límites político-administrativos. Este es el caso de las gerencias estatales de la CONAGUA, donde cada funcionario conoce detalladamente los problemas en la porción del acuífero que corresponde a su estado (Marañón, 2002).

Así mismo, las autoridades de la subcuenca Perote-Libres conocen de manera parcial el arreglo institucional en cuestión de pagos por el recurso utilizado en el sector agrícola. Los entrevistados mencionan que las cuotas en este sector ingresan directamente a CONAGUA. Sin embargo, en México el agua para uso agrícola es gratuita (Pérez, 2008). La cuota de autosuficiencia por servicio de riego es acordada por los propios usuarios (Fernández, 2005) y tiene como requisito el cubrir los gastos de administración y operación del servicio así como la conservación y mantenimiento de las obras. Estas cuotas de autosuficiencia son sometidas a la autorización del Organismo de Cuenca¹ (Ley de Aguas Nacionales, 2008-Art. 68).

La gestión del recurso por parte de las asociaciones de usuarios en la subcuenca Perote-Libres ha sido equivocada, ya que existe un favoritismo hacia los sectores de mayores ingresos (“los hacendados”) al momento de dar las concesiones de agua para los campos agrícolas. Son estos grandes productores los que presentan el mayor consumo de agua en la subcuenca Perote-Libres.

Lo anterior puede provocar una problemática social mayor en la región: al existir una menor disponibilidad del recurso, la competencia por el agua será cada vez mayor. El hecho de que los grandes productores de la zona tengan prioridad en las concesiones de agua, está generando un panorama de desigualdad social y económica en la subcuenca Perote-Libres (Marañón, 2002). Los más beneficiados son los productores con altos ingresos, mientras que los pequeños productores están viendo mermada su producción, debido a la escasez tanto de lluvias para la agricultura de temporal como de concesiones de pozos para este sector.

¹ Organismo de Cuenca: Órganos colegiados de integración mixta, que serán instancia de coordinación y concertación, apoyo, consulta y asesoría, entre CONAGUA, incluyendo el Organismo de Cuenca que corresponda, y las dependencias y entidades de las instancias federal, estatal o municipal, y los representantes de los usuarios de agua y de las organizaciones de la sociedad, de la respectiva cuenca hidrológica o región hidrológica.

Ante la problemática ambiental que afecta a la subcuenca Perote-Libres (y la cuenca Oriental), la regulación de las concesiones de agua, las acciones de conservación de los recursos forestales así como la toma de conciencia de la población cobran mayor importancia. La creciente escasez del recurso hídrico hace necesario un cambio de actitud de los administradores locales. Por tanto, los distintos niveles de gobierno necesitan instrumentar acciones que lleven a impulsar cambios en las formas de riego y cultivos más adecuados, así como mecanismos para revalorar el agua y la asignación de cuotas. Si bien los subsidios al sector agrícola son necesarios, no es conveniente que parte de ellos se realicen a través de la subvención del pago del agua, sobre todo en zonas con poca disponibilidad del recurso (CONAGUA, 2006).

En el caso de acuíferos sobreexplotados como el del área de estudio, no hay una política óptima de manejo que no tenga que partir de una fuerte reducción en el bombeo, con los consiguientes impactos en la economía regional y la resistencia social a aceptar y aplicar dicho esquema de manejo (Escolero, 1993). Por ello, es necesario que cambie la percepción, tanto de las autoridades como de los pobladores, de que la cuenca Oriental es una zona apta para la agricultura como actualmente se está llevando. El hecho de que los proyectos planeados para abastecer a las ciudades de Puebla y el Distrito Federal con agua del acuífero Libres-Oriental estén cancelados, responde al hecho de que se tenía la apreciación errónea de que esta zona tenía un gran potencial de agua subterránea (Escolero *com. per.*). Las condiciones semidesérticas de la zona generan una recarga pobre del acuífero, el cual está siendo sobreexplotado actualmente (Diario Oficial de la Federación, 2009b) por la necesidad de mantener la producción de la región. Así mismo, la generación de una cultura del agua no se ha atendido de manera suficiente en la región (Marañón, 2002), ya que son escasos los programas de toma de conciencia de la población en la subcuenca Perote-Libres.

Además de la implementación de técnicas de riego más adecuadas en la subcuenca Perote-Libres, debe considerarse la rotación paulatina hacia cultivos mejor adaptados a las condiciones climáticas. El desarrollo de sistemas agroforestales que incluyen al nopal (*Opuntia spp.*) (Pimienta, 1992), la palma datilera (*Phoenix dactylifera*) (Melgajero y Salazar, 2004), el mesquite (*Prosopis spp.*) (Stanton *et al.*, 2001) así como cultivos suculentos de *Aloe vera* y *Agave cocui* (Díaz, 2001) entre otros, se han considerado como soluciones viables a los problemas de producción y degradación de las tierras áridas tropicales.

De la misma forma, una forma de atacar la problemática de escasez de agua en la subcuenca Perote-Libres deberá ser través de acciones concretas de la sociedad civil y mediante una vinculación más estrecha entre el ANP Cofre de Perote y la zona de influencia de la misma. La protección de las partes altas de la cuenca debe considerarse como un tema prioritario para la

protección ambiental y civil, lo cual requiere la declaración de las zonas de recarga como ANP (adicionales al Cofre de Perote) pero sobre todo la implementación práctica de estos decretos, ya que en ocasiones resultan contradictorias las política en la que se propone la reforestación intensa, pero sin el control necesario para proteger los recursos forestales existentes (Escolero *et al.* 2009), situación que es evidente en el Cofre de Perote, como se mencionó anteriormente.

Así mismo, entre los programas enfocados a la restauración y protección de zonas prioritarias para la captación de agua que ha sido aplicados con éxito a nivel mundial, se puede mencionar el programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) (Brunett *et al.*, 2010). Este sistema de pagos se ha vuelto una necesidad y una de las múltiples estrategias que, en el contexto de la globalización, pueden ser motor del desarrollo de las comunidades rurales de nuestro país (Delgado y Espino, 2007) (*ver decretos de protección, ANP y proyectos sustentables del área de estudio en Anexo VIII*).

El PSAH es un mecanismo estratégico de desarrollo sustentable, ya que con su instrumentación se pretende asegurar la conservación de procesos naturales que benefician a los seres humanos (García *et al.* 2004). En la subcuenca Perote-Libres ya se tiene un ejemplo de PSA en el ejido de Orilla del Monte (Jalacingo-Veracruz) el cual tiene una extensión de 2,764 ha, de las cuales 1,000 ha se han reforestadas a través del programa de Pago de Servicios Ambientales por Captura de Carbono (PSA-CABSA). En este ejido, 95 productores se dedican a la reforestación, promoción y comercialización de piñones que son vendidos en mercados regionales (Corbera *et al.* 2009).

Así mismo, y considerando el propio interés de las autoridades locales y el desarrollo económico de las poblaciones de la región como una prioridad, se debe fomentar el ecoturismo en la zona. Esta actividad es una forma novedosa de desarrollo turístico diferente a la propuesta convencional, sin la destrucción del paisaje, ni de la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas. Además, fortalece la cultura de los habitantes del lugar y el respeto a la naturaleza (Delgado y Espino, 2007). Esta forma de turismo favorece el desarrollo económico y la salud de los habitantes de la región, si estos son los que se encargan del diseño, manejo, mantenimiento y administración de estas áreas, por lo que se convierte en una estrategia de desarrollo rural. (Lindberg y Hawkins, 1993). En el municipio de Lafragua, bajo el marco del programa de turismo en zonas indígenas, se construyó el centro ecoturístico de Ocozotla (en la localidad del mismo nombre) donde se ofrece al visitante las actividades de senderismo interpretativo y natural, caminatas guiadas, fogatas al aire libre, observación del cosmos, talleres infantiles de educación ambiental y cuidado del medio ambiente, bicicleta de montaña, prácticas del turismo rural con agricultura orgánica y visita a las lagunas de Alchichica y Quechulac (CDI, 2010).

Estas estrategias debe ser promovida en los municipios de la subcuenca de Perote-Libres, sobre todo en las partes altas de la misma y en los valles del Cofre de Perote, donde aún quedan zonas conservadas de bosque (Arellano y Romero, 2005) que son aptas tanto para el PSA-CABSA, el PSAH y actividades ecoturísticas, debido a la captura de agua que se genera en estas zonas y la belleza escénica y cultural que las caracteriza.

9) CONCLUSIONES

- Existe un marcado estrés hídrico en la subcuenca Perote-Libres, el cual es más intenso hacia el centro de la misma en los meses de Marzo y Abril. Es en estos meses cuando los acuíferos de la región son más sensibles a la extracción de agua, debido a que la recarga por las precipitaciones es escasa.
- Por otra parte, se observa un excedente hídrico en las montañas que rodean a la subcuenca durante los meses de Julio, Agosto, Septiembre y Octubre. Lo anterior destaca la importancia de los bosques conservados en el Cofre de Perote, las sierras de Quimixtlan y Libres, así como los Humeros, ya que son las zonas donde se realiza la recarga de los acuíferos durante la estación lluviosa y conservan humedad que se filtra por percolación durante la temporada de estiaje.
- Existe una marcada variabilidad climática en la región: periodos alternados de lluvias por encima de la media y sequías meteorológicas, así como periodos de alta y baja evaporación y un aumento constante de la temperatura. Durante los periodos de sequía y alta evaporación en la zona es más frecuente la presencia del fenómeno de El Niño.
- El volumen total concesionado de agua en la subcuenca Perote-Libres es de 91.2 Mm³/año. La extracción de agua subterránea en la región asciende a 87.0 Mm³/año (96%). El uso agrícola acapara el 82% (74.7 Mm³/año) del total del volumen concesionado, mientras que el uso público-urbano y doméstico utiliza el 11% (10.0 Mm³/año). El mayor consumo de agua (72% = 68.5 Mm³/año) ocurre en cuatro municipios (Libres, Guadalupe Victoria, Tepeyahualco y Perote).
- En la mayor parte de los municipios, la disponibilidad de agua *per-cápita* (164 l/hab/día) se encuentra por debajo de la media nacional (270 l/hab/día), indicando la baja disponibilidad de agua para los habitantes. Lo anterior contrasta con los altos volúmenes concesionados para los campos agrícolas.
- Las autoridades locales consideran como adecuado el manejo del recurso hídrico en la agricultura, ya que esta actividad es el motor económico de la subcuenca Perote-Libres. Por otra parte, se considera como inadecuado el uso de agua en el sector público-urbano, debido a la antigüedad de la infraestructura que provoca constantes fugas y la falta de una cultura del cuidado del agua en los habitantes de la región.

10) RECOMENDACIONES

En la subcuenca Perote-Libres es necesario llevar a cabo acciones conjuntas con las autoridades locales para mitigar los efectos del consumo excesivo de agua en la región y lograr un manejo integral de los recursos. Entre las acciones prioritarias destacan las siguientes:

- Generar programas de reforestación y conservación de bosques en los municipios de la subcuenca Perote-Libres. Estos deben promoverse principalmente pero no exclusivamente en los municipios que presentan territorio en las zonas altas de la cuenca donde todavía se tienen zonas conservadas, pero amenazadas por la tala clandestina. Programas de PSAH y PSA-CABSA son una opción que debe considerarse en la región.
- Fomentar el ecoturismo: Existe el interés de las autoridades de la zona promover esta actividad, teniendo como marco de referencia los axalapascos, la zona arqueológica de Cantona y el ANP Cofre de Perote.
- Regular el consumo de agua de uso agrícola en la zona. Es necesario que los estados de Puebla y Veracruz promuevan el uso de técnicas de riego más adecuadas y cultivos idóneos para la región. El riego por goteo es una opción más apropiada que el riego por aspersión. Especies como la palma datilera o los agaves son más aptos que la alfalfa, el haba y el brócoli para producirse en zonas áridas como la subcuenca Perote-Libres.
- Se requiere el apoyo estatal para renovar las redes públicas de distribución de agua. Las fugas son frecuentes en la zona y los municipios, al parecer, no tienen los recursos económicos para llevar a cabo la modernización de las redes públicas.
- Programas de concientización de la población. El desperdicio del agua por los habitantes de la zona es mencionado constantemente por las autoridades. Por esta razón, son necesarios programas municipales que le muestren a los pobladores la situación actual del recurso. Lo anterior con la finalidad de que tomen conciencia de la problemática que tendrán que enfrentar los próximos años.
- Es necesario tomar acciones coordinadas entre distintos niveles de gobierno, dependencias, sector productivo y usuarios para salvaguardar el recurso agua en la zona de estudio así como los valores naturales y culturales de la región.
- Realizar estudios para evaluar el impacto de la extracción de agua subterránea en los axalapascos. Hasta el momento, no se sabe en qué porcentaje se puede estar acelerando la desecación de estos lagos debido por la sobreexplotación del acuífero que los alimenta.
- Llevar a cabo un estudio similar en la otra porción de la cuenca Oriental, es decir, en la subcuenca El Seco-Oriental, donde se lleva a cabo una extracción mayor de agua subterránea, con la finalidad de comparar el estatus socio-ambiental de ambas subcuencas y tener el panorama completo de la problemática ambiental de la cuenca Oriental.

11) LITERATURA CITADA

Formato EcoHealt Journal

- Agua (2010) *Centro Virtual de Información del Agua*. (www.agua.org.mx; Revisada el 10 de febrero de 2010).
- Alcalá A (2004) *Estudio hidrogeológico de Alchichica, estado de Puebla, México*. Mexico: Tesis Profesional (Ingeniero Geólogo), Facultad de Ingeniería-UNAM.
- Alcocer J, Escobar E (1990) The dryin up of the Mexican Plateau Axalapazcos. *Salinet* 4: 34-36.
- Alcocer J, Lugo A, Sánchez MR, Chávez M, Escobar E (1998) Threats to the saline lakes of the Oriental basin, Mexico, by human activities. *Verhandlungen International Vereinigung Limnologie* 26: 1383-1386.
- Alcocer J, Escolero OA, Marín LE (2004) *Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*. México: El agua en México vista desde la Academia Mexicana de Ciencias, Jiménez B, Marín L.E (eds.), Academia Mexicana de Ciencias.
- Alcocer J, Arce E, Zambrano L, Chiappa X (2010) Poblana alchichica: A threatened silverside species? *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie* 30: 1429-1432.
- Alemayehu T, Furi W, Legesse D (2007) Impact of water overexploitation on highland lakes of eastern Ethiopia. *Environmental Geology* 52: 147-154.
- Alfarra A (2004) *Modelling wáter resource management in lake Naivasha*. Holanda: Tesis de Maestría, Master of Science in Water Resource and Environmental Management. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.
- Álvarez J (1950) Contribución al conocimiento de los peces de la región de los llanos, estado de Puebla (México). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas* 6: 81-115.
- Álvarez J (1972) Algunos ejemplos de especiación en peces mexicanos. *Acta Politécnica Mexicana* 13: 81-89
- Álvarez X (2004) *Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden)*. España: Tesis profesional (Ingeniería civil) Universitat Politècnica de Catalunya.
- Arce E (2006) *Abundancia y distribución poblacional de Poblana alchichica (Pisces:Atherinopsidae), charal endémico del lago Alchichica, Puebla*. México: Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología – UNAM.
- Arellano A, Romero CD (2005) *Diagnóstico ambiental de la subcuenca Perote-Libres en los estados de Puebla y Veracruz, México*. México: Tesis Profesional (Biología), Facultad de Estudios Superiores Iztacala-UNAM.
- Arredondo JL, Borrego LE, Castillo RM, Valladolid MA (1983) Batimetría y morfometría de los lagos “maars” de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biótica* 8: 37-47.
- Arredondo JL (2002) Los axalapazcos de la Cuenca Orienta, Puebla. En de la Lanza-Espino, G y JL García (eds.) *Lagos y Presas de México*. México: AGT Editor.
- Arriaga L, Aguilar V, Alcocer J (2002) *Aguas continentales y diversidad biológica de México*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Ávila CH, Aguirre JR, García E (1994) Variación estructural del bosque de oyamel (*Abies hickelli* Flous & Gausson) en relación con factores ambientales en el Pico de Orizaba, México. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales* 3: 5-17.
- Barbour CD (1973) A biogeographical history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): A species flock from the Mexican Plateau. *Copeia* 3: 533-556
- Baron, JS, Poff NL, Angermeier PL, Dahm CN, Gleick PH, Hairston NG, Jackson RB, Johnston CA, Richter BG, Steinman AD (2002) Meeting ecological and societal needs for freshwater. *Ecological Applications* 12:1247-1260.
- Barradas VL (1983) Capacidad de captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae*, Lambert, de la región de las grandes montañas del estado de Veracruz. *Biótica* 8: 427-431.
- Bennett AJ (2000) Environmental consequences of increasing production: some current perspectives. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82: 89–95.

- Bithas K (2008) The sustainable residential water use: Sustainability, efficiency and social equity. The European experience. *Ecological Economics* 68: 221-229.
- Blanco H (2010) Áreas de recarga hídrica de la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica. *Research Journal of the Costa Rican Distance Education University* 2: 181-204.
- Bloom DD, Piller KR, Lyons J, Mercado N, Medina M (2009) Systematics and Biogeography of the Silverside Tribe Menidiini (Teleostomi: Atherinopsidae) Based on the Mitochondrial ND2 Gene. *Copeia* 2: 408-417
- Brunett E, Baró JE, Cadena E, Esteller MV (2010) Pago por servicios ambientales hidrológicos: caso de estudio Parque Nacional del Nevado de Toluca, México. *Ciencias Ergo Sum* 17: 286-294.
- Caballero M, Vilaclara G, Rodríguez A, Juárez D (2003) Short term climatic change in lake sediments from lake Alchichica, Oriental, Mexico. *Geofísica Internacional* 42: 529-537.
- Caballero M, Lozano S, Vázquez L, Ortega B (2010) Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 62: 359-377.
- Caire G (2004) *Retos para la gestión ambiental de la cuenca Lerma Chapala: obstáculos institucionales para la introducción del Manejo Integral de Cuencas*. En: Cotler, Helena. (Compil.). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Candela L, Elorza FJ, von Igel W (2009) *Impacto del cambio climático y escenarios de gestión sobre la recarga de la U.H Inca-Sa Pobla y S'albufera*. España: IX Jornada sobre estudios en la zona no saturada del suelo.
- Carabias J, Landa R (2005) *Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de recursos hídricos en México*. México: UNAM, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Carrasco G, Ort MH, Romero C (2007) Evolution and hydrological conditions of a maar volcano (Atexcac crater, Eastern Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159: 179-197.
- Carrera JJ, Gaskin SL (2009) Water management in the basin of Mexico: current state and alternative scenarios. *Hydrogeology Journal* 17: 1483-1494.
- CDI (2010) Turismo alternativo en zonas indígenas (<http://www.cdi.gob.mx/turismo/> revisada el 13 de Septiembre de 2011).
- CEPAL (1985) *Planes y marcos regulatorios para la gestión integrada de cuencas*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, División de Recursos Naturales y Energía.
- Chazaro MJ (1992) Exploraciones botánicas en Veracruz y estados circunvecinos I. pisos altitudinales de vegetación en el centro de Veracruz y zonas limítrofes con Puebla. *La Ciencia y el Hombre* 10: 67-115.
- Cisneros HL (1991) *Modelo numérico del acuífero de la Cuenca de Oriental*. México: Tesis Profesional (Ingeniero Civil), Facultad de Ingeniería-UNAM.
- CONABIO, (1998) *Subcuencas hidrológicas. Extraído de Boletín hidrológico. (1970). Subcuencas hidrológicas en Mapas de regiones hidrológicas. Escala 1:1000000*. México: Secretaría de Recursos Hidráulicos, Jefatura de Irrigación y control de Ríos, Dirección de Hidrología.
- CONABIO (2004). *Lenguas indígenas a nivel municipal, 2002. Escala 1:250000*. Datos extraídos de Serrano C., E., Embriz O., A. y Fernández H., P. (coord.). "Indicadores socioeconómicos de los pueblos indígenas de México, 2002". México: INI, PNUD y CONAPO.
- CONAGUA (2002a) *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Libres-Oriental, estado de Puebla*. CNA: Gerencia de Aguas Subterráneas.
- CONAGUA (2002b) *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Perote-Zalayeta, estado de Veracruz*. CNA: Gerencia de Aguas Subterráneas.
- CONAGUA (2002c) *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Huamantla, estado de Tlaxcala*. CNA: Gerencia de Aguas Subterráneas.
- CONAGUA (2002d) El agua, recurso escaso. Perspectivas para el año 2025 (www.infoaserca.gob.mx/ponencias/AGUA230802.pdf; Revisada el 18 de Mayo de 2010).

- CONAGUA (2006) *Curso "agua"*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA (2010a) *Acerca del agua* (<http://www.cna.gob.mx>; Revisada el 14 de Enero de 2010).
- CONAGUA (2010b) *Registro Público de Derechos de Agua*. (<http://www.cna.gob.mx>; Revisada del 11 de enero al 20 de Marzo de 2010).
- CONAGUA (2010c) Localizador de aprovechamientos (<http://www.cna.gob.mx>; Revisada el 14 de Marzo de 2010).
- CONAPO (2005) Índice de marginación a nivel localidad, 2005. (<http://www.conapo.gob.mx>; Revisada el 20 de septiembre de 2009).
- CONAPO (2010) Consejo Nacional de Población (<http://www.conapo.gob.mx/>; Revisada el 20 de Abril de 2010).
- Corbera E, González C, Brown C (2009) Institutional dimensions of Payments for Ecosystem Services: An analysis of Mexico's carbon forestry programme. *Ecological Economics* 3: 743-761.
- Cruickshank VLC (1992) Relación entre las aguas superficiales y subterráneas en una cuenca. *Ingeniería Hidráulica en México* 7: 53-63.
- Dajoz R (2002) *Tratado de ecología*. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- das Neves DG, Leao de Oliveira L, Cavalcanti A, dos Santos E, Castro J, Dutra A (2007) *Estimativa do balanço hídrico normal para o município de Oiapoque localizado no setor costeiro de Amapá*. Brasil: Núcleo de Hodrometeorología e Energías Renováveis, Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas de Estado do Amapá.
- de Buen F (1945) Investigaciones sobre ictiología mexicana. I. Atherinidae de aguas continentales. *Anales del Instituto de Biología-UNAM* 16: 475-532.
- de la Maza R (2000) Una historia de las Áreas Naturales Protegidas en México. *Gaceta Ecológica* 51: 15.34.
- de la Paz K (2011) *Perote surtiría de agua a Xalapa por sequía: CONAGUA*. México: Periódico y Agencia de noticias Imagen del Golfo. Edición del 28 de Marzo de 2011.
- Delgadillo C (1984) Musgos alpinos de México: Cofre de Perote y Pico de Orizaba. *Biótica* 9: 399-405.
- Delgado D, Espino J (2007) Ecoturismo para el desarrollo rural sustentable de la región Atenco- Texcoco. Nexquipaxac, un estudio de caso. *Revista Brasileña de Agroecología* 2: 950-953.
- Demant, A (1978) Características del eje neovolcánico mexicano y sus problemas de interpretación. *Revista del Instituto de Geología-UNAM* 2: 172-187.
- Devito K, Creed I, Gan T, Mendoza C, Petrone R, Silins U, Smerdon B (2005) A framework for broad-scale classification of hydrologic response units on the Boreal Plain: is topography the last thing to consider? *Hydrological Processes* 19:1705–1714.
- Diario Oficial de la Federación (2009a) *Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuíferos (Continúa en la Tercera Sección)*. México: SEMARNAT-CONAGUA.
- Diario Oficial de la Federación (2009b) *Decreto por el que se modifican los diversos por los que se constituyen reservas de aguas nacionales y se establece una veda en la Región Hidrológica número 18 Balsas*. México: SEMARNAT.
- Díaz PML, Plasencia MC (1997) *Caracterización fisonómica ecológica de la subcuenca de Oriental Puebla-Tlaxcala-Veracruz*. México: Tesis profesional (Biología) Iztacala-UNAM
- Díaz D (2011) *Concluyó 1ª. etapa de "La Célula" con un mes de atraso*. Imagen Poblana: edición del día 6 de junio de 2011.
- Díaz M (2001) Ecología experimental y ecofisiología: bases para el uso sostenible de los recursos naturales de las zonas áridas neotropicales. *Interciencia* 26: 472-478.
- Dourojeanni A, Jouravlev A, Chávez G (2002) *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y prácticas*. Chile: Organización de las Naciones Unidas, División de Recursos Naturales e Infraestructura; CEPAL-ECLAC.
- Dracup JA, Kendall DR (1990) *Droughts and water supply*. Estados Unidos: The International Symposium on Hydraulics/Hydrology of Arid Lands.

- Dunne T, Leopold L (1978) *Water in Environmental Planning*. Estados Unidos: W.H. Freeman and Company.
- Ern H (1972) Estudio de la vegetación en la parte oriental del México central. En especial de los bosques de las montañas en el área del proyecto Puebla-Tlaxcala. *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala* 6: 1-12.
- Ern H (1973) Repartición, ecología e importancia económica de los bosques de coníferas de los estados mexicanos de Puebla y Tlaxcala. *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala* 7: 21-23
- Escobar E, Alcocer J (2002) *Caecidotea williamsi* (Crustacea: Isopoda: Asellidae), a new species from a saline-lake in the eastern Mexican Plateau. *Hydrobiologia* 477: 93-105.
- Escolero OA (1993) *Manejo óptimo de un acuífero*. México: Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica. Facultad de Ingeniería-UNAM.
- Escolero OA, Alcocer J (2004) Desecación de los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato. En: *El agua en México vista desde la Academia Mexicana de Ciencias*, Jiménez B, Marín L.E (editores), México: Academia Mexicana de Ciencias, pp 99-115.
- Escolero OA (2006) The Mexican experience on groundwater user groups. España: *International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS)*.
- Escolero OA, Martínez SE, Kralishc S, Perevochtikova M (2009) *Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la ciudad de México en el contexto de cambio climático*. México: Centro Virtual de Cambio Climático, Ciudad de México – ICyTDF – Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Esquivel E (2002) Lluvia y sequía en el norte de México. Un análisis de la precipitación histórica en Chihuahua. *Gaceta Ecológica* 65: 24-42.
- Euillades P, Vénere M (2003) Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 19: 33-44.
- Fernández R (2005) *El Impacto de la Tarifa Eléctrica Subsidiada sobre la Adopción de Tecnología de Riego*. México: Tesis Profesional (Economía) Departamento de Economía, Escuela de Ciencias Sociales-UDLAP.
- Filonov A, Thereshchenko I, Alcocer J (2006) Dynamic response to mountain breeze circulation in Alchichica, a crater lake in Mexico. *Geophysical Research Letter* 33: doi:10.1029/2006GL025901.
- Flores S (2002) *La megalópolis de la región centro de México: una aproximación a su análisis*. México: BUAP-Colegio de Tlaxcala.
- Flores EZ, del Rosal A (2004) Recarga natural en una zona árida (<http://www.igeograf.unam.mx>; Revisada el 3 de Mayo de 2010).
- Foster S, Garduña H, Kemper K (2004) *México – “Los Cotas”: avances en la gestión participativa del agua subterránea en Guanajuato*. México: *GW-MATE Colección de Casos Esquemáticos Caso 10*.
- French H, Criddle WD (1962) *Determining consumptive use and irrigation water requirements*. Estados Unidos: US Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 1275.
- Fries J (1991) Management of natural forest in the semiarid areas of Africa. *Ambio* 20:395-400.
- Gálvez G (2008) *Crece la falta de agua en Puebla*. México: Periódico Mileno. Edición del 16 de Noviembre de 2008.
- García A, Calleja Y (2008) Las vías de circulación interna en Cantona. *Arqueología* 38: 125-160.
- García A, Merino BL (1998) Cantona: urbe prehispánica en el altiplano central de México. *Latin American Antiquity* 9: 191-216.
- García A, Montoya Y, Ibarra MV, Garza GG (2010) Economía y política en la evolución contemporánea de los usos de suelo y la deforestación en México. El caso del volcán Cofre de Perote. *Interciencia* 35: 321-328.
- García E, CONABIO (1998a) *Climas (clasificación de Koppen, modificado por García)*. Escala 1:1000000. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.
- García E, CONABIO (1998b) *Isotermas Medias Anuales*. Escala 1:1000000, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.
- García E, CONABIO (1998c) *Precipitación total anual*. Escala 1: 1000000. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.

- García I, Martínez A, Ramírez A, Niño A, Rivas AJ, Domínguez L (2004) La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. En: *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*, Cotler H (comp.), México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- García J (2010) *Efectos climáticos sobre el agua subterránea y el lago Alchichica Puebla, México*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM.
- García M (2011) *Sufren falta de agua 30,000 familias en Perote*. México: Periódico y Agencia de noticias Imagen del Golfo. Edición del 22 de Marzo de 2011.
- Gasca A (1981) *Algunas notas de la génesis de los lagos-cráter de la cuenca de Oriental. Puebla-Tlaxcala-Veracruz*. México: Departamento de Prehistoria, INAH-Colección Científica Prehistoria 98.
- GEO-México (2004) *Perspectivas del medio ambiente en México*. México: INE-PNUMA-SEMARNAT
- Gerez P (1982) *Historia del uso del suelo en la zona semiarida poblano-veracruzana*. México: Tesis Profesional (Biología), Facultad de Ciencias-UNAM.
- Geréz P (1983) Crónica del uso de los recursos naturales en la Cuenca de Perote-Libres. En: *El cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva*, Goldberg AD (comp.), México: Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bioticos.
- Gleick PH (2000) The changing water paradigm. A look at twenty-first century water resources development. *Water International* 1: 127-138.
- Gobierno Federal, Presidencia de la República (2010) *Cuarto Informe de Gobierno*. México
- Goldberg AD (Comp.) (1983) *El Cofre de Perote investigaciones ecologicas en una area conflictiva. Cuadernos de divulgacion 9*. México: Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bioticos.
- Gutiérrez M, Gerritsen P (2009) *Programa de capacitación en la aplicación de los instrumentos metodológicos del componente social del proyecto "Demandas hidrológicas de los ecosistemas naturales en México: Fase I*. México: Red Mex-LTER, UdeG-CUCS.
- Guerra MC (1986) Análisis taxonómico poblacional de peces aterinidos (*Chirostoma* y *Poblana*) de las cuencas endorréicas del extemo sur del altiplano Mexicano. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas* 30: 81-113.
- GWP (2000) *Integrated water resources management*. Suecia: Global Water Partnership.
- Hargreaves GH (1981) Water requirements and man-induced climate change. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 107: 247-255.
- Heat J, Binswanger H (2006) Natural resource degradation effects of poverty and population growth are largely policyinduced: the case of Colombia. *Environment and Development Economics* 1: 65-83.
- Heine K (1973) Variaciones más importantes del clima durante los últimos 40,000 años en México. *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala* 7: 51-58.
- Hernández ME, Torres LA, Valdéz G (2000) Sequía meteorological. En: *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, Gay C (Comp.). México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hurtado M (1982) *Contribución al conocimiento de la biología de Poblana alchichica alchichica, De Buen (*Pisces-Atherinidae*) del lago cráter Alchichica Puebla*. Tesis Profesional (Biología) Escuela Nacional de Ciencias Biológicas-IPN.
- IDEAM (2003) Guía técnico-científica para la ordenación y manejo de cuenca hidrográficas. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IMTA (2010) *INEGI pone en línea el simulador de flujos de aguas de cuencas hidrológicas* (<http://www.imta.mx>; Revisada el 10 de abril de 2010).
- INE (2000) *Áreas naturales protegidas de México con decretos federales*. México: Instituto Nacional de Ecología, Red para el Desarrollo Sostenible, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INEGI (2007) Estadísticas a propósito del día mundial del agua-2007. Datos nacionales. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

- INEGI (2009) Estadísticas a propósito del día mundial del agua-2009. Datos nacionales. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2010a) *Instituto Nacional de Estadística e Información Geográfica*. (<http://mapserver.inegi.gob.mx>; Revisada el 20 de enero de 2010).
- INEGI (2010b) Modelos Digitales de Elevación (<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/mde/menu.cfm>; Revisada el 12 de Mayo de 2010).
- INEGI (2010c) Mapoteca Digital (ver. 2.0). En línea: iris.inegi.gob.mx/mapoteca/ Revisada el 29 de Octubre de 2010
- INIFAP y CIRPAC (2011) Requerimientos agroecológicos de cultivos. En línea: <http://www.inifapcirpac.gob.mx/pagina/PotencialProductivo/Jalisco/AltosNorte/RegionAltosNorteReqAgroecologicos.pdf> Revisada el 20 de Agosto de 2011
- INIFAP y CONABIO (1995) *Edafología*. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.
- INIFAP (2007a) *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Puebla (periodo 1961-2003)*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- INIFAP (2007b) *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Veracruz (periodo 1961-2003)*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Izazola H (2001) Agua y sustentabilidad de la Ciudad de México. *Estudios demográficos y urbanos* 47: 285-320.
- Jackson RB, Carpenter SR, Dahm CN, McKnight DM, Naiman RJ, Postel SL, Running SW (2001) Water in a changing world. *Ecological Applications* 11: 1027-1045.
- Juárez MC (1992) El cambio de uso de suelo en el valle de Puebla-Tlaxcala y sus efectos en la población. *Geo-UNAM* 1: 9-11.
- Jujnovsky J (2006) *Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la Cuenca del Río Magdalena, Distrito Federal, México*. México: Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.
- Knoblich K (1971) Posibilidades de poner en explotación aguas subterráneas en la cuenca Puebla-Tlaxcala. *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala* 4: 30-34.
- Knoblich K (1973a) Las condiciones de las aguas subterráneas en la cuenca de El Seco-Oriental (Puebla-Tlaxcala/México). *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala* 9: 1-4.
- Knoblich K (1973b) La influencia de las condiciones de aguas subterráneas sobre la colonización de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala. *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala* 9: 7-11.
- Knoblich K (1978) La cuenca de El Seco-Oriental. Una reserva de agua subterránea natural para el futuro. *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala* 15: 231-234.
- Lindberg K, Hawkins DE (1993) *Ecotourism: A Guide for Planners and Managers*. Estados Unidos: The Ecotourism Society.
- Ley de Aguas Nacionales (2008) Última Reforma Diario Oficial de la Federación 18-04-2008. México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Loison M (2009) Los beneficios de la alfalfa. *Campo y Mecánica* número de primavera: 35-36
- López R (2009) *Perspectivas de la Gestión del Agua en México al año 2025. Proyecto CA0902.1*. México: IMTA-SEMARNAT.
- Lozada BI, Sentelhas PC (2003) Relaciones entre deficiencias y excedentes hídricos estimados a partir de los balances hídricos normal y secuencial. *Bioagro* 15: 209-215.
- Lugo A, Alcocer J, Chávez M, Vilaclara G, Gaytán M, Sánchez MR (1994) Los axalapazcos de Puebla, seis joyas del desierto. *Información Científica y Tecnológica* 16:32-36.
- McCabe G J, Markstrom SL (2007) *A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface*. USA: U.S. Geological Survey.
- Maderey LE (1967) *Aguas subterráneas en México*. México: Instituto de Geografía-UNAM
- Maderey LE (1990) *Evapotranspiración real en Hidrogeografía IV.6.6. Atlas Nacional de México*. Vol. II Escala 1 4000000. México: Instituto de Geografía UNAM.
- Maderey LE, Jiménez A (2000) Los recursos hidrológicos del centro de México ante un cambio climático global. En: *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, Gay C (Comp.). México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Marañón, B (2002) Participación social en el manejo del acuífero Huamantla-Libres Oriental-Perote. *Anuario IMTA 2002* 118-124.
- Martínez LM (2008) *Caracterización de la cuenca. Manual del curso: Manejo de Cuencas*. México: Red Mex-Lter – UdeG - CUCS.
- Meehan PD (2010) *Blood, fire and fertility: human remains and ritual practices at the temple pyramid groups of Cantona, Puebla, Mexico*. Canadá: Tesis de Maestría (Antropología), Université de Montréal.
- Mejía JA, Sandoval R (2004) Uso del agua subterránea en la región acuífera Irapuato-Valle de Santiago (México) y su impacto sobre el sistema hidrogeológico. *Boletín Geológico y Minero* 115: 311-318.
- Melgajero P, Salazar (2004) *Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas*. España: Mundi-Prensa Libros.
- Meneses L (2002) *Exploración geofísica e hidrogeológica en la laguna de Alchichica, cuenca de Libres-Oriental, estado de Puebla*. Tesis Profesional (Ingeniería Geofísica), México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Martínez JL (1988) *La vegetación de la zona noreste del Pico de Orizaba, Veracruz*. México: Tesis profesional (Biología). Facultad de Biología, Universidad Veracruzana.
- Morales, CL (1990) *Hidrogeología de la Cuenca de Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz*. México: Tesis Profesional (Ingeniero Geólogo), Facultad de Ingeniería-UNAM.
- Morales JE, Aguilar SH (2000) Avifauna del parque nacional Cofre de Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 2: 35-40.
- Moreno P (2009) *El proyecto ambiental, la conservación y el manejo de los humedales*. En: Breviario para describir, observar y manejar humedales, Moreno P, Warner BG (Eds.) México: INECOL A.C.
- Moreno, DM (2010) *Estimación del balance hídrico en Los Tuxtlas, Veracruz*. México: México: Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.
- Mosiño AP, García E (1968) *Evaluación de sequía intraestival en la República Mexicana*. México: Centro de Posgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. Universidad Autónoma Chapingo.
- Mosiño AP, Reyna T (1988) *La interrupción del alisio por recurva de los ciclones tropicales en el Golfo de México, causa parcial de la sequía intraestival*. México: Memorias de la segunda Reunión de Agroclimatología, Universidad Autónoma Chapingo.
- Moya JC (1987) *Análisis geomorfológico de la Cuenca de Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, México*. México: Tesis Profesional (Licenciatura en Geografía). Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Moyano E (2002) *La nueva cultura del agua: discursos, estrategias y agentes sociales*. España: Actas del III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Aguas.
- Narave H (1985) La vegetación del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Biótica* 10: 35-64.
- NOAA (2011) El Niño – Southern Oscillation (ENSO) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#current/>; Revisada el 1 de Abril de 2011).
- Ohngemach D (1973) Análisis polínico de los sedimentos del Pleistoceno reciente y del Holoceno en la región de Puebla-Tlaxcala. *Comunicaciones Proyecto Puebla-Tlaxcala* 7: 47-49.
- Ohngemach D (1977) Polen sequence of the Tlaloqua cráter (La Malinche volcano, Tlaxcala, Mexico). *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 36: 33-44.
- Ohngemach D, Straka H (1989) Late Quaternary vegetation history of the Mexican highland. *Plant Systematics and Evolution* 162: 115-132.
- OIEDRUS (2010a) Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable-Puebla (<http://www.oiedrus-puebla.gob.mx/>; Revisada el 12 de Abril de 2010).
- OIEDRUS (2010b) Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable-Veracruz (<http://www.oiedrus-veracruz.gob.mx/>; Revisada el 14 de Abril de 2010).
- Ortega R (1981) Vegetación y flora de una corriente de lava (malpaís) al noreste del Cofre de Perote, Veracruz. *Biótica* 6: 57-97.
- Ortiz BE, Ortiz RM (1986) *Aprovechamiento de agua potable para la Ciudad de México, de la Cuenca de Oriental, Puebla*. México: Tesis Profesional (Ingeniero Civil), Facultad de Ingeniería-UNAM.

- Oyarzún CE, Nahuelhual L, Núñez D (2005) Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo* 20: 88-95.
- Panigrahi B, Panda SN, Raghuwanshi NS (2001) Potato water use and yield under furrow irrigation. *Irrigation Science* 20: 155-166.
- Pereyra D, Angulo Q, Palma B (1994) Effect of ENSO on the mid-summer drought in Veracruz State, Mexico. *Atmósfera* 7: 211-219.
- Perez R (2008) *Contaminación agrícola y políticas públicas en México*. XI Jornadas de economía crítica, España.
- Peterson DF, Keller AA (1989) *Irrigated agriculture, in Climate and Water: Climatic Variability, Climate Change, and the Planning and Management of U.S. Water Resources*. Estados Unidos: John Wiley.
- Pimienta E (1992) *El nopal (Opuntia spp): una alternativa ecológica productiva para las zonas áridas y semiáridas*. En: De la I, ML y Sánchez S (coord.). Memorias del II Simposio y I Reunión Nacional de Agricultura Sostenible: Un enfoque ecológico, socioeconómico y de desarrollo tecnológico. México: Colegio de Postgraduados e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Ponette AG, Fry M (2009) Pig pandemic: Industrial hog farming in eastern Mexico. *Land Use Policy* 27: 1107-1110.
- Postel SL (1998) Water for food production. Will there be enough in 2025? *Bioscience* 48: 629-637.
- Puga J (2010) *Granjas Carroll y Volkswagen, con los mayores consumos de agua del país*: Rosas Landa. México: La Jornada de Oriente. Edición del 11 de enero de 2010.
- Reyes M (1979) *Geología de la Cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*. México: Departamento de Prehistoria, INAH Colección Científica Prehistoria 71.
- Rolim GS, Sentelhas PC, Barbieri V (1998) Planilhas no ambiente EXCELtm para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 6: 133-137.
- Rubiños E, Palacios E, Martínez MA, Valdivia R, Hernández E (2004) Caracterización del mercado de los derechos de agua en distritos de riego. *Terra Latinoamericana* 22: 217-224.
- Ruiz JC (2007) Plan de manejo del acuífero del Valle de Toluca. Tesis Profesional (Ingeniería Civil). México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Sánchez FJ (2004) *Medidas puntuales de permeabilidad*. Universidad de Salamanca, 11 pp. (<http://web.usal.es/javisan/hidro>, Revisada el 11 de octubre del 2009).
- Sandoval A (2006) *Participación social, conflicto y estrategias de consenso local para el manejo integral de los recursos hídricos en la cuenca hidrológica del acuífero del valle de Toluca*. En: Gasca Zamora, José (coord.), La Construcción de perspectivas de desarrollo en México desde sus regiones. México: Asociación mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, A.C., México.
- Scherr SJ (2000) A downward spiral? Research evidence on the relationship between poverty and natural resource degradation. *Food Policy* 25: 479-498.
- Seckler, D (1996) *The new era of water resources management: From "dry" to "wet" water savings*. Sri Lanka: IWMI Research.
- SEDUOP (2009) *Manifestación de impacto ambiental. Modalidad particular: rectificación de un tramo del cauce del río Salado y construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, dentro del conjunto denominado La Célula en el municipio de Oriental, estado de Puebla*. México: Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Puebla.
- SEMARNAT (2009) Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuíferos. En: *Diario Oficial de la Federación, tomo DCLXXI*, México, D.F., viernes 28 de agosto de 2009.
- Stanton J, Olson DK, Brock JH, Gordon RS (2001) The environmental and feasibility of alternative crops in arid areas: considering mesquite in Baja California, Mexico. *Journal of Arid Environments* 48: 9-22.

- Straka H, Ohngemach D (1989) Late quaternary vegetation history of the Mexican highland. *Plant Systematics and Evolution* 162: 115-132.
- Sumner G (1988) *Precipitation: Process and analysis*. Estados Unidos: John Wiley.
- Tamayo JL, West C (1969) The hydrography of Middle America. En: Wauchope R, West RC (eds). *Handbook of Middle America Indians*. Estados Unidos: University of Texas, Austin Press.
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geography Reviews* 38:55-94.
- Thornthwaite CW, Mather JR (1955) The water balance. *Publications in Climatology* 8: 1-86
- Totis LE, Coca MG (1998) Necesidades de agua de un cultivo de alfalfa y su relación con la productividad. *Revista de Tecnología Agropecuaria* 3: 22-24.
- Turc L, Lecerf H (1972) Indice climatique de potentialité agricole. *Science du Sol* 2: 81-101.
- Trenberth KE, Hoar TJ (1997) El Niño and climate change. *Geophysical Research Letters* 24: 3057-3060.
- UNESCO (2005) *Estrategias para la gestión de recarga de acuíferos (GRA) en zonas semiáridas*. Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- US Department of Government (1997) Smithfield Foods fined \$12.6 million, largest clean water act fine ever. <http://www.justice.gov/opa/pr/1997/August97/331enr.htm>
- Villers L, Trejo I (2000) El cambio climático y la vegetación en México En: *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, Gay C (Comp.). México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villers L, Rojas F, Tenorio P (2006) *Guía botánica del parque nacional Malinche, Tlaxcala-Puebla*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Werner G (1976) La deforestación en el volcán La Malinche y sus consecuencias en el desarrollo de los suelos, así como en sus propiedades ecológicas. *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala* 13: 19-24.
- World Vision (2004) *Manual de Manejo de Cuencas*. El Salvador: Visión Mundial El Salvador.

ANEXO I: Tectónica de la Cuenca Oriental (Tomado de Reyes, 1979)



ANEXO III: Definición de los suelos de la subcuenca Perote-Libres:

Andosoles: Suelos oscuros muy ligeros, con alto contenido de ceniza y otros materiales de origen volcánico.

Andosol ócrico: Andosol muy limoso o arcilloso a menos de 50 cm de profundidad; tiene una capa superficial clara y pobre en materia orgánica y nutrientes.

Cambisoles: Suelos con un subsuelo muy diferente a simple vista en color y textura a la capa superficial. La capa superficial puede ser oscura, con más de 25 cm de espesor pero pobre en nutrientes y en ocasiones no existe.

Cambisol éútrico: Cambisol con subsuelo rico o muy rico en nutrientes.

Feozems: Suelo con una capa superficial oscura, algo gruesa, rica en materia orgánica y nutrientes.

Feozem háptico: Feozem sin ninguna otra propiedad especial.

Feozem calcárico: Feozem con algo de cal a menos de 50 cm de profundidad.

Fluvisoles: Suelo con propiedades flúvicas, sin otros horizontes de diagnóstico.

Fluvisol éútrico: suelo aluvial, formado por materiales acarreados por el agua, poco desarrollado, con sedimentos disgregados y sin terrones

Litosol: Suelos con menos de 10 cm de espesor.

Regosoles: Suelos sin estructura y de textura variable, muy parecidos a la roca madre

Regosol calcárico: Regosol con algo de cal a menos de 50 cm de profundidad

Regosol éútrico: Regosol con subsuelo rico o muy rico en nutrientes

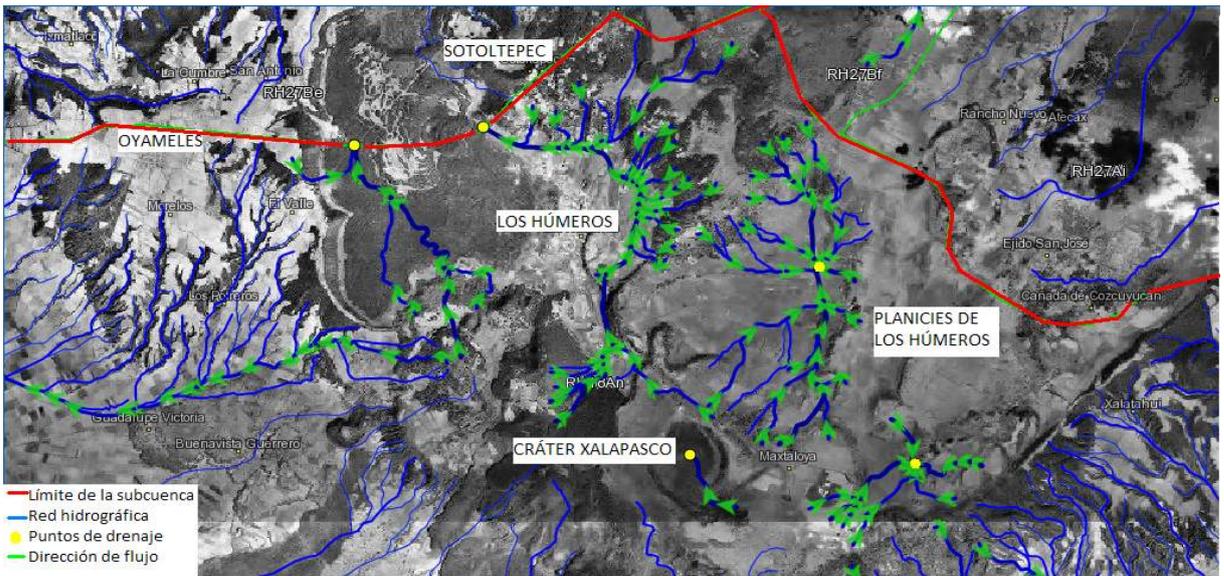
Regosol dístrico: Regosol con subsuelo pobre o muy pobre en nutrientes

Solonshaks: Suelos alcalinos con alto contenido de sales en alguna capa a menos de 125 cm de profundidad.

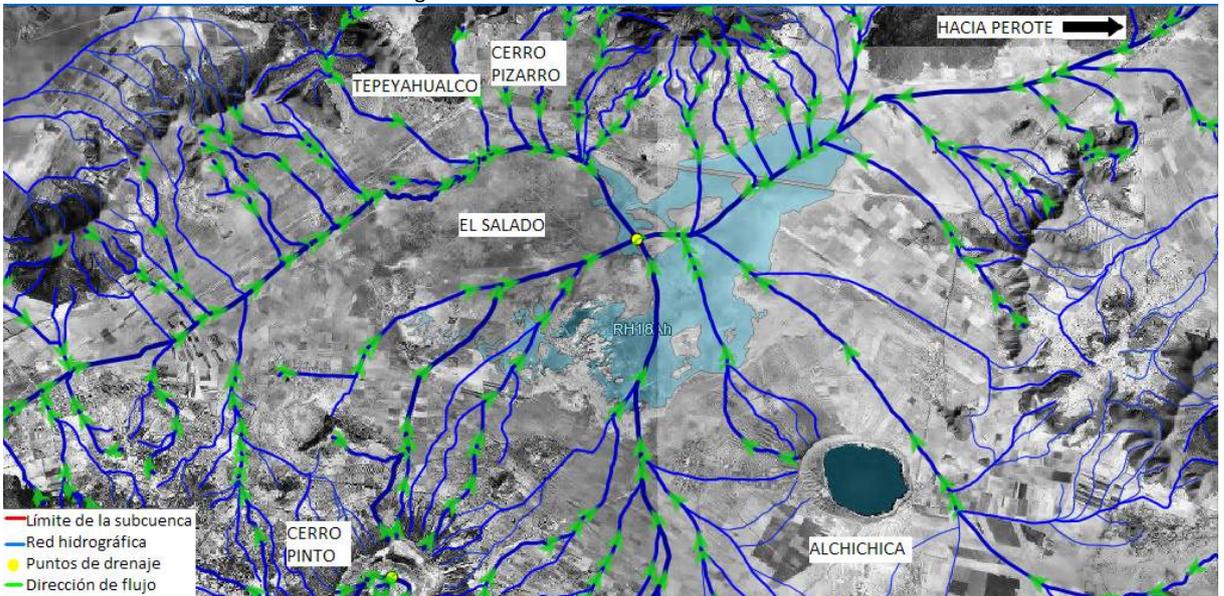
Solonshak takírico: Solonchak de textura arcillosa y con grietas en la superficie cuando el suelo está seco.

Fuente: INEGI (2008) *Diccionario de datos edafológicos. Escala 1:1,000,000 (vectorial)*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

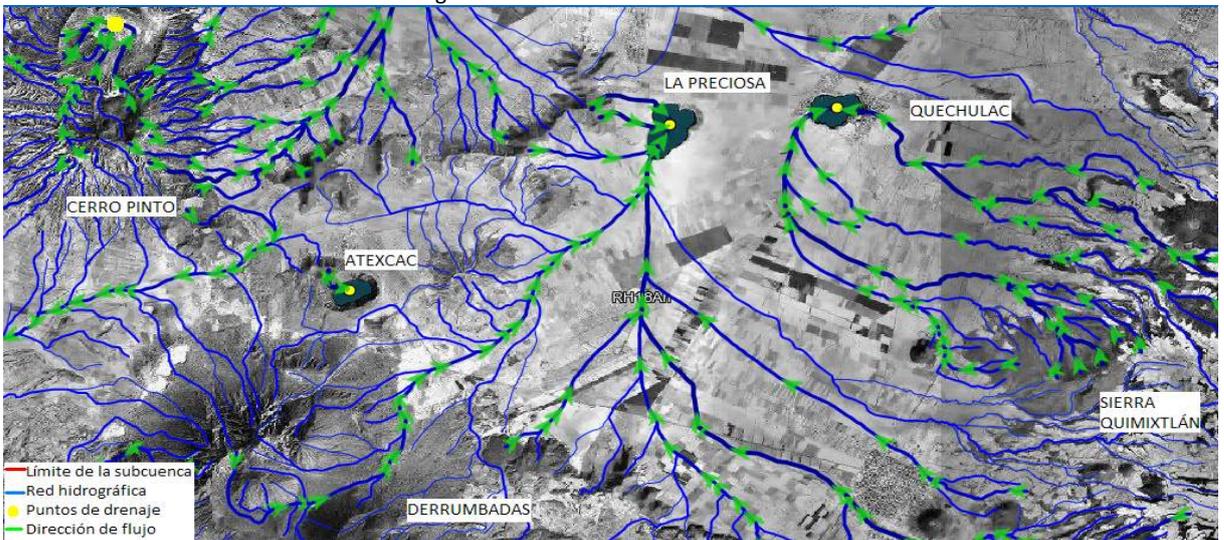
ANEXO IV: Detalles de la red hidrográfica de la subcuenca Perote-Libres



Detalle de la red hidrográfica en la zona norte de la subcuenca Perote-Libres



Detalle de la red hidrográfica en el centro de la subcuenca Perote-Libres



Detalle de la red hidrográfica al sur de la subcuenca Perote-Libres

ANEXO V-A: Polígono del acuífero Libres-Oriental (SEMARNAT, 2009)

ACUIFERO 2102 LIBRES-ORIENTAL

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	23	2.4	19	41	15.0	
2	97	19	53.3	19	42	52.3	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	97	13	49.4	19	21	51.9	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	97	12	21.9	19	19	53.8	DEL 4 AL 5 POR EL LIMITE ESTATAL
5	97	2	30.5	19	7	40.4	DEL 5 AL 6 POR EL LIMITE ESTATAL
6	97	16	3.0	19	1	47.5	DEL 6 AL 7 POR EL LIMITE ESTATAL
7	97	16	58.2	19	0	4.6	
8	97	18	53.8	18	59	2.0	
9	97	29	21.8	18	58	27.9	
10	97	33	5.1	18	58	30.2	
11	97	36	42.5	19	2	22.1	
12	97	37	24.2	19	1	24.1	
13	97	38	35.7	19	3	2.5	
14	97	41	43.2	19	5	52.2	
15	97	44	13.4	19	6	4.8	
16	97	45	4.8	19	8	12.1	
17	97	48	35.0	19	8	46.2	
18	97	52	40.9	19	5	50.0	
19	97	55	41.7	19	9	45.4	DEL 19 AL 20 POR EL LIMITE ESTATAL
20	97	51	31.7	19	29	27.1	
21	97	47	53.4	19	30	9.6	
22	97	42	58.0	19	33	26.1	
23	97	44	40.1	19	36	23.6	
24	97	41	52.0	19	37	43.8	
25	97	37	31.1	19	38	13.6	
26	97	37	51.1	19	40	17.5	
27	97	25	6.1	19	43	6.5	
1	97	23	2.4	19	41	15.0	

ANEXO V-B: Polígono del acuífero Perote-Zalayeta (SEMARNAT, 2009)

ACUIFERO 3004 PEROTE-ZALAYETA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	19	53.3	19	42	52.3	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	97	18	18.2	19	51	56.1	
3	97	13	18.3	19	48	54.7	
4	97	11	8.1	19	43	42.1	
5	97	13	39.6	19	40	19.3	
6	97	8	2.8	19	38	52.9	
7	97	7	41.6	19	36	19.6	
8	97	6	12.3	19	34	2.7	
9	97	8	56.4	19	29	14.4	
10	97	10	38.1	19	27	9.1	
11	97	11	27.2	19	24	19.6	
12	97	13	13.3	19	23	7.5	
13	97	13	49.4	19	21	51.9	DEL 13 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	97	19	53.3	19	42	52.3	

ANEXO VI: Tablas de resultados de los balances hídricos

Alchichica (laguna), DGE

MESES	Num de días	NDA	Temp oC	Precipitación mm	N horas	I	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP mm	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Ene	31	1	10.00	6.80	11.00	2.9	34.63	-27.8	-267.8	6.87	-2.20	9.0	25.6	0.0
Feb	28	32	11.00	9.80	11.40	3.3	36.85	-27.2	-295.1	5.23	-1.64	11.2	25.6	0.0
Mar	31	60	13.30	13.20	11.90	4.4	54.98	-41.8	-336.8	3.44	-1.79	15.0	40.0	0.0
Abr	30	91	15.30	31.70	12.50	5.4	67.48	-35.8	-372.6	2.41	-1.04	32.7	34.7	0.0
May	31	121	18.00	45.90	12.90	5.8	76.43	-30.5	-403.1	1.77	-0.63	46.5	29.9	0.0
Jun	30	152	15.70	84.10	13.20	5.7	73.78	10.3	-211.2	12.10	10.32	73.8	0.0	0.0
Jul	31	182	15.00	51.40	13.10	5.3	71.16	-19.8	-231.0	9.93	-2.17	53.6	17.6	0.0
Ago	31	213	15.10	58.80	12.70	5.3	69.60	-12.8	-243.8	8.73	-1.19	58.0	11.6	0.0
Sep	30	244	14.80	71.30	12.20	5.2	62.98	8.3	-176.9	17.05	8.32	63.0	0.0	0.0
Oct	31	274	13.40	26.80	11.60	4.4	54.14	-27.2	-204.1	12.99	-4.07	31.0	23.2	0.0
Nov	30	305	11.50	7.20	11.10	3.5	40.81	-33.6	-237.7	9.28	-3.71	10.9	29.9	0.0
Dic	31	335	10.10	4.10	10.80	2.9	34.45	-30.4	-268.1	6.85	-2.43	6.5	27.9	0.0
TOTAIS			161.2	409.0	144.4	54.1	677.28	-268.3		97	-2.22	411.2	266.1	0.0
MÉDIAS			13.43	34.1	12.0	4.5	56.44	-22.4		8.1		34.3	22.2	0.0

San Luis Atexcac (DGE)

MESES	Num de días	NDA	Temp oC	Precipitación mm	N horas	I	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP mm	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Ene	31	1	11.10	6.00	11.00	3.3	37.00	-31.0	-153.7	21.51	-7.81	13.8	23.2	0.0
Feb	28	32	12.10	10.30	11.40	3.8	39.18	-28.9	-182.6	16.11	-5.39	15.7	23.5	0.0
Mar	31	60	14.30	15.10	11.90	4.9	57.50	-42.4	-225.0	10.54	-5.57	20.7	36.8	0.0
Abr	30	91	15.90	37.80	12.50	5.8	68.02	-30.4	-255.4	7.78	-2.77	40.4	27.7	0.0
May	31	121	17.00	83.70	12.90	6.4	79.82	-16.1	-271.5	6.62	-1.16	64.9	15.0	0.0
Jun	30	152	18.70	102.60	13.20	6.2	77.05	25.5	-113.4	32.17	25.55	77.1	0.0	0.0
Jul	31	182	15.60	88.50	13.10	5.6	71.68	-3.2	-116.6	31.16	-1.01	69.5	2.2	0.0
Ago	31	213	15.20	55.20	12.70	5.4	66.96	-11.8	-128.4	27.70	-3.46	58.7	8.3	0.0
Sep	30	244	15.40	80.20	11.20	5.5	58.22	22.0	-70.0	49.68	21.98	58.2	0.0	0.0
Oct	31	274	14.20	37.40	11.60	4.9	55.49	-18.1	-88.0	41.46	-8.22	45.6	9.9	0.0
Nov	30	305	12.90	13.50	11.10	4.2	44.79	-31.3	-119.3	30.32	-11.14	24.6	20.2	0.0
Dic	31	335	11.50	5.70	10.90	3.5	38.56	-32.9	-152.2	21.83	-8.49	14.2	24.4	0.0
TOTAIS			171.9	495.8	143.5	59.5	694.26	-198.5		297	-7.49	503.3	191.0	0.0
MÉDIAS			14.33	41.3	12.0	5.0	57.86	-16.5		24.7		41.9	15.9	0.0

Libres, Libres (DGE)

MESES	Num de días	NDA	Temp oC	Precipitación mm	N horas	I	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP mm	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Ene	31	1	11.70	7.90	11.00	3.6	38.88	-31.0	-161.0	19.99	-7.26	15.2	23.7	0.0
Feb	28	32	13.10	13.90	11.40	4.3	42.92	-29.0	-190.0	14.95	-5.03	18.9	24.0	0.0
Mar	31	60	14.70	19.50	11.90	5.1	58.71	-39.2	-229.2	10.10	-4.85	24.3	34.4	0.0
Abr	30	91	16.10	50.30	12.50	5.9	68.16	-17.9	-247.1	8.45	-1.65	52.0	16.2	0.0
May	31	121	16.50	71.50	12.90	6.1	75.34	-3.8	-251.0	8.13	-0.32	71.8	3.5	0.0
Jun	30	152	16.60	97.20	13.20	6.2	75.27	21.9	-120.2	30.06	21.93	75.3	0.0	0.0
Jul	31	182	15.90	79.20	13.10	5.8	72.48	6.7	-100.0	36.78	6.72	72.5	0.0	0.0
Ago	31	213	15.90	57.70	12.70	5.8	70.27	-12.6	-112.6	32.44	-4.34	62.0	8.2	0.0
Sep	30	244	15.50	79.00	12.20	5.5	62.93	16.1	-72.4	48.50	16.07	62.9	0.0	0.0
Oct	31	274	14.60	41.80	11.60	5.1	56.66	-14.9	-87.2	41.81	-6.70	48.5	8.2	0.0
Nov	30	305	13.20	10.90	11.10	4.3	45.28	-34.4	-121.6	29.64	-12.16	23.1	22.2	0.0
Dic	31	335	12.00	8.80	10.80	3.8	39.61	-31.0	-152.6	21.74	-7.90	16.5	23.1	0.0
TOTAIS			175.8	537.5	144.4	61.4	706.51	-169.0		303	-5.50	543.0	163.5	0.0
MÉDIAS			14.65	44.8	12.0	5.1	58.88	-14.1		25.2		45.3	13.6	0.0

Francisco I. Madero (DGE)

MESES	Num de días	NDA	Temp oC	Precipitación mm	N horas	I	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP mm	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Ene	31	1	11.00	8.70	11.00	3.3	39.40	-30.7	-188.2	15.22	-5.47	14.2	25.2	0.0
Feb	28	32	12.40	9.50	11.40	4.0	43.33	-33.8	-222.1	10.85	-4.37	13.9	29.5	0.0
Mar	31	60	14.20	17.40	11.90	4.9	60.09	-42.7	-264.7	7.08	-3.77	21.2	38.9	0.0
Abr	30	91	15.50	33.40	12.50	5.5	68.71	-35.3	-300.1	4.98	-2.11	35.5	33.2	0.0
May	31	121	15.50	80.50	12.90	5.5	73.28	7.2	-210.4	12.20	7.22	73.3	0.0	0.0
Jun	30	152	15.00	79.70	13.20	5.3	69.43	10.3	-149.3	22.47	10.27	69.4	0.0	0.0
Jul	31	182	14.30	65.20	13.10	4.9	66.77	-1.6	-150.9	22.12	-0.35	65.6	1.2	0.0
Ago	31	213	14.10	54.50	12.70	4.8	63.52	-9.0	-159.9	20.21	-1.91	56.4	7.1	0.0
Sep	30	244	13.80	75.80	12.20	4.5	56.25	19.5	-92.2	39.76	19.55	56.3	0.0	0.0
Oct	31	274	12.80	47.80	11.60	4.2	50.94	-3.0	-95.3	38.57	-1.19	49.1	1.9	0.0
Nov	30	305	12.00	9.70	11.10	3.8	43.25	-33.6	-128.8	27.58	-10.99	20.7	22.6	0.0
Dic	31	335	11.20	8.80	10.80	3.4	39.63	-33.0	-161.9	19.82	-7.76	14.4	25.3	0.0
TOTAIS			161.6	488.9	144.4	54.0	674.60	-185.7		241	-0.88	489.8	184.8	0.0
MÉDIAS			13.47	40.7	12.0	4.5	56.22	-15.5		20.1		40.8	15.4	0.0

Perote, Perote

MESES	Num de días	NDA	Temp oC	Precipitación mm	N horas	I	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP mm	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Ene	31	1	10.10	10.20	11.00	2.9	37.69	-27.5	-100.0	36.77	-11.64	21.8	15.9	0.0
Feb	28	32	11.00	12.80	11.40	3.3	39.33	-26.5	-126.6	28.20	-8.57	21.4	18.0	0.0
Mar	31	60	13.20	11.70	11.90	4.3	57.31	-45.6	-172.2	17.87	-10.33	22.0	35.3	0.0
Abr	30	91	14.60	24.20	12.50	5.1	66.23	-42.0	-214.2	11.74	-6.13	30.3	35.9	0.0
May	31	121	15.10	32.30	12.90	5.3	73.72	-41.4	-255.6	7.76	-3.98	36.3	37.4	0.0
Jun	30	152	14.30	73.40	13.20	4.9	68.11	5.3	-203.7	13.05	5.29	68.1	0.0	0.0
Jul	31	182	13.50	49.20	13.10	4.5	64.92	-15.7	-219.4	11.15	-1.90	51.1	13.8	0.0
Ago	31	213	13.40	51.70	12.70	4.4	62.35	-10.6	-230.0	10.02	-1.13	52.8	9.5	0.0
Sep	30	244	13.40	102.10	12.20	4.4	57.96	44.1	-61.3	54.16	44.14	58.0	0.0	0.0
Oct	31	274	12.00	66.20	11.60	3.8	49.49	16.7	-34.4	70.87	16.71	49.5	0.0	0.0
Nov	30	305	11.00	25.50	11.10	3.3	41.03	-15.5	-50.0	60.68	-10.19	35.7	5.3	0.0
Dic	31	335	10.40	14.10	10.80	3.0	38.41	-24.3	-74.3	47.59	-13.10	27.2	11.2	0.0
TOTAIS			152.0	473.4	144.4	49.3	656.54	-183.1		370	-0.82	474.2	182.3	0.0
MÉDIAS			12.67	39.5	12.0	4.1	54.71	-15.3		30.8		39.5	15.2	0.0

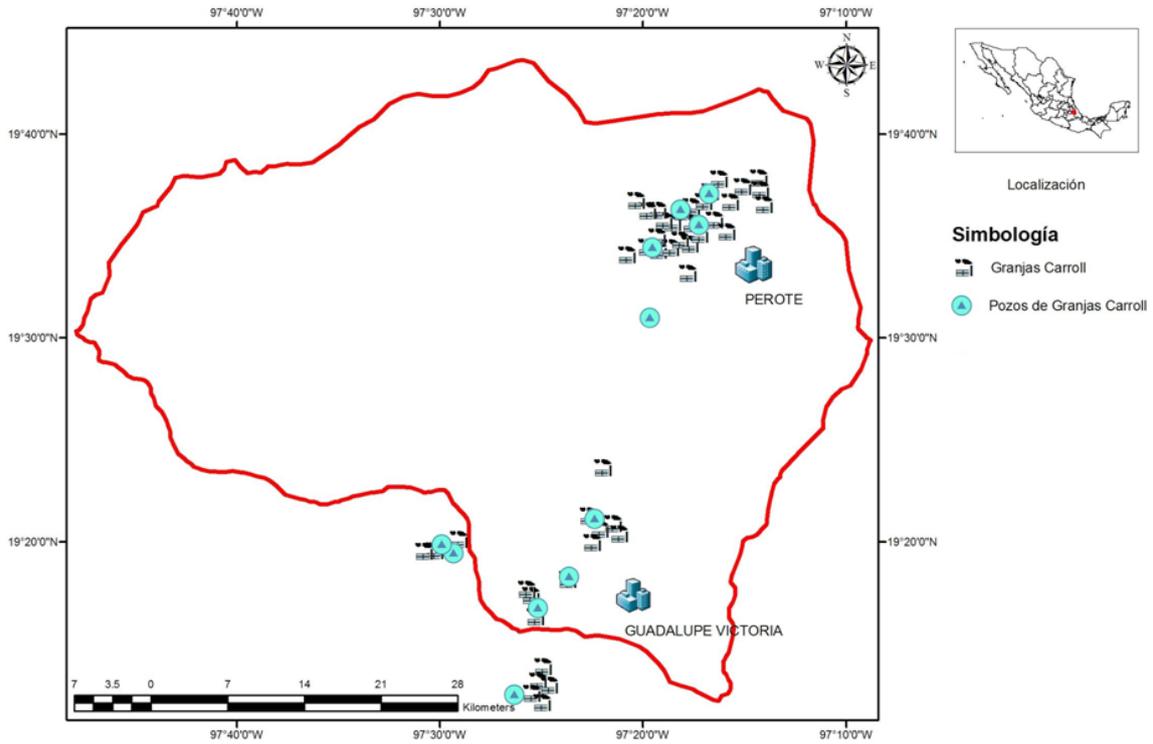
Zalayeta-Perote

MESES	Num de días	NDA	Temp oC	Precipitación mm	N horas	I	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP mm	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Ene	31	1	9.10	6.30	11.00	2.5	32.07	-25.8	-265.9	7.00	-2.06	8.4	23.7	0.0
Feb	28	32	10.30	7.80	11.40	3.0	35.26	-27.5	-293.4	5.32	-1.68	9.5	25.8	0.0
Mar	31	60	12.90	12.70	11.90	4.2	54.59	-41.9	-335.3	3.50	-1.82	14.5	40.1	0.0
Abr	30	91	14.90	27.20	12.50	5.2	66.91	-39.7	-375.0	2.35	-1.15	28.3	38.6	0.0
May	31	121	15.30	50.30	12.90	5.4	73.86	-23.6	-398.5	1.86	-0.49	50.8	23.1	0.0
Jun	30	152	15.30	75.70	13.20	5.4	73.14	2.6	-311.8	4.42	2.56	73.1	0.0	0.0
Jul	31	182	14.70	49.80	13.10	5.1	71.20	-21.4	-333.2	3.57	-0.85	50.7	20.6	0.0
Ago	31	213	14.60	47.90	12.70	5.1	68.42	-20.5	-353.7	2.91	-0.66	48.6	19.9	0.0
Sep	30	244	14.50	73.90	11.20	5.0	57.87	16.0	-166.4	18.94	16.03	57.9	0.0	0.0
Oct	31	274	12.90	35.20	11.60	4.2	53.21	-18.0	-184.4	15.81	-3.12	38.3	14.9	0.0
Nov	30	305	10.80	9.00	11.10	3.2	39.12	-30.1	-214.6	11.70	-4.11	13.1	26.0	0.0
Dic	31	335	9.70	4.10	10.80	2.7	34.21	-30.1	-244.7	8.66	-3.04	7.1	27.1	0.0
TOTAIS			155.0	399.9	143.4	51.1	659.87	-260.0		86	-0.40	400.3	259.6	0.0
MÉDIAS			12.92	33.3	12.0	4.3	54.99	-21.7		7.2		33.4	21.6	0.0

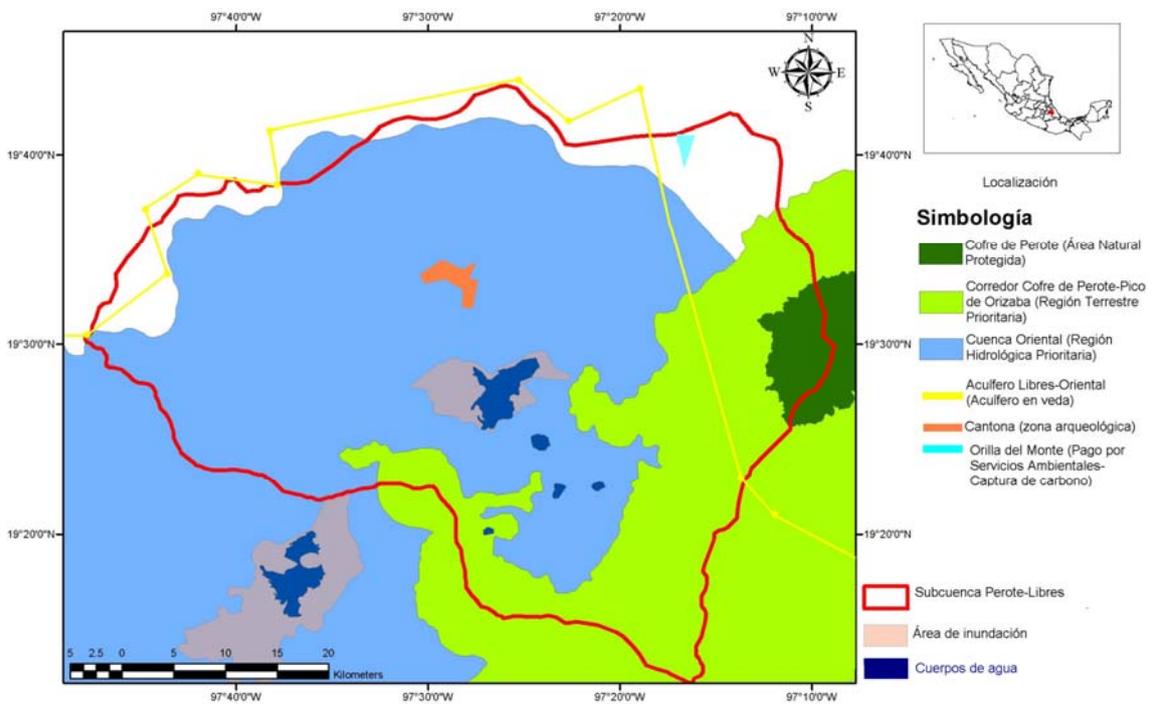
Oyameles, Tlatlauquitepec

MESES	Num de días	NDA	Temp oC	Precipitación mm	N horas	I	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP mm	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Ene	31	1	9.60	11.20	11.00	2.7	39.88	-28.7	-58.7	55.62	-18.47	29.7	10.2	0.0
Feb	28	32	10.30	12.00	11.40	3.0	40.48	-28.5	-87.1	41.83	-13.78	25.8	14.7	0.0
Mar	31	60	11.70	17.30	11.90	3.6	54.18	-36.9	-124.0	28.93	-12.90	30.2	24.0	0.0
Abr	30	91	12.90	30.90	12.50	4.2	61.63	-30.7	-154.8	21.28	-7.65	38.6	23.1	0.0
May	31	121	13.40	51.90	12.90	4.4	68.67	-16.8	-171.5	17.99	-3.28	55.2	13.5	0.0
Jun	30	152	12.60	129.80	13.20	4.1	63.34	57.5	-28.2	75.45	57.46	63.3	0.0	0.0
Jul	31	182	12.10	88.60	13.10	3.8	62.00	26.6	0.0	100.00	24.55	62.0	0.0	2.1
Ago	31	213	12.00	94.80	12.70	3.8	59.53	25.3	0.0	100.00	0.00	59.5	0.0	25.3
Sep	30	244	11.30	146.00	11.20	3.4	47.41	98.6	0.0	100.00	0.00	47.4	0.0	98.6
Oct	31	274	10.30	103.60	11.60	3.0	45.60	58.0	0.0	100.00	0.00	45.6	0.0	58.0
Nov	30	305	9.90	35.70	11.10	2.8	40.35	-4.6	-4.6	95.46	-4.54	40.2	0.1	0.0
Dic	31	335	9.50	13.70	10.90	2.6	39.04	-25.3	-30.0	74.09	-21.37	35.1	4.0	0.0
TOTAIS			135.6	716.5	143.5	41.4	622.11	94.4		811	0.00	532.6	89.5	183.9
MÉDIAS			11.30	59.7	12.0	3.5	51.84	7.9		67.6		44.4	7.5	15.3

ANEXO VII: Localización de granjas Carroll y los pozos concesionados a esta empresa



ANEXO VIII: Decretos de protección ambiental en la subcuenca Perote-Libres



ANEXO IX: Riego por aspersión y maquinaria de riego en el municipio de Libres (Abril, 2010)

A



B



ANEXO X: Resumen de los volúmenes concesionados en los municipios de la subcuenca Perote-Libres

Municipio	Subterránea	Superficial	Agrícola (sub)	Agrícola (sup)	Público (sub)	Público (sup)	Otros (sub)	Otros (sup)	Total
Altotonga	2.64	0.32	2.64	0	0	0.32	0	0	2.96
Ayahualulco	0	0.61	0	0	0	0.61	0	0	0.61
Chignautla	3.39	0	0	0	0	0	3.39	0	3.39
Cuyoaco	4.36	0.01	3.05	0.01	1.01	0	0.3	0	4.37
Guadalupe Victoria	13.22	0	11.27	0	1.9	0	0.05	0	13.22
Ixtacamaxitlán	0.09	0.363	0	0.003	0.09	0.23	0	0.13	0.453
Jalacingo	5.82	0.64	5.82	0	0	0.17	0	0.47	6.46
Lafragua	0.03	0.3	0	0	0.03	0.3	0	0	0.33
Libres	24.74	0.21	22.78	0.1	1.59	0.11	0.37	0	24.95
Ocoatepec	0.58	0.05	0.24	0	0.34	0.05	0	0	0.63
Oriental	5.84	0	5.25	0	0.07	0	0.52	0	5.84
Perote	11.79	1.62	10.21	0	0.57	1.6	1.01	0.02	13.41
Tepeyahualco	13.78	0	12.59	0	0.91	0	0.28	0	13.78
Villa Aldama	0.68	0.14	0.68	0.05	0	0.09	0	0	0.82
Total	87	4.2	74.5	0.16	6.5	3.5	5.9	0.62	91.2

Sub = agua subterránea
Sup = agua superficial

ANEXO XI: Encuesta aplicada a los informantes clave en el presente estudio

ENTREVISTA SEMI-ESTRUCTURADA A INFORMANTES CLAVE
 Proyecto Eco-Hidrología (CONACYT)
 Componente Social

Número de Entrevista _____
 Fecha de aplicación _____

• Descripción del informante

Nombre						
Edad	20-30 ()	31-40 ()	41-50 ()	51-60 ()	+61 ()	
Teléfono						
Cargo						
Función						
Institución						
Nivel estudio	Prim. ()	Sec. ()	Prepa ()	Lic. ()	M.C. ()	Dr. ()
Tipo de actor	Local ()		Municipal ()	Regional ()	Estatad ()	Federal ()
Recurso controlado	Económico ()	Relaciones ()	Normativo ()	Político ()		

• Problemas que percibe

1.- ¿Qué problemas del agua percibe usted en la localidad, municipio y/o región? (según el lugar de la entrevista)

2.- ¿Interviene usted para solucionar los problemas? ¿Cómo?

3.- ¿Cuáles son las causas que originan los problemas mencionados?

• Uso, manejo y acceso al agua

4.- ¿Cuales son los usos del agua que usted conoce y cómo se administra el agua en cada uno de estos?

Uso	administración

5.- ¿Cómo percibe usted la calidad de agua que se consume?

	¿Por qué?
Bueno ()	
Regular ()	
Malo ()	
No sé ()	

6.- Usted, ¿Cómo considera el manejo del agua de uso domestico en la localidad, municipio y/o región?

	¿Por qué?
Apropiado ()	
Regular ()	
Inapropiado ()	
No sé ()	

7.- Usted, ¿Cómo considera el manejo del agua de uso agrícola en la localidad, municipio y/o región?

	¿Por qué?
Apropiado ()	
Regular ()	
Inapropiado ()	
No sé ()	

8.- Usted, ¿Cómo considera el manejo del agua de uso industrial en la localidad, municipio y/o región?

	¿Por qué?
Apropiado ()	
Regular ()	
Inapropiado ()	
No sé ()	

9.- Usted, ¿Cómo considera el manejo del agua de uso ganadero en la localidad, municipio y/o región?

	¿Por qué?
Apropiado ()	
Regular ()	
Inapropiado ()	
No sé ()	

10.- ¿Cómo considera el manejo del agua de uso pesquero en la localidad, municipio y/o región?

	¿Por qué?
Apropiado ()	
Regular ()	
Inapropiado ()	
No sé ()	

11.- ¿Cómo considera el manejo del agua de uso turístico en la localidad, municipio y/o región?

	¿Por qué?
Apropiado ()	
Regular ()	
Inapropiado ()	
No sé ()	

12.- ¿Cuáles son las principales fuentes de abastecimiento?

Fuentes	Descripción
Manantial ()	
Pozo ()	
Río ()	
Arroyo ()	
Noría ()	
Red agua potable ()	

13.- La disponibilidad del agua es:

Disponibilidad	¿Porque?
Excelente	
Buena	
Regular	
Mala	

14.- ¿Cual es el tratamiento que le dan a las aguas residuales?

Tratamiento	Descripción
Ninguno	
Descarga a ríos, arroyos, mar	
Planta tratadora	

- Contaminación del agua

15.- ¿Cuáles son los factores que causan contaminación del agua?

16.- ¿Quiénes son los más afectados por la contaminación del agua?

	¿Por qué?
Sociedad ()	
Recursos naturales ()	
Economía local ()	
Autoridades ()	

17.- ¿Que se hace para contrarrestar la contaminación?

• Actores involucrados

18.- ¿Conoce usted instituciones publicas influyen en el manejo del agua?

Personas o instituciones	¿Con cuáles se relaciona usted?
SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales)	
SEMADES (Secretaria de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable)	
SEDER (Secretaria de Desarrollo Rural)	
PROFEPA	
CNA (Comisión Nacional del Agua)	
CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas)	
Ayuntamiento Municipal	
Ejidos	
Gobierno del Estado	
Otros (especificar)	

19.- ¿Conoce organizaciones sociales y productivas en la región?

Grupo	Función

20.- ¿Conoce usted como se organizan estas organizaciones? (Si) (No) Explique.

21.- ¿Cómo considera la relación interinstitucional entre estado y municipio respecto al agua?

• Infraestructura

22.- Conoce usted la infraestructura Hidráulica existente en el municipio? (Si) (No) Describa

Infraestructura hidráulica	Características
Unidad de riego ()	
Distritos de riego ()	
Agua potable ()	
Alcantarillado ()	
Tratamiento residual ()	
Presas ()	
Protección contra emergencias ()	

• Pago por servicio de agua

23.- El pago por servicio de agua se aplica al uso:

Uso	Cuota anual
Domestico ()	
Agrícola ()	
Ganadero ()	
Turístico ()	
Industrial ()	

24.- Considera que el costo por servicio del agua son:

Costo	¿Por qué?
Excesivo	
Normal	
Barato	

- Conflictos sociales por uso y manejo del agua

25.- ¿Usted se ha enterado de conflictos por el uso y manejo del agua?

Si ()	No ()
--------	--------

26.- Si respondió de forma afirmativa a la pregunta anterior. Los conflictos que se han suscitado tienen que ver con:

Conflictos	Características
Uso no domestico del agua	
Alza en las tarifas	
Por escasez del agua	
Por distribución del agua	
Por servicios del agua	
Por cambios administrativos	
Otros	

27.- Estos conflictos se han originado desde:

Origen de conflicto	Características
Grupos sociales informales	
Grupos sociales formales	
Autoridades locales	
Autoridades municipales	
Autoridades federales	
Empresarios	
Industrias	

28.- ¿Sabe usted si se han solucionado estos conflictos?

Si ()	No ()
Si afirmo ¿De que manera?	