



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS

Campus Tuxpan

Maestría en Ciencias del Ambiente

“Glaciar norte del Citlaltépetl y su relevancia hidrológica
para las localidades de la parte alta de la Cuenca
Jamapa-Cotaxtla”

TESIS

Que para obtener el título de:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AMBIENTE

P R E S E N T A:

Geog. Víctor Hugo Soto Molina

Director:

Dr. Jorge Luis Chagoya Fuentes

Co Director:

Dra. Ana Cecilia Travieso Bello

Tuxpan, Veracruz

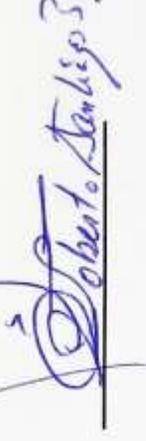
2014



UNIVERSIDAD VERACRUZANA
Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
Maestría en Ciencias del Ambiente



Revisión del trabajo de intervención del alumno: Victor Hugo Soto Molina

Nombre	Fecha	Fecha	Dictamen	Firma
<u>Becca Iddalia Hernández Hino</u>	<u>04/08/2014</u>	<u>07/08/2014</u>	<u>Aprobado</u>	
<u>José Luis Alanís Méndez</u>	<u>04/08/2014</u>	<u>04/08/2014</u>	<u>Aprobado</u>	
<u>Roberto Santiago S.</u>	<u>04/08/2014</u>	<u>04/08/2014</u>	<u>Aprobado</u>	

En la presente revisión se acordó que el trabajo de intervención denominado "Glaciar norte del Citlaltépetl y su relevancia hidrológica para las localidades de la parte alta de la Cuenca Jamapa-Cotaxtla" que presenta el sustentante para obtener el Título de Maestro, está terminado por lo que puede proceder a su inmediata impresión.

El presente trabajo de intervención: **“Glaciar norte del Citlaltépetl y su relevancia hidrológica para las localidades de la parte alta de la Cuenca Jamapa-Cotaxtla”**, realizada por el C. Víctor Hugo Soto Molina, bajo la dirección del Dr. Jorge Luis Chagoza Fuentes y asesoría del consejo particular de la Dra. Ana Cecilia Travieso Bello, ha sido revisado y aprobado como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AMBIENTE



DR. JORGE LUIS CHAGOZA FUENTES
DIRECTOR



DRA. ANA CECILIA TRAVIESO BELLO
CODIRECTOR

Tuxpan de Rodríguez Cano, Ver. agosto 2014

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Veracruzana la oportunidad de continuar mi preparación profesional...

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su respaldo financiero durante los dos años de duración del programa de Maestría...

A mi director de tesis y codirectora por sus sugerencias y observaciones que me guiaron de forma acertada a través del proyecto de investigación...

Al Dr. Hugo Delgado Granados del Instituto de Geofísica de la UNAM por su tiempo y valiosas observaciones...

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem del Instituto de Geografía de la UNAM por su tiempo y sugerencias que facilitaron mi trabajo...

Al Dr. José Luis Alanís M., por su apoyo durante el programa de posgrado y por la facilidad administrativa brindada en el proceso de titulación...

A mis profesores y compañeros por compartir sus conocimientos y experiencias.

Índice general

Introducción.....	1
Antecedentes	4
1. Objetivos.....	15
1.1. General	15
1.2. Particulares	15
2. Área de estudio.....	16
3. Material y métodos	22
4. Resultados.....	36
4.1 Evolución en el tiempo de la temperatura del aire en la superficie del glaciar que ha condicionado su retroceso.....	36
4.2 Cálculo de la oferta hídrica potencial del glaciar.	43
4.3 Identificación de los asentamientos hídrico-dependientes del glaciar.....	45
4.4 Caracterización del proceso de los escurrimientos hídricos del glaciar hasta su aprovechamiento por las comunidades.	48
4.5 Ámbito socioeconómico y crecimiento poblacional de las comunidades involucradas.....	59
4.6 Posición gubernamental ante la problemática.....	66
Discusión.....	80
Conclusión y aplicaciones.	88
Bibliografía.....	92
Anexo A. Resumen de índices socioeconómicos.....	99

Índice de figuras

Figura 1. Esquema general de un glaciar de montaña. Fuente: IDEAM (2012).	4
Figura 2. Población mundial y deforestación acumulada. Fuente: Conde (2006). ...	6
Figura 3. Incremento media de la temperatura glacial tropical, Perú. Fuente: Comunidad Andina (2007).....	8
Figura 4. Gráfico del retroceso gradual y vista panorámica del glaciar Chacaltaya, Bolivia. Fuente: Comunidad Andina (2007).....	9
Figura 5. Superficies comparables en el tiempo del glaciar el Ventorrillo del Volcán Popocatepetl. México. Fuente: Delgado Granados (2007).....	11
Figura 6. Relación de temperatura, radiación incidente y flujo hídrico proveniente del glaciar Zongo, Bolivia entre octubre de 1993 y septiembre de 1994. Fuente: Ribstein <i>et al.</i> , (1995).	13
Figura 7. Mapa del área de estudio. Elaboración propia.	18
Figura 8. Perfil con dirección 90° a partir del cráter del volcán. Elaboración propia.	19
Figura 9. Mapa de estaciones para calcular el GVTT. Elaboración propia.	25
Figura 10. Comportamiento de la temperatura en la superficie central del glaciar.	37
Figura 11. Tendencia extrapolada hasta alcanzar la temperatura media de 0°C. .	38
Figura 12. Secuencia cronológica de mapas térmicos para los años 1907, 2000 y 2029 respectivamente. Elaboración propia.	39
Figura 13. Isotermas 0°C para 1907 (azul), 2000 (verde) y 2029 (rojo). Elaboración propia.	40
Figura 14. Isotermas en relación a las isohipsas. Elaboración propia.	41

Figura 15. Perspectiva del volcán con las isothermas. Elaboración propia.....	42
Figura 16. Volumen en planta y perfil del glaciar. Elaboración propia.....	44
Figura 17. Mapa de localidades hídrico-dependientes identificadas. Elaboración propia.....	47
Figura 18. Fotografía tomada de norte a sur hacia el límite inferior del glaciar. Se aprecia el suelo tipo andosol úmbrico con su característico color oscuro. El cúmulo rocoso de la derecha corresponde al Sarcófago.	49
Figura 19. Perfil del suelo tipo andosol úmbrico. Fuente: IUSS-FAO (2006).	50
Figura 20. Diversos perfiles edafológicos complejos en las partes inferiores del cono volcánico. Fuente: Rossotti y Carrasco-Nuñez (2004).	53
Figura 21. Embalse para la captación de agua.	55
Figura 22. Trazo parcial de la manguera principal de abastecimiento. En la parte superior, en blanco, se aprecia el permafrost.....	55
Figura 23. Entrada de la cisterna de almacenaje, se aprecia la manguera principal sujeta mediante un madero (Potrero Nuevo, La Perla).	56
Figura 24. Ramificación de mangueras secundarias en la base de la cisterna (Potrero Nuevo, La Perla).....	56
Figura 25. Mangueras secundarias mediante las cuales es llevada el agua hacia los hogares (Potrero Nuevo, La Perla).	57
Figura 26. Necesidades diarias por persona según actividad realizada. Fuente: Organización Panamericana de la Salud (2009).	58
Figura 27. Grados de marginación municipal y local. Elaboración propia.	60
Figura 28. Comunidades con y sin transporte público.....	61

Figura 29. Grado educativo por localidad. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2010).	62
Figura 30. Ingreso por habitante. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2010).	63
Figura 31. Principal problemática manifestada.....	63
Figura 32. Incremento poblacional y de número de viviendas. Según datos de INEGI 2000 y 2010.....	65
Figura 33. Tendencia y proyección poblacional.	66

Índice de cuadros

Cuadro 1. Grupo de estaciones para el cálculo del GVTT.	24
Cuadro 2. Tabulación de datos y cálculo de gradientes.	25
Cuadro 3. Temperatura media anual extrapolada a 5,340 msnm.	36
Cuadro 4. Comunidades hídricamente dependientes de los escurrimientos del glaciar.	46
Cuadro 5. Proyección exponencial de la población.	65

Resumen

La degradación del glaciar norte del Citlaltépetl afectará seriamente a miles de habitantes que dependen de sus escurrimientos naturales para satisfacer sus necesidades de agua potable. En la alta cuenca Jamapa-Cotaxtla existen 25 comunidades altamente marginadas, que a pesar de lo rudimentario en su sistema de abasto de agua, cuentan actualmente con una oferta suficiente para cada hogar; sin embargo, ésta podría ser muy distinta próximamente, por lo que tomar medidas de adaptación ante el futuro que se prevé es una tarea que demanda atención inmediata. El propósito de este trabajo, además de señalar y caracterizar el proceso del retroceso glacial y sus consecuencias hídricas en el Pico de Orizaba, consiste en servir para la toma de decisiones en materia de políticas públicas, particularmente para el abastecimiento de agua potable de la región. Se generó un modelamiento térmico del volcán con el gradiente térmico de la zona y mediante el modelo digital de elevación, que ha permitido entender el proceso de extinción del glaciar. Se realizó la prospección para confirmar cómo los escurrimientos son llevados a cada uno de los hogares de las poblaciones. Finalmente, se revisaron los planes y programas actuales en materia hídrica y de desarrollo para conocer las acciones que los gobiernos realizarán ante este escenario. El modelamiento térmico a futuro señala que el glaciar podría estar extinto cerca del año 2030, ocasionando que la relación oferta-demanda de agua para entonces dé como resultado un déficit hídrico. Tras la revisión de cada uno de los planes y programas se ha detectado la inexistencia de proyectos o gestiones que procuren dicho abastecimiento, por lo que se ha dejado de lado esta prioridad debido entre otras razones, al desconocimiento de la importancia que el glaciar norte posee como proveedor hídrico potable para las comunidades de la alta cuenca Jamapa-Cotaxtla.

Palabras clave: Cambio climático, Extinción glaciar, Agua potable.

Introducción

La población del planeta ha notado que tanto el invierno como el verano son cada vez más cálidos; así mismo, los medios masivos de comunicación presentan con más frecuencia alteraciones a los ecosistemas debido al cambio climático: el derretimiento de los polos, el retroceso y progresiva desaparición de los glaciares, la pérdida de bosques, los incendios forestales, la falta de agua, el avance de las zonas desérticas y el incremento en la intensidad y frecuencia de huracanes entre otros, afectando con esto las actividades primarias que sustentan la economía y desequilibrando la salud pública de muchas regiones del planeta. Sin duda, los efectos mencionados con anterioridad aquejan a unos países más que otros, pero todos comparten algo en común: un cambio progresivo en las condiciones climatológicas como consecuencia del *modus vivendi* de un sociedad consumista, la cual es dependiente de la quema de los combustibles fósiles para producir la energía que es demandada por la industria y las grandes ciudades.

El servicio ambiental más importante para la subsistencia de los seres vivos es el agua (CONAGUA, 2011), y a la vez constituye la base del mantenimiento de la vida en el planeta (Larraín, 2007). En 1999, el Fondo de Población de las Naciones Unidas (UNFPA) identificó que los países subdesarrollados tienen un déficit de agua dulce como resultado de la deforestación de sus cuencas de captación. Además, señaló que el calentamiento de la atmósfera continuará

afectando los recursos hídricos tanto sólidos (glaciares), lénticos (lagos) y fluviales (ríos), reduciendo su volumen y superficie.

El agua en la Tierra es abundante, pero la mayoría de ésta posee características salobres; solamente el 3% del recurso está constituido por agua dulce, y a su vez, el 77% de esa agua dulce se encuentra congelada en los polos y en los glaciares de las altas cordilleras (Larraín, 2007). Sin embargo, los glaciares de montaña manifiestan cambios dramáticos como respuesta a los cambios de las condiciones climáticas de las últimas décadas, registrándose una pérdida progresiva y constante de su volumen en los últimos 100 años (Ariza, 2006).

Debido a lo mencionado anteriormente, surgen algunas preguntas ¿Qué pasará con las fuentes hídricas que son abastecidas por los Glaciares? y en caso de que los glaciares reduzcan su tamaño o desaparezcan ¿Cuál será su impacto en la sociedad que día a día incrementa su demanda de agua debido al crecimiento poblacional?

Por lo tanto, los objetivos de esta investigación van dirigidos a reconocer cómo el aumento en la temperatura del aire de las últimas décadas ha sido un factor más que condiciona el retroceso de la mayor reserva de agua sólida que el país posee, y en identificar el proceso de fusión-escurrimiento-captación de agua

potable que se lleva acabo para el aprovechamiento de las comunidades aledañas; para que finalmente se obtenga un panorama de la problemática que se avecina en cuanto el abasto hídrico para los asentamientos de la parte superior de la cuenca. Esto último resulta de gran importancia como herramienta para la gestión pública en los tres niveles de gobierno.

La presenta investigación es abordada, de inicio, analizando la evolución temporal de la temperatura en las inmediaciones del glaciar, lo cual ha sido uno de los factores determinantes en su constante degradación. Se calcula el volumen potencial de agua contenido en su cuerpo de hielo para estimar su oferta hídrica, y se analiza proceso de escorrentía por fusión, así como su captación. Se identifican las comunidades a las cuales sus flujos hídricos abastecen, y a la vez se analiza el crecimiento poblacional de las mismas para comprender la relación oferta-demanda del recurso. Por último, se analizan los diversos Planes de gobierno para saber su estado del conocimiento sobre este hecho y conocer si existen propuestas de adaptación a futuro que contemplen métodos alternos de abastecimiento hídrico una vez que el actual método natural haya sido agotado.

Antecedentes

Un glaciar es una masa acumulada (a través de cientos o miles de años) de hielo en movimiento que transforma agua sólida (nieve, granizo o escarcha) en hielo y la restituye en forma de vapor (por evaporación o sublimación) o en forma líquida a través de escurrimientos por fusión (Comunidad Andina, 2007).

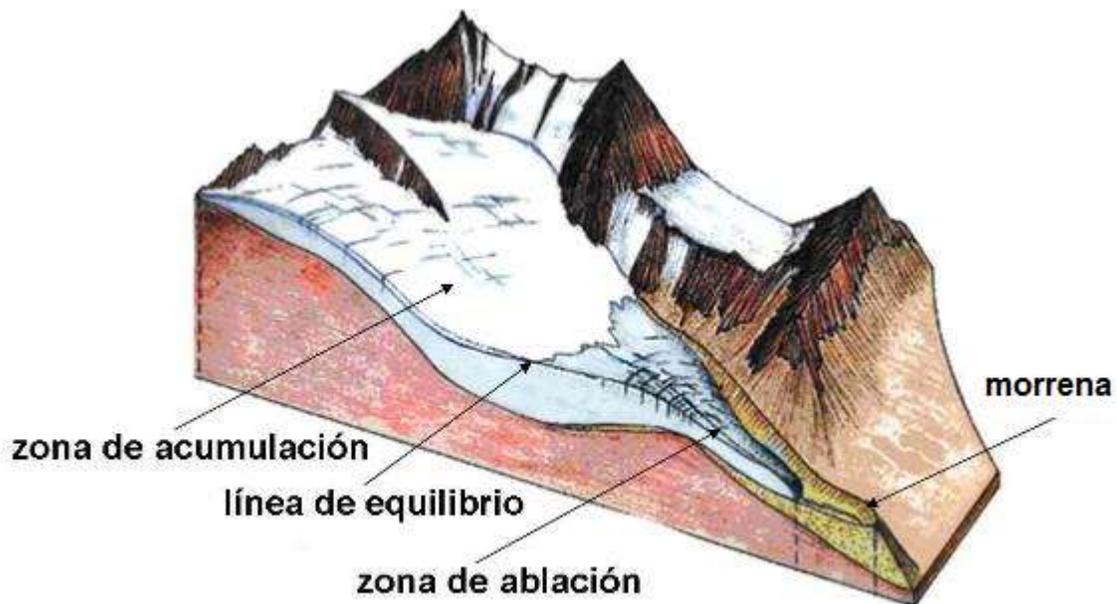


Figura 1. Esquema general de un glaciar de montaña. Fuente: IDEAM (2012).

Con base a su morfología, existen dos tipos básicos de glaciares (IDEAM, 2012):

1. Glaciares de Valle

- De circo: Masas de hielo pequeñas, limitadas por paredes rocosas asentadas en depresiones de forma globular o circular.

- Alpinos: Masas de hielo de hasta 100 km² compuestos por uno o más circos.
- Emisarios o de salida: Similares a los glaciares alpinos, se desprenden de un casquete glaciar.
- De piedemonte: Acumulaciones de hielo que se depositan al final de una vertiente y que en ocasiones invaden las zonas planas adyacentes al sistema montañoso del cual descienden.

2. Casquetes Glaciares: enormes masas de hielo independientes del control topográfico, ubicadas sobre una plataforma continental en zonas polares y subpolares. Están condicionados por el frío extremo y la sequía.

A nivel mundial, en la actualidad los glaciares están condenados a su extinción (Delgado Granados, 2007); este evento se refleja con mayor notoriedad en los glaciares de montaña y de manera particular los que se encuentran en las regiones tropicales (Kaser y Osmaston, 2002). Según estos autores, los glaciares tropicales representan un perfecto indicador térmico (particularmente los ubicados a altitudes superiores a los 4,000 msnm, donde existen escasos instrumentos de medición) y de los cambios climáticos que se suscitan en la actualidad; cabe mencionar que no se trata de un hecho limitado a las regiones tropicales, es una tendencia que afecta a todos los glaciares de montaña del mundo en magnitudes diferentes (IPCC, 2001; Francou y Vincent, 2007, citado en Secretaría General de la Comunidad Andina, 2007).

La llamada Revolución Industrial iniciada a finales del siglo XVIII no solo implementó la producción en serie de productos que la sociedad consumía, beneficiándola al reducir los costos de producción; sino que mejoró y aceleró la economía del mundo. Desde esa época hasta hoy en día, los procesos industriales son llevados a cabo por medio de la combustión de productos fósiles que liberan gases a la atmósfera que modifican su composición; se cree que a 100 años de iniciada la Revolución Industrial entre 1890 y 1990 el aumento del bióxido de carbono se incrementó en un 30% (Conde, 2006); la pérdida de bosques en todo el planeta ha presentado una constante y al parecer irreversible tendencia ascendente desde hace 200 años, acarreado una menor captura de ese carbono mientras se desarrollaba la era industrial en el mundo (figura 2).

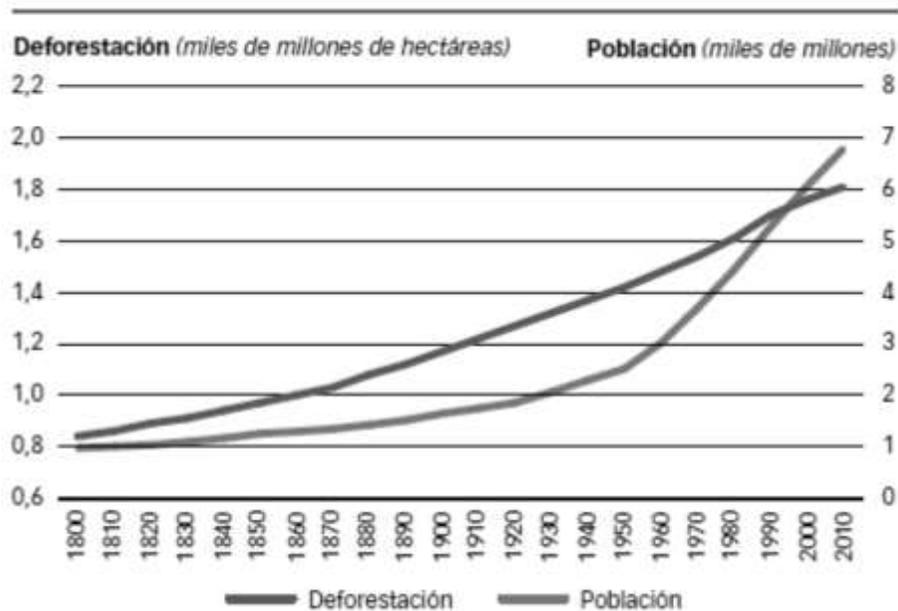


Figura 2. Población mundial y deforestación acumulada. Fuente: Conde (2006).

Si se conserva la tendencia aumentativa en la concentración de bióxido de carbono y demás gases de invernadero la temperatura del planeta responderá aún más de manera proporcional, trayendo con esto consecuencias ambientales severas para la población (Magaña, 2004).

Tales eventos se han empezado a percibir en diversas latitudes del planeta, particularmente en las últimas decenas de años es más que notable la acelerada y constante pérdida de los cuerpos de hielo polares y los glaciares tropicales.

En la actualidad, a nivel mundial se han realizado diversos trabajos sobre la evolución espacio temporal del área y volumen de los glaciares de montaña y su relación al calentamiento global que el planeta experimenta desde las últimas décadas; entre esos trabajos se puede mencionar a los de Hakan Grudd (1990), “Small glaciers as sensitive indicators of climatic fluctuations”; Georg Kaser and Henry Osmaston (2002), “Tropical Glaciers”, entre otros.

La región andina sudamericana es una de las zonas que poseen mayor cobertura glacial del mundo y el retroceso de los glaciares de los Andes Centrales, al igual que en otras partes está estrechamente vinculado al cambio climático; por lo que es en esa geografía donde se han realizado diversas investigaciones dado el número de glaciares, extensión de los mismos y el número de países involucrados. Entre esas investigaciones está la elaborada por la Secretaría General de la Comunidad Andina peruana, cuyo trabajo “Glaciares y cambio

climático en la comunidad andina” del año 2007, expresa la disminución de la cobertura glacial en ese país como consecuencia del incremento de la temperatura y otros factores asociados al cambio climático mundial; la figura 3 muestra un reporte del incremento promedio de la temperatura superficial registrado en los glaciares tropicales peruanos:

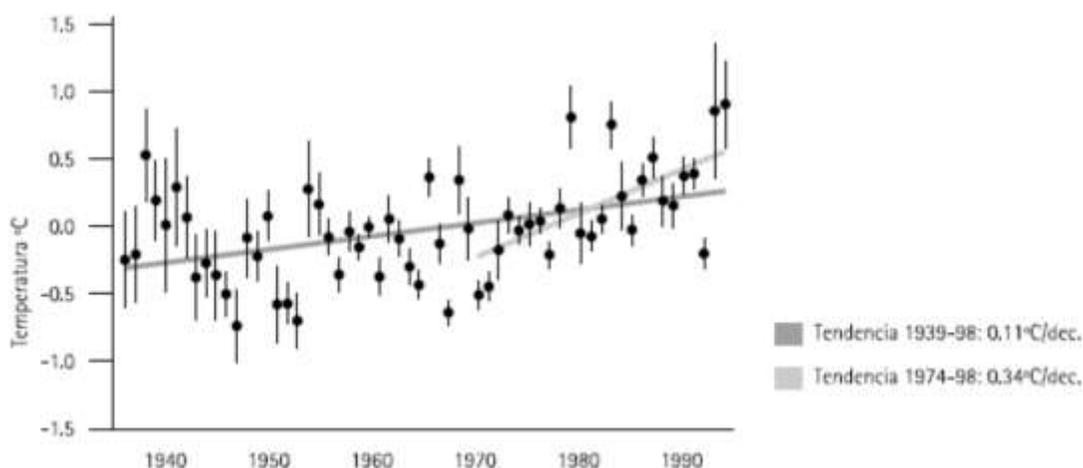


Figura 3. Incremento media de la temperatura glacial tropical, Perú. Fuente: Comunidad Andina (2007).

Un caso particular tratado en la región andina se refiere al glaciar Chacaltaya en Bolivia que era conocido como la pista de esquí más alta del mundo con 5,395 msnm. El área de hielo en el año de 1940 cubría una superficie de 0.223 km², en 1963 abarcaba 0.195 km² y para 1983 era de 0.141 km². A partir de entonces su retroceso había sido más marcado aún: para 1998 solamente abarcaba un área de 0.060 km², ese mismo año se estimó su espesor en 15 metros. Al año 2000 cubría 0.052 km², en el 2003 poseía 0.04 km²; para el año 2005 alcanzaba solamente 0.01 km² y para el año 2007 se encontraba fragmentado en tres porciones con un volumen total de 30,000 m³ de hielo (figura 4).

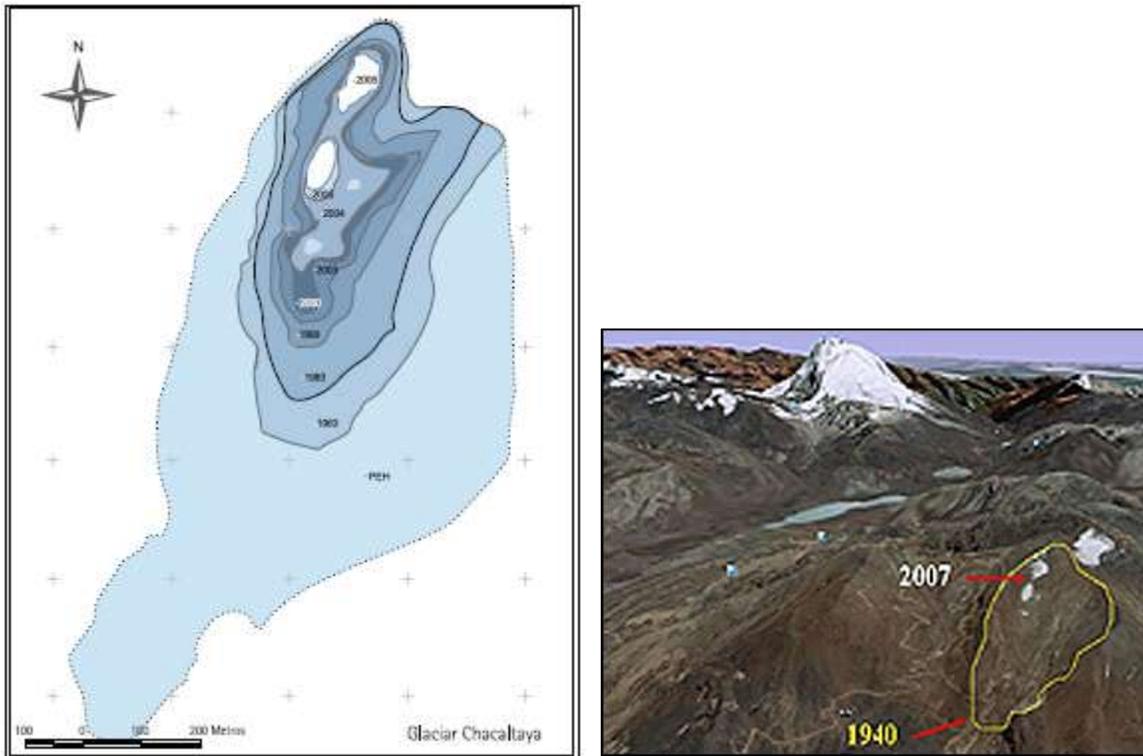


Figura 4. Gráfico del retroceso gradual y vista panorámica del glaciar Chacaltaya, Bolivia. Fuente: Comunidad Andina (2007).

En la actualidad, a partir del año 2009 el glaciar Chalcataya ha sido declarado extinto (Union of Concerned Scientist, 2011); por lo que en hoy en día la cumbre que albergó al glaciar recibe precipitación en forma de nieve durante el invierno para posteriormente derretirse con el aumento de la temperatura estacional que le precede.

Existen también trabajos en Perú que mencionan la importancia hídrica que poseen sus glaciares para la población, ya que en este país, el 70% de sus pobladores son abastecidos por los escurrimientos generados en los altos Andes, por lo que es ahí donde tienen consciencia de la amenaza que representa para la

población la futura extinción de sus reservas hídricas de alta montaña (Larraín, 2007).

En México, en los últimos años ha despertado el interés por el retroceso de sus glaciares; existen trabajos que señalan su degradación, entre estos se encuentra a Delgado Granados *et al.* (1986), “Los glaciares del Popocatepetl y el Iztaccíhuatl”; Delgado y Brugman (1996), “Monitoreo de los glaciares del Popocatepetl”; Delgado Granados H. (1997), “The glaciers of Popocatepetl volcano: Changes and causes”. El Dr. Delgado Granados y colaboradores (1986 y 2005) han realizado diversos estudios sobre los balances de masa glaciar en los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, tales trabajos actualizan el inventario desarrollado a finales de los años 50's por José Lorenzo para los glaciares existentes y su respectiva área de cobertura en el país (*Los glaciares de México, 2ª edición*, 1964). En la Primera Conferencia Internacional de Cambio Climático del 2007 se mencionó la actualización al inventario de los glaciares del Popocatepetl realizada por Delgado en 1992; en ella se encontraron dos glaciares que cubrían una superficie de 0.559 km², así como cuatro zonas de permafrost, cubriendo un área de 0.239 km². En ese trabajo se encontró que 20 años posteriores al inventario de Lorenzo (1964) las zonas glaciales del Popocatepetl habían disminuido en un 22%. En el Iztaccíhuatl se encontró que tres de los glaciares reportados originalmente por Lorenzo se habían extinguido y con esto una pérdida glacial del 20% en 24 años.

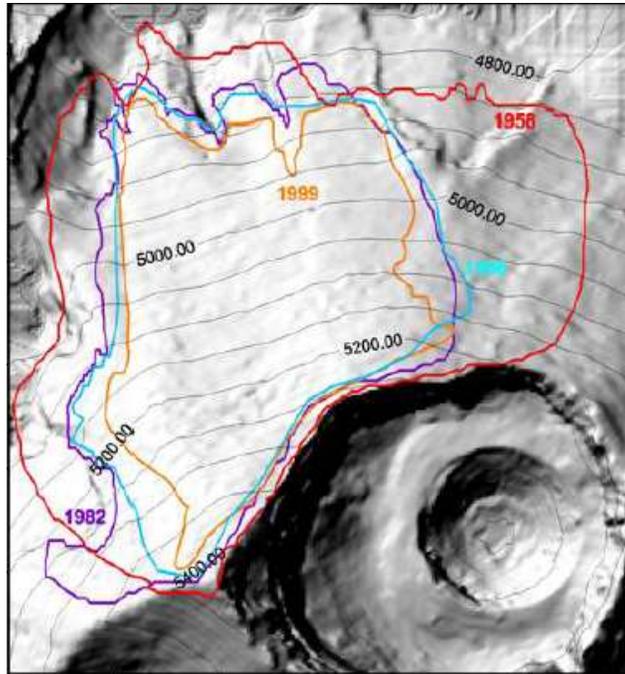


Figura 5. Superficies comparables en el tiempo del glaciar el Ventorrillo del Volcán Popocatepetl. México. Fuente: Delgado Granados (2007).

En el año 1998, Delgado estudió el principal glaciar de la “Mujer dormida” como se le conoce comúnmente al Iztaccíhuatl; el Ayoloco, que para ese año se cuantificó en 140,890 m² de superficie contra los 218,340 m² reportados en 1982, pero muy distante de los 247,500m² que primeramente había reportado Lorenzo en 1964. El glaciar Ayoloco había disminuido un 43% después de 30 años.

En cuanto al Citlaltépetl, destaca la tesis de Cortés del año 2009 titulada “Evolución espacio-temporal de la superficie del glaciar norte del Volcán Citlaltépetl utilizando sensores remotos”, donde se desarrolla un análisis cuantitativo del comportamiento del glaciar a través de los últimos años. En este trabajo se comparó cartográficamente a través de imágenes ASTER la superficie glaciar durante los años 2001 al 2007 y se menciona que el glaciar Norte había

perdido el equivalente al 72% de su área en comparación con la que José Lorenzo (1964) reportó en 1958. Según el documento, en tan sólo un año, del 2001 al 2002 hubo un retroceso del 9.5% en su extensión.

Otro tipo de investigación que va más allá de estudiar la relación clima-volumen glaciar, es la de analizar las implicaciones que el retroceso de los glaciares de montaña poseen en relación a los recursos hídricos; dicho de otro modo, se trata de trabajos que analizan las consecuencias del derretimiento glacial y su estrecha vinculación con el flujo hídrico hacia la cuenca que alimenta. Un trabajo de este tipo es el elaborado por Pierre Ribstein y colaboradores en “Variabilidad Climática y Modelización Hidrológica del Glaciar Zongo, Bolivia”, (1995); si bien este trabajo considera que la actual variación de los componentes del clima en el mundo repercute en el derretimiento acelerado de los cuerpos glaciares, también analiza la consecuente variabilidad en el caudal saliente del mismo. En la gráfica siguiente (figura 6) se presenta dicha tendencia.

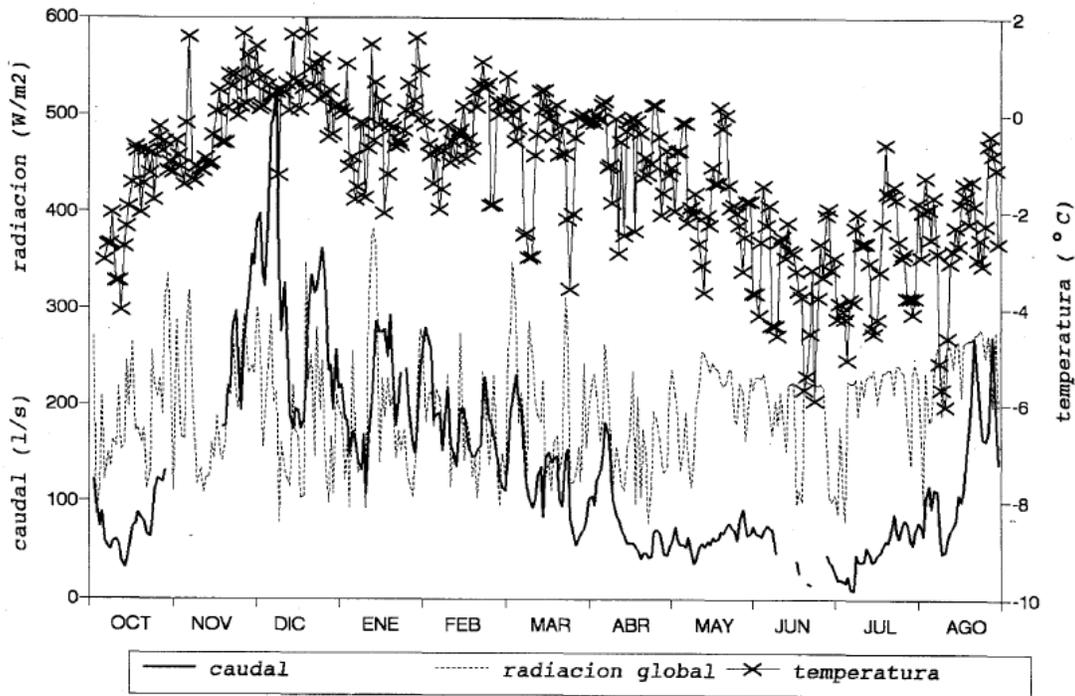


Figura 6. Relación de temperatura, radiación incidente y flujo hídrico proveniente del glaciar Zongo, Bolivia entre octubre de 1993 y septiembre de 1994. Fuente: Ribstein *et al.*, (1995).

Brenda Guerra por su parte, en su tesis “Estudio cuantitativo del sector oriental del volcán Iztaccíhuatl, Puebla para determinar la recarga al acuífero proveniente de la masa glaciar” (2006) elaboró un estudio para determinar disponibilidad de agua proveniente del glaciar y a su vez analiza la demanda del recurso en las cercanías a la “Mujer dormida” como se le conoce comúnmente. Guerra menciona que durante la temporada de estiaje, las elevadas temperaturas, aunado al exceso en la explotación del acuífero del sector oriental del volcán han ocasionado la casi por completa desaparición del río Atoyac junto con la disminución de manantiales y pozos coadyuvando en la problemática ambiental por la carencia de agua en ese

sector. Además, encontró que la aportación hídrica del glaciar al acuífero entre el período de 1990 y 2002 correspondía a 7.04 Mm³.

Los trabajos anteriores, para el caso de México, brindan una idea sobre la evolución que sus glaciares han sufrido durante las últimas décadas; sin embargo, particularmente para el volcán Citlaltépetl, punto más alto de México y poseedor del mayor glaciar en el país, no se han realizado estudios que brinden una idea de las posibles consecuencias que en materia de hidrología, una reducción o la desaparición de su glaciar traería para algunos de los asentamientos localizados dentro de la cuenca del río Jamapa-Cotaxtla; por lo que destaca aquí la importancia de estimar el aporte hídrico que las localidades hídricamente abastecidas por éste dejarían de percibir una vez extinguido.

1. Objetivos

1.1. General

1.1.1. Determinar las repercusiones que tendría la desaparición del Glaciar Norte del volcán Citlaltépetl sobre la disponibilidad de agua para las localidades de la parte alta de la cuenca Jamapa-Cotaxtla a las que hídricamente abastece.

1.2. Particulares

1.2.1. Analizar la evolución en el tiempo de la temperatura del aire en la superficie del glaciar que ha condicionado su retroceso y calcular su oferta hídrica potencial.

1.2.2. Caracterizar el proceso de los escurrimientos hídricos del glaciar hasta su aprovechamiento por las comunidades.

1.2.3. Identificar los asentamientos hídrico-dependientes del glaciar.

1.2.4. Caracterizar el entorno socioeconómico comunitario de las comunidades involucradas y analizar las políticas gubernamentales ante la relación oferta-demanda hídrica que se prevé.

2. Área de estudio

El Citlaltépetl o Pico de Orizaba es un cono volcánico cinerítico de forma regular, con pendientes pronunciadas que alcanzan una media de 40° (Ramos-Aguilar, 2005); es de tipo estromboliano cuya edad data de la época Cuaternaria, se originó por encima de rocas calizas y lutitas de la era Cretácica (Macías, 2005). El volcán fue creado a partir de un edificio volcánico previo de hace 33,000 años, los restos del antiguo volcán se localizan al noreste del cráter conocidos como el Pico del Sarcófago (5,080 m), el nuevo cono del Citlaltépetl se formó adyacente al anterior hace unos 19,000 años.

Posee un cráter de forma elíptica, su eje mayor mide 478 m, y el menor mide 410 m aproximadamente; su superficie es de 154 830 m² y sus paredes internas alcanzan 300 m de profundidad. Se encuentra ubicado entre el eje Neo volcánico que posee otras de las mayores alturas de México como el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl, y la Sierra Madre Oriental que recorre al país de norte a sur. El cono volcánico divide los estados de Puebla y Veracruz con las coordenadas 19° 01' 40" y 97° 16' 08" Este.

El Citlaltépetl o *Cerro de la Estrella* (por su significado en náhuatl: *Citlalli* “estrella” y *tepetl* “monte o montaña”) representa la mayor altitud geográfica del país con sus 5,610 msnm (INEGI) y ocupa el tercer lugar entre los montes más altos de

Norteamérica, superado por el Monte McKinley (6,145 msnm) en Alaska, Estados Unidos y el Monte Logan (5,958 msnm) en el Territorio del Yukón Canadá. Posee en la actualidad dos glaciares; en el año de 1958 José Lorenzo los estimó en: el Oriental con 0.42 km² y el conocido como glaciar Norte que ocupaba una superficie de poco más de 9 km² (Lorenzo, 1964); éste último representa el nacimiento de diversas corrientes hídricas como el río Jamapa en Veracruz, el cual desemboca en el Golfo de México, en el Municipio de Boca del río.

La edad de sus glaciares data de finales del Pleistoceno y principios del Holoceno, hace unos 12,000 años cuando culminó la última glaciación y entró la etapa interglaciar que ha continuado hasta nuestros días (Vázquez-Selem y Heine, 2011). La formación del Glaciar Norte, se cree, se formó al finalizar un largo periodo eruptivo que culminó en 1687 (de Marcos y Palacios, 1996). Su preservación hasta la era actual se debe, en esencia, a la temperatura bajo cero que prevalece a la altitud en que se encuentra.

El clima de la región adyacente al cono volcánico está dado por la altitud del relieve. Entre 2,200 y 3,200 metros de altitud se haya el templado húmedo con precipitación todo el año (Cb), en invierno son frecuentes las heladas y ocasionalmente se presentan nevadas. Sobre los 3,200 y 4,300 metros predomina el clima semi frío con frecuencia de temperaturas invernales por debajo de los cero grados (Cc); parte de la precipitación que se presenta se da en forma

de nieve. Por arriba de los 4,300 metros se localiza el clima polar de montaña con temperatura media anual de -2°C (EF); la precipitación que se presenta es en forma de nieve (García, 1988).

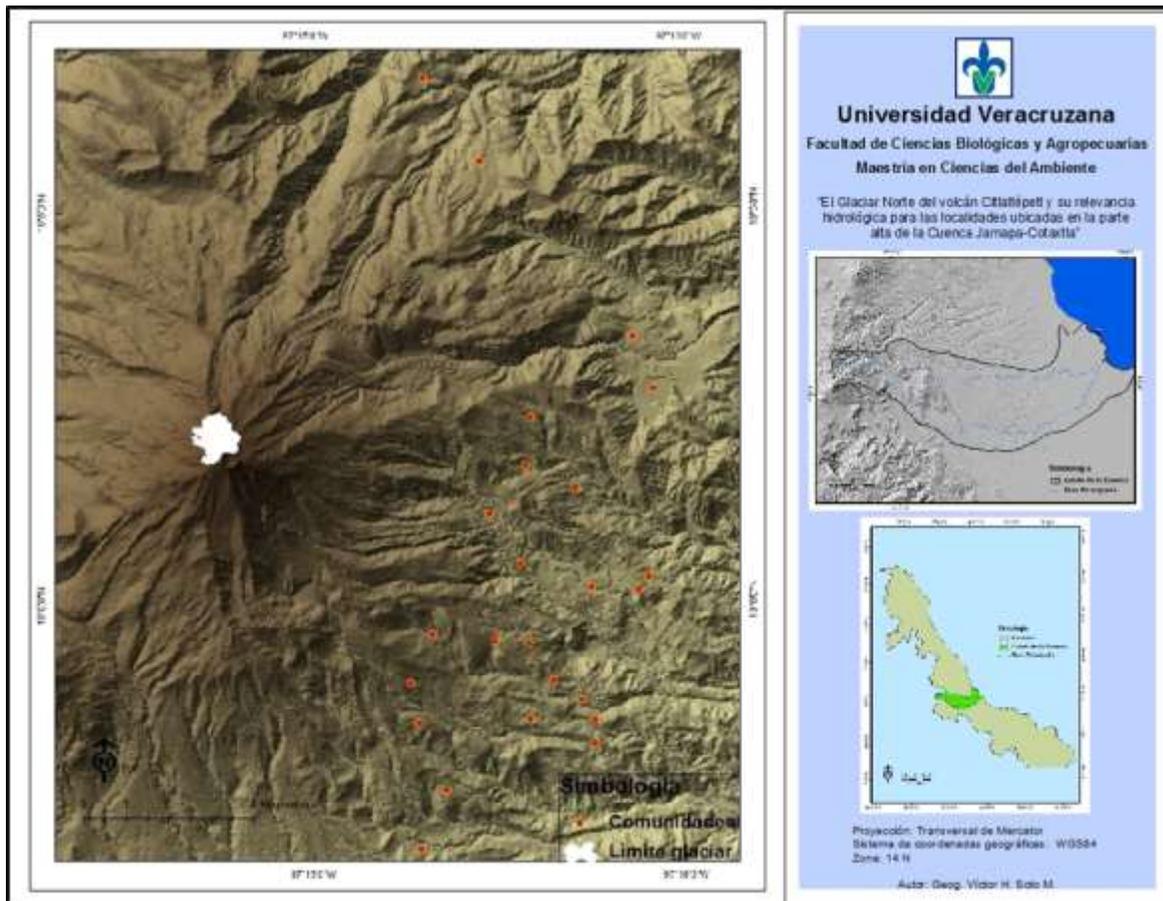


Figura 7. Mapa del área de estudio. Elaboración propia.

El gradiente altitudinal es muy acusado. Un perfil orográfico trazado del punto $\lambda 97.2663$ W, $\phi 19.0300$ hacia el punto $\lambda 97.1529$ W, $\phi 19.0290$ con dirección 90° señala que a partir del punto de inicio en el cráter del volcán a 5,610 m de altitud desciende de forma continua y uniforme hasta la cota 3,200 m a 4.7 kilómetros de distancia del cráter; resultando con esto una pendiente de 27° o del 51%.

Posteriormente el descenso se torna más irregular debido a lo accidentado del relieve, para finalmente disminuir 2,100 m en 6.3 km de distancia, con una pendiente de 18° o del 33%.

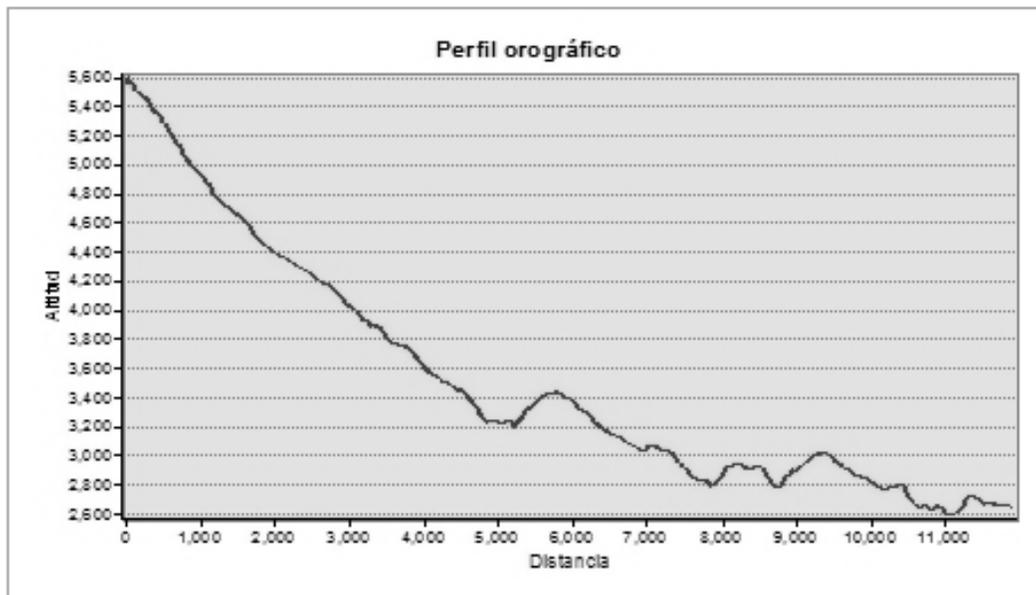


Figura 8. Perfil con dirección 90° a partir del cráter del volcán. Elaboración propia.

En las faldas del cono volcánico se localizan diversos asentamientos humanos que dadas sus condiciones de altitud, accidentado del relieve y como consecuencia, difícil acceso, se mantienen con relativo aislamiento respecto a las poblaciones ubicadas a una cota altitudinal inferior.

Esta región está comprendida dentro La cuenca Jamapa-Cotaxtla que se ubica íntegramente en el estado de Veracruz y que posee una superficie de 3,912 km² (Pereyra y Pérez, 2006). Dentro de ella se encuentran las ciudades conurbadas

de Orizaba-Córdoba-Fortín y Veracruz-Boca del Río, además de diversas comunidades así como importantes zonas agrícolas e industriales (Santamaría, 2011).

La cuenca está conformada por las corrientes conocidas como los ríos Cotaxtla y Jamapa. El río Cotaxtla drena una superficie equivalente a 1,679 km² y nace con el nombre de río Barranca de Chocomán; en su recorrido cuenca abajo y la altura de Córdoba recibe el nombre de río Seco. Avanza a través de 22 km de superficie de cultivo y posterior al Cerro Chiyoltuite se le une el río Atoyac que se origina en el Cerro Loma Grande a 10 km dirección norte de Córdoba, en él se ubica la presa derivadora Santa Anita que alimenta el sistema de riego El Potrero. Posteriormente, durante su recorrido por la baja cuenca se le une el arroyo Cuatro Caminos cambia su nombre a río Cotaxtla y se introduce en zonas de cultivo; en su avance, tras pasar la comunidad de Cotaxtla en su margen izquierdo se le une el río Jamapa.

La corriente del Jamapa nace a 4,700 msnm bajo el nombre de Barranca de Coscomatepec; durante su avance en terrenos montañosos va recibiendo corrientes menores, y aproximadamente a 50 km de su nacimiento se le une el río Paso de los Gasparines que nace a 1,500 msnm cerca de Huatusco; a partir de ahí se le conoce con ese nombre. Más abajo en la cuenca, ya en terrenos semi planos forma diversos meandros y cambiando su nombre por el río Jamapa

recibiendo en su flanco izquierdo al río Xicuintla. Continúa su curso cruzando terrenos cultivables y recibiendo por su margen derecho al arroyo Ixcualco que nace cerca de la población de Paso del Macho. Posteriormente, esta corriente continúa su recorrido pasando por Medellín de Bravo para unirse 5 km más abajo con el río Cotaxtla. A partir de ahí conserva el nombre de río Jamapa recorriendo nuevamente zonas de cultivo y recibiendo a su izquierda al río Moreno y a su derecha la Laguna de Mandinga Grande para que finalmente desemboque en el Golfo de México a un costado de la ciudad de Boca del Río.

3. Material y métodos

Para calcular y medir los efectos que ocasionará la desaparición del Glaciar Norte como afluente hídrico a los asentamientos poblacionales de la parte alta de la cuenca, particularmente para los habitantes asentados en las faldas del volcán, se requirió llevar a cabo estudios geológicos y climáticos. Para ello ha sido necesario el empleo de Software especializado en modelación y Sistemas de Información Geográfica, así como bases de datos históricas del comportamiento meteorológico en el área de estudio, material cartográfico y satelital. Se realizó trabajo de campo para identificar los procesos de captación y distribución de agua dentro de los poblados, también para consultar a los responsables de las áreas de obras públicas y agua potable de cada ayuntamiento involucrado a fin de constatar su información con los resultados obtenidos en los procesos de identificación de comunidades y las condiciones del servicio. A continuación se presenta una descripción general de las características de las herramientas empleadas, así como posteriormente los métodos empleados en la investigación.

Para cumplir cada uno de los objetivos planteados, el trabajo se desarrolló conforme a la siguiente metodología:

La variación promedio de la temperatura del aire en la tropósfera de latitudes medias es del orden de $-0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$; sin embargo, cuando se trabaja en estudios regionales que demandan cierto grado de precisión es necesario que el gradiente

vertical de temperatura troposférica (GVTT) del sitio sea calculado (Ramos Aguilar *et al.*, 2008).

A fin de que el GVTT de la zona se calculara con la mayor certeza posible, se consideró emplear la información de diversas estaciones, por lo que el GVTT fue estimado mediante el método clásico de los gradientes medianos de De Fina y Sabella (Burgos, 1965; Villalobos, 1997). El valor mediano de una serie de datos posee la ventaja de que no resulta afectado por valores extremos (Brooks y Carruthers, 1953; McClave y Dietrich, 1982, citados por Villalobos, 1997) muy comunes en los catálogos de datos de información climática. Para el desarrollo de método se requirieron 5 estaciones lo más cercano posible a la zona de estudio, con una diferencia altitudinal significativa entre sí y con mayor lapso temporal de información. Las combinaciones que se pueden realizar entre pares dentro del grupo de 5 estaciones son 10, lo que se tradujo en igual número de gradientes. Para obtener cada uno de los gradientes se dividió la diferencia de temperatura entre la diferencia altitudinal para cada una de las combinaciones entre dos estaciones; los 10 gradientes obtenidos se ordenaron de mayor a menor y el promedio de los dos valores centrales (gradientes quinto y sexto) representó el gradiente mediano del conjunto que a la vez se considera es el GVTT más probable de la zona.

Se seleccionaron las 5 estaciones climáticas de CLICOM (Clima Computable) del Servicio Meteorológico Nacional con mayor cobertura temporal de registros y lo

más cercano posible al volcán (figura 9). Para todos los casos se calculó el valor de temperatura media diaria, mensual y posteriormente se obtuvo la media anual para cada uno de los años de información para la variable térmica. Las estaciones trabajadas fueron:

1. Chilchotla (21025), localizada en $\phi 19.2550, \lambda -97.1828$; con 18 años de registro analizados.
2. Chilapa (30042), localizada en $\phi 18.9833, \lambda -97.1500$; con 29 años de registro analizados.
3. Huatusco (30066), localizada en $\phi 19.1500, \lambda -96.9597$; con 93 años de registro analizados.
4. Ixhuatlán (30072), localizada en $\phi 19.0500, \lambda -96.9861$; con 29 años de registro analizados.
5. Coscomatepec (30032), localizada en $\phi 19.0717, \lambda -97.0461$; con 55 años de registro analizados.

El tabulado del cuadro 1 señala la altitud y temperatura media anual para cada una de las estaciones:

Cuadro 1. Grupo de estaciones para el cálculo del GVTT.

Estación	Clave	Altitud msnm	Temp Media Anual	Años de Datos
Chilchotla	21025	2220	14.6	18
Chilapa	30042	2225	15.4	29
Huatusco	30066	1284	19.6	93
Ixhuatlán	30072	1350	20.2	29
Coscomatepec	30032	1530	18.4	55

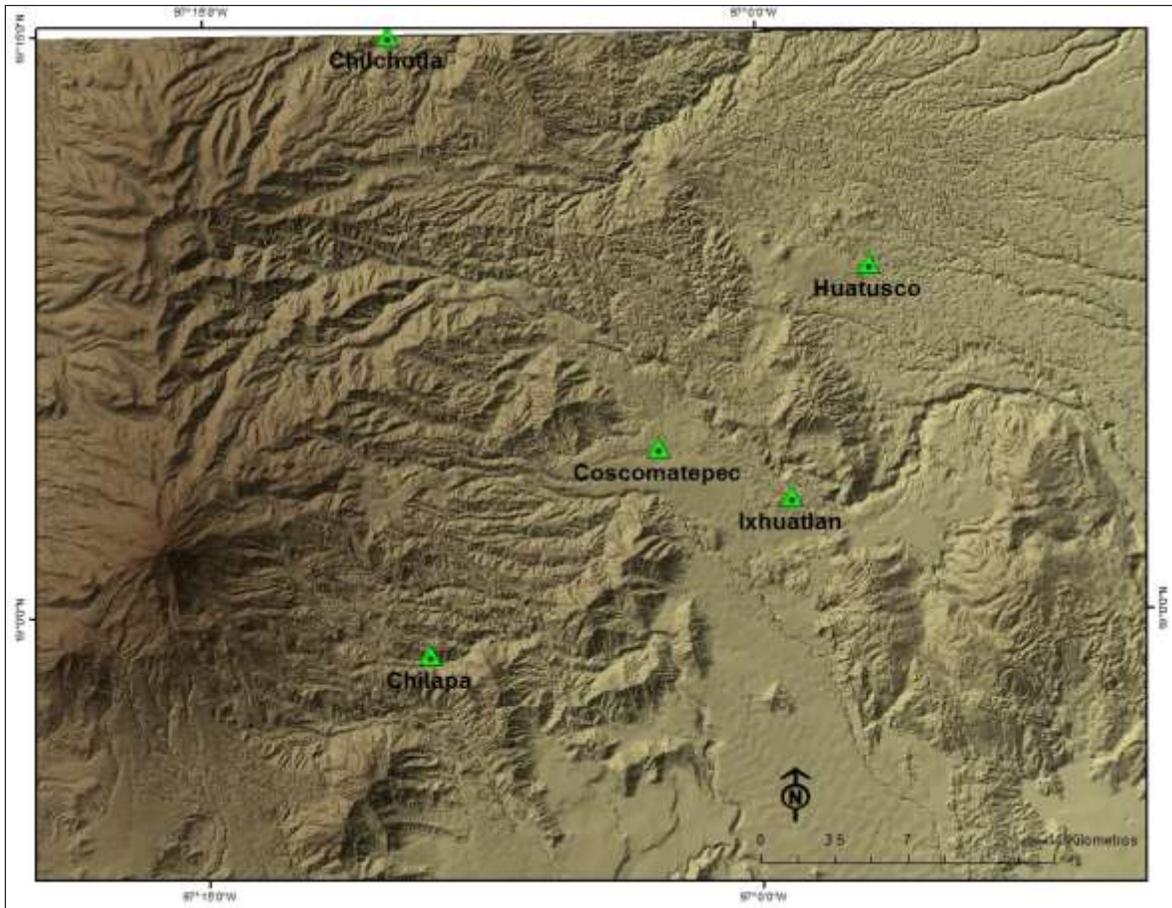


Figura 9. Mapa de estaciones para calcular el GVTT. Elaboración propia.

Por lo que con base a los registros térmicos de las estaciones seleccionadas, el cuadro de datos y el consecuente cálculo del GVTT quedaron de la siguiente forma (cuadro 2):

Cuadro 2. Tabulación de datos y cálculo de gradientes.

Pares	Altitud		Diferencia Altitud	Temperatura		Diferencia Temperatura	Gradiente	Orden Gradiente
	A	B		A	B			
Chilchotla-Chilapa	2220	2225	5	14.6	15.4	-0.8	0.16	10
Chilchotla-Ixhuatlán	2220	1350	870	14.6	20.2	-5.6	-0.00643678	2

Chilchotla-Huatusco	2220	1284	936	14.6	19.6	-5	-0.00534188	5
Chilchotla-Coscomatepec	2220	1530	690	14.6	18.4	-3.8	-0.00550725	3
Chilapa-Ixhuatlán	2225	1350	875	15.4	20.2	-4.8	-0.00548571	4
Chilapa-Huatusco	2225	1284	941	15.4	19.6	-4.2	-0.00446334	7
Chilapa-Coscomatepec	2225	1530	695	15.4	18.4	-3	-0.00431655	8
Ixhuatlán-Huatusco	1350	1284	66	20.2	19.6	0.6	0.009090909	9
Ixhuatlán-Coscomatepec	1350	1530	180	20.2	18.4	1.8	-0.01	1
Huatusco-Coscomatepec	1284	1530	246	19.6	18.4	1.2	-0.00487805	6

Por lo tanto:
$$\frac{(-0.005344188)+(-0.00487805)}{2} = -0.00511 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$$

A fin de calcular, para este caso la temperatura media del aire en la superficie del glaciar del Citlaltépetl, hubo que extrapolar los registros de una estación fuente hacia su cumbre con el empleo del GVTT. Si se considera de acuerdo a Ramos *et al* (2008) y Palacios y Vazquez-Selem (1996) que la parte central del glaciar se ubica en la isohipsa 5,340 m, es a esa altitud donde se estimaron las fluctuaciones térmicas que repercuten de manera directa sobre la masa de hielo; con esto se pudo analizar la evolución en el tiempo de la temperatura, así como también el cambio altitudinal de la isoterma 0°C a través de los años. Para este propósito se ha seleccionado como estación fuente Huatusco de Chicuellar, localizada a $\phi 19.15^\circ \text{ N}$, $\lambda 96.9597^\circ \text{ O}$, y a 1,284 msnm; a partir de ésta se realizaron las estimaciones térmicas debido a que posee dos características elementales: a) cuenta con registros de temperatura que abarcan 93 años de datos (1907-2000) y b) su ubicación, a barlovento del volcán, le permite registrar valores de humedad y

temperatura en el aire de las corrientes procedentes del Golfo que posteriormente son forzadas a ascender por las laderas del cono volcánico. Al valor de la temperatura media de la estación, para cada uno de los años le fue aplicado el GVTT a la diferencia altitudinal de 4,056 m entre la estación y la parte central del glaciar, con lo que se consiguió estimar la temperatura del aire en contacto con su parte media. Los resultados corregidos a la cota 5,340 m fueron tabulados en un cuadro para su posterior aplicación.

Partiendo de que el análisis en la tendencia de la temperatura es estudiado a través del modelo lineal, que por sencillo y práctico es el más usado en este tipo de estudios (Hobai, 2009), éste se empleó para analizar el comportamiento térmico durante los años 1907 hasta el 2000.

Por otro lado, una consecuencia en la evolución de la temperatura media del aire a través del tiempo es también el desplazamiento de la isoterma 0°C que representa la altitud límite en la cual la precipitación pasa de lluvia para transformarse en nieve, así como también es el factor que rige la fusión del hielo (Universidad de Chile, 2006; Bustos, 2009).

Para modelar el traslado de la isoterma 0°C a través del tiempo, El valor del GVTT obtenido previamente se empleó una vez más para que a partir de los registros de

la estación Huatusco se creara un modelo térmico de la zona con base al Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) del lugar. Para esto, y conforme al método empleado por Fries *et al.*, (2012), la siguiente ecuación se empleó dentro de ArcGis 10 para crear mapas de térmicos por encima del volcán con sus isotermas para los años 1907 y 2000, de las cuales se identificaron y aislaron las de valor 0°C para ambos casos:

$$T_{(x,y)} = T_{Est} + (\Gamma(Z_{(x,y)}^{DEM} - Z_{Est}))$$

Donde:

$T_{(x,y)}$ Representa el valor de la temperatura en un punto (x, y),

T_{Est} Es la temperatura media de la estación para cada año de estudio,

Γ Es el GVTT de la zona,

$Z_{(x,y)}^{DEM}$ Es el valor en altitud de un punto (x, y) en un Modelo Digital de Elevación, y

Z_{Est} Equivale a la altitud de la estación climatológica.

Para calcular la oferta hídrica potencial del glaciar, se debió estimar el volumen de agua contenida en el cuerpo de hielo y que una vez fusionado escurre por gravedad hacia la cuenca. Este cálculo se obtuvo a partir de la fórmula matemática básica de volumen:

$$V = (A)(-h)$$

Donde:

V Representa el volumen del glaciar,

A Es el área del glaciar, y

$-h$ Es la profundidad o espesor del glaciar.

El valor del perímetro y área del glaciar se calculó en ArcGis 10 por medio de una ortofoto a partir de la cual se vectorizó el polígono ocupado por el cuerpo de hielo. Dada la carencia de información sobre la profundidad del cuerpo de hielo, para determinarla se consideraron los 16 puntos muestra que S.C. Brown *et al* (2005) obtuvieron de la parte media e inferior a través de radar GPR (Ground Penetrating Radar) *in situ*; estos datos se complementaron para el resto del cuerpo con el valor sugerido por Sydney E. White (2002), que de acuerdo a la propuesta obtenida mediante una consulta directa al Dr. Lorenzo Vázquez Selem en enero del 2013, quien sugirió dada su experiencia en el ámbito histórico glaciar, que a fin de calcular los valores totales de la profundidad, ambas estimaciones debieran ser combinadas. Para modelar la masa tridimensional del cuerpo de hielo fueron interpolados los valores anteriores por el método de Triangulated Irregular Network (TIN), el más apropiado para representar el relieve del terreno y más usado para este fin (Fallas, 2007). Una vez determinada la malla tridimensional, ésta se delimitó al contorno perimetral del polígono del glaciar a fin de obtener la cuenca del mismo y poder estimar su volumen en metros cúbicos.

Al volumen de hielo glaciar calculado se procedió convertirlo a su equivalente de agua líquida por el razonamiento de físico de Serway (1997):

1 m³ hielo = 917 kg

1 m³ agua = 1000 kg

Por lo tanto, 1 m³ hielo = 0.917 m³ de agua líquida.

Para comprender y caracterizar el proceso llevado a cabo desde la captura de agua hasta su traslado a las viviendas a partir de los flujos del deshielo, ha sido necesario conocer la geología y edafología físicas del cono volcánico. Para ambos tópicos se ha utilizado cartografía vectorial a escala 1:50,000 proporcionada por el INEGI; la información aportada se constató y complementó mediante la consulta de diversas fuentes bibliográficas lo cual dio a conocer las propiedades físicas del suelo, así como su capacidad de infiltración y escurrimiento. La exploración física llevada a cabo desde los límites del glaciar hacia los asentamientos que poseen cisternas para el almacenamiento de agua ha permitido una apropiada caracterización del proceso escurrimiento-aprovechamiento.

Para determinar las localidades veracruzanas que dependen del agua del glaciar para sus necesidades básicas, inicialmente se seleccionaron las pertenecientes a los municipios aledaños al volcán, que en suma arrojó un total de 193 localidades; de ese universo fueron filtradas aquellas que de acuerdo al Censo de Población y Vivienda INEGI 2010 no poseen entre su infraestructura básica una red de agua potable abastecida mediante el bombeo tradicional por el municipio al que pertenecen; posteriormente se seleccionaron las que se encuentran ubicadas a

una altitud superior a 2,500 msnm y dentro de una distancia radial de 15 km del centro del cono volcánico. Con estos criterios fue posible identificar a las comunidades dependientes ciento por ciento del deshielo glaciar para obtener agua potable; esta información ha sido verificada en campo a través de recorridos de prospección realizados a los asentamientos previamente señalados, lo anterior se corroboró con el personal titular de los departamentos de obras públicas y agua y saneamiento de cada cabecera municipal.

Las condiciones sociales y económicas que prevalecen en el entorno juegan un papel importante a la hora de plantear el desarrollo de una región, que a su vez requiere de la participación del sector público, de la academia y de la sociedad civil (PNUD, 2012). Por esta razón, y a fin de plasmar las condiciones que rigen en la zona, se elaboró un análisis socio económico de cada una de las comunidades involucradas que ha permitido esbozar el escenario imperante de la región y su posición ante las políticas gubernamentales actuales en materia de desarrollo comunitario. Para este efecto se analizaron, a nivel municipal y de localidad, los Programas para el Desarrollo de Zonas Prioritarias de SEDESOL al 2013; los Índices de Bienestar Social y Económico del Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI; los Índices de Marginación por Entidad Federativa, Municipio y Localidad 2010 de CONAPO; los Indicadores Demográficos Básicos 1990-2010 de CONAPO; los Índices de Desarrollo Humano 2000 de CONAPO y las Series de Información Temática y Continua de Hogares en México 2010 de CONAPO. Con base a los parámetros señalados por cada instancia, ha sido

posible categorizar el grado de rezago social y económico, así como también de marginación que predomina en la región de estudio.

Con la ayuda de la proyección de la población, consistente en extrapolar a futuro las tendencias pasadas, se busca proporcionar los elementos que muestren las consecuencias que a mediano y largo plazo pueden provocar ciertas tendencias demográficas sobre diversos sectores espaciales, sociales y económicos; entre éstas se pueden apreciar los requerimientos de un ordenamiento adecuado del territorio, así como también reflejan las necesidades en materia educativa, de seguridad, salud y de servicios básicos para la vivienda (Rincón y Fajardo, 2007).

Respecto al número de habitantes para las localidades hídricamente dependientes del glaciar, se analizó la tendencia de crecimiento poblacional con base a los datos de los censos del INEGI para los años 1990, 2000 y 2010; se proyectó la población global a 10, 20 y 30 años por medio del modelo matemático exponencial (Rincón y Fajardo, 2007), apropiado para ese caso debido a que su principal condición es contar con al menos tres censos. Para calcular la tasa de crecimiento de los tres censos, ésta se promedió del valor correspondiente para 1990 y 2000, así como para 2000 y 2010. La ecuación del modelo propuesto es:

$$N^{t+n} = N^t e^{(r)(n)}$$

Donde:

N^{t+n} Es la población de diseño (hab) en el momento $t + n$

N^t Es la población actual o población base (hab)

e Es la base del logaritmo natural,

r Es la constante o tasa de crecimiento, y

n Es el periodo de diseño o número de años a proyectar.

El modelo de proyección se pretendió aplicarlo de inicio para la población de cada una de las comunidades en forma individual; sin embargo, al tabular los datos censales de población y número de viviendas, se identificaron asentamientos que entre un censo y otro se dividieron dando origen a otro nuevo, esta situación provocó que las tendencias individuales de proyección arrojaran datos irreales de crecimiento. Dadas las circunstancias anteriores hubo que realizar el modelo para la suma de todas las localidades, que independientemente de su división administrativa o no, reflejaba la población habitante de todas y cada una de ellas, obteniendo de este modo un modelo global de crecimiento poblacional.

Esta proyección poblacional sirvió para considerar el número de habitantes que para ese período deberán contar con otras alternativas para el abastecimiento de agua potable y satisfacer una de sus necesidades más básicas. Los resultados se obtuvieron a través de Excel, tabular y gráficamente.

Una vez comprendidos cada uno de los factores que al final se traducen en la relación oferta-demanda hídrica actual y a futuro de la parte alta de la cuenca, de la posición socioeconómica y de su proyección poblacional, se procedió a

investigar la existencia de programas gubernamentales que consideren medidas de adaptación ante esta particular situación. Para ello se revisaron los documentos elaborados por cada instancia involucrada en el tema de cambio climático, de recursos hídricos, así como los Planes de desarrollo para cada nivel de gobierno.

Cabe mencionar que la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en sus artículos 25 y 26 establece la planeación del desarrollo nacional donde se planteen las políticas públicas que lleve a cabo el Gobierno de la República a fin de lograr ese objetivo. Para saber si los gobiernos federal, estatal y municipales tienen conocimiento de la futura problemática que la región afrontará en cuanto al abasto de agua, pero sobre todo, si han considerado dentro de su planificación administrativa algún proyecto que contemple subsanar o mitigar esta situación, se ha realizado una revisión exhaustiva a cada uno de los Planes de Desarrollo y Programas de gestión elaborados por los tres niveles de gobierno, así como también de las instituciones responsables en materia de agua. El análisis se llevó a cabo en orden jerárquico de administración, tanto para los gobiernos como para las instituciones.

Los documentos que fueron estudiados son:

- a) El Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.
- b) La Estrategia Nacional de Cambio Climático.
- c) El Programa de Zonas de Atención Prioritarias 2013 (SEDESOL).

- d) El Programa Nacional Hídrico 2007-2012 (dado que el correspondiente al periodo 2013-2018 se encuentra aún en consulta pública).
- e) La Agenda del Agua 2030 (CONAGUA).
- f) El Plan Veracruzano de Desarrollo 2011-2016.
- g) El Programa Hidráulico Estatal 2005-2010 (Consejo del Sistema Veracruzano del Agua).
- h) El Plan de desarrollo para el municipio de La Perla 2008-2010.
- i) El Plan de desarrollo para el municipio de Calchualco 2005-2007.

Cabe mencionar que para el caso de los documentos datados con periodos de administración anteriores a los actuales, dadas las intensivas búsquedas efectuadas en línea se asume que para los tiempos vigentes son inexistentes.

Finalmente, se ha podido plantear el escenario actual de la región de cara al futuro que se vislumbra.

4. Resultados.

4.1 Evolución en el tiempo de la temperatura del aire en la superficie del glaciar que ha condicionado su retroceso.

El principio de la conservación de la materia que dictó Lavoisier en 1789 señala que *“En cualquier cambio de estado, la masa total se conserva”*. Para el caso de un cuerpo de hielo, el postulado anterior significa que su contenido en agua se mantendría constante aun después de su derretimiento; sin embargo, para que se sucediera el cambio de estado entre sólido y líquido debió ser necesario un aumento en la temperatura que sobre él incide.

Tras la aplicación del GVTT, la temperatura media anual extrapolada hacia la cota 5,340 m (parte central del glaciar) quedó según el Cuadro 3:

Cuadro 3. Temperatura media anual extrapolada a 5,340 msnm.

Año	Temp								
1907	-2.7	1935	-2.79	1954	-2.74	1971	-0.55	1988	-1.49
1908	-2.93	1936	-2.64	1955	-0.84	1972	-0.62	1989	-0.88
1909	-2.9	1938	-2.42	1956	-1.53	1973	-0.63	1990	-0.82
1910	-3.83	1939	-1.48	1957	-0.27	1974	-1.13	1991	-0.78
1911	-3.11	1940	-1.61	1958	-1.16	1975	0.14	1992	-1.56
1912	-3.32	1941	-1.96	1959	-1.45	1976	-1.07	1993	-0.95
1913	-3.84	1943	-2.17	1960	-1.29	1977	-0.26	1994	-0.85
1914	-3.64	1944	-1.98	1961	-1.14	1978	-0.53	1995	-0.91
1926	-1.88	1945	-1.33	1962	-0.72	1979	-1.75	1996	-1.47
1927	-2.29	1946	-0.71	1963	-1.12	1980	-1.49	1997	-1.69
1928	-2.03	1947	-2.01	1964	-0.89	1981	-1.52	1998	-0.73
1929	-1.94	1948	-1.83	1965	-1.01	1982	-1.12	1999	-1.55
1930	-1.94	1949	-1.96	1966	-1.78	1983	-1.5	2000	-1.47

1931	-3.66	1950	-2.6	1967	-1.68	1984	-1.67
1932	-2.11	1951	-1.54	1968	-1.46	1985	-1.74
1933	-0.99	1952	-2.35	1969	-0.98	1986	-1.11
1934	-2.29	1953	-1.66	1970	-1.36	1987	-1.96

El resultado tabular puede apreciarse gráficamente con su línea de tendencia y respectiva ecuación regresiva:

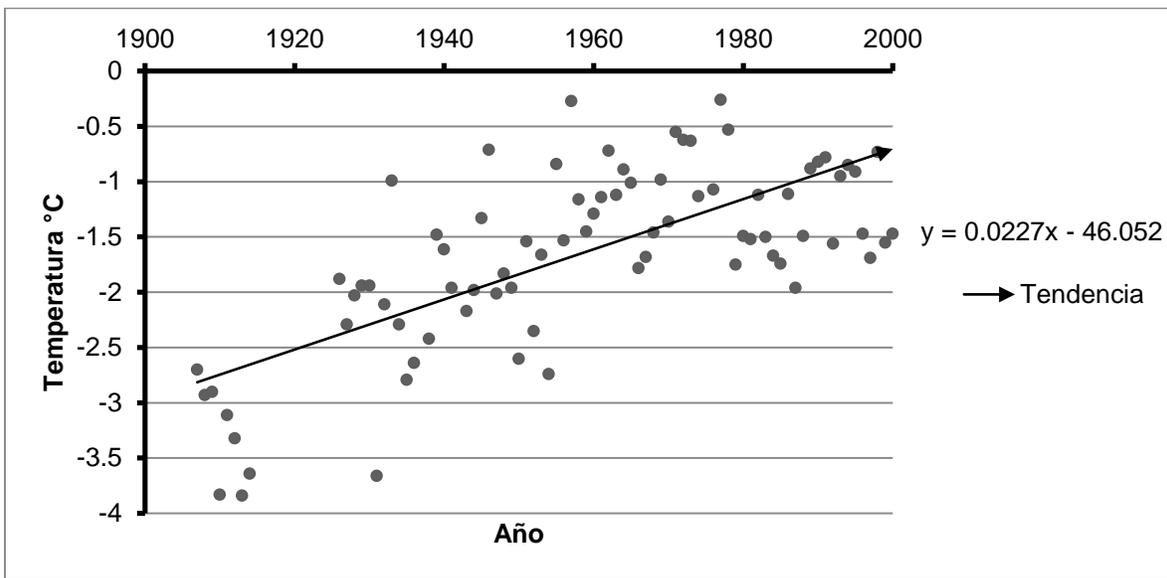


Figura 10. Comportamiento de la temperatura en la superficie central del glaciar.

En consecuencia, si se emplea la ecuación de la línea de tendencia:

$$y = 0.0227x - 46.052$$

Dónde:

y Representa la temperatura, y

x Representa los años,

a fin de conocer en qué momento $y = 0$, se obtiene:

$$x = \frac{0+46.052}{0.0227}$$

$$x = 2029$$

El resultado derivado indica que de continuar esa propensión, la temperatura media anual del aire en la superficie central del glaciar alcanzará los 0°C para el año 2029, en la figura 11 se aprecia con claridad esta previsión:

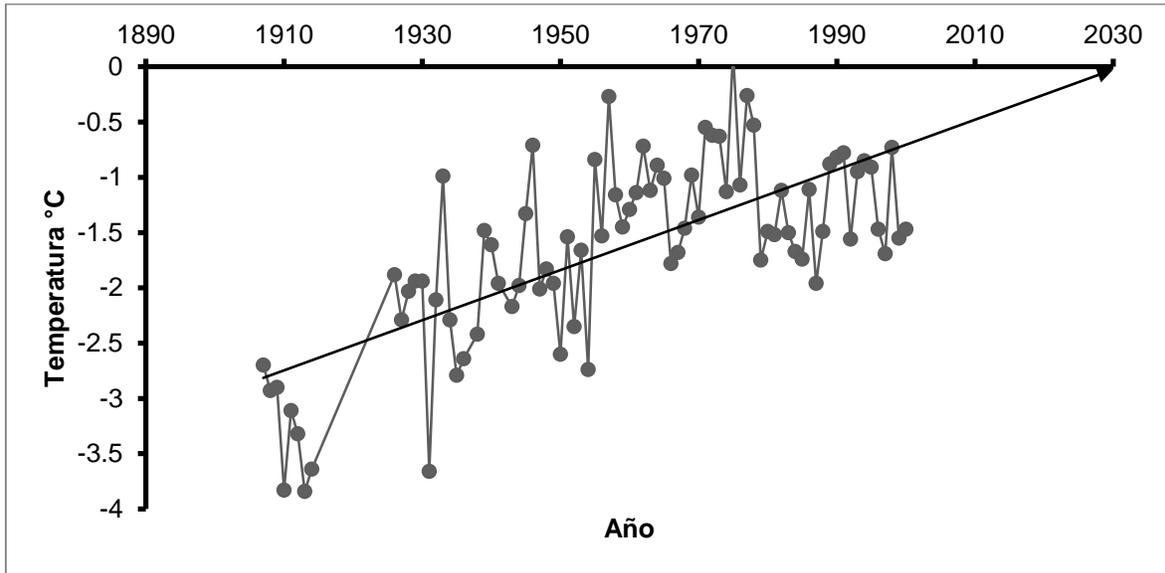


Figura 11. Tendencia extrapolada hasta alcanzar la temperatura media de 0°C.

El modelamiento térmico elaborado mediante el DEM de la zona arrojó dos mapas comparativos para los años 1907 y 2000; con la predicción de la tendencia extrapolada hacia el año 2029, con la que se estimó el año en que la cota 5,340 m alcanzaría una temperatura media anual de 0°C, se modeló un tercer mapa isotérmico para el mismo año. En ellos luce con distinta tonalidad la isoterma 0°C; esta línea térmica en la que se aprecia una aparente disminución en su extensión a través del tiempo se debe, de inicio, a que están vistas desde el cenit del centro del volcán, y que al estar en contacto con la superficie del cono volcánico éstas se ubican a una altitud cada vez mayor en cada año de análisis. Los mapas obtenidos son:

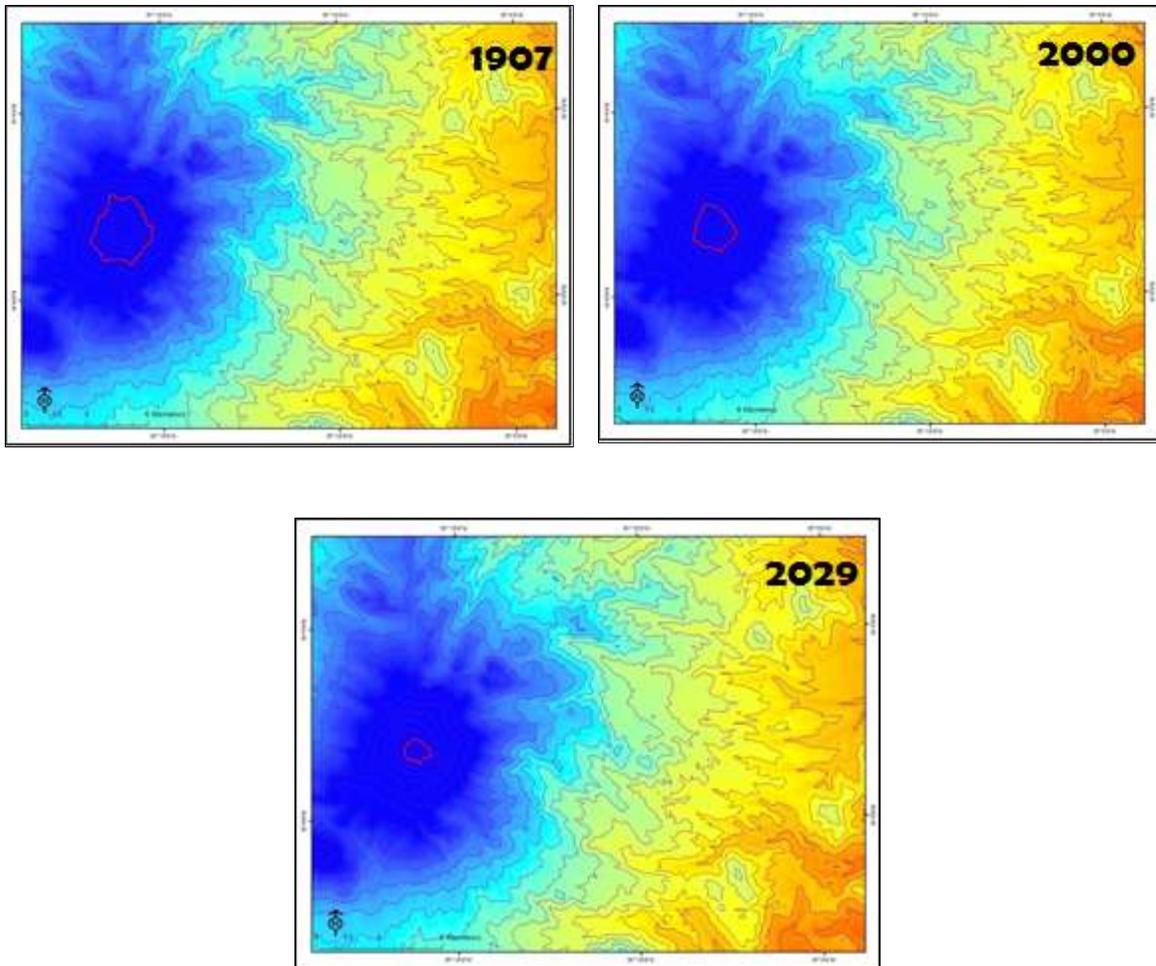


Figura 12. Secuencia cronológica de mapas térmicos para los años 1907, 2000 y 2029 respectivamente. Elaboración propia.

Al extraer y aislar las tres isotermas 0°C se pueden sobreponer al cono volcánico para analizar sus respectivas posiciones sobre el DEM y su ubicación relativa al perímetro del glaciar (figura 13). Para una mejor apreciación de su altitud, se agregaron las isohipsas montadas sobre una ortofoto del año 2004 (figura 14):

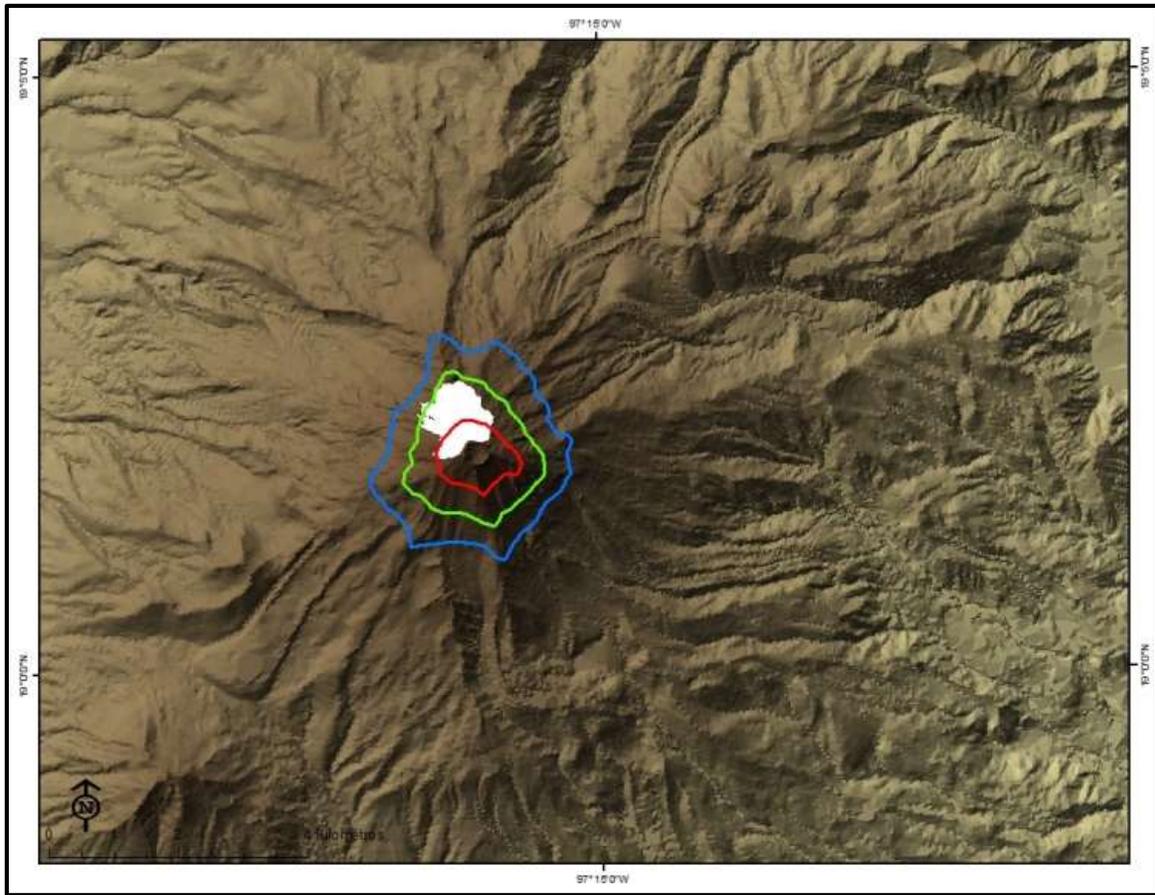


Figura 13. Isothermas 0°C para 1907 (azul), 2000 (verde) y 2029 (rojo). Elaboración propia.

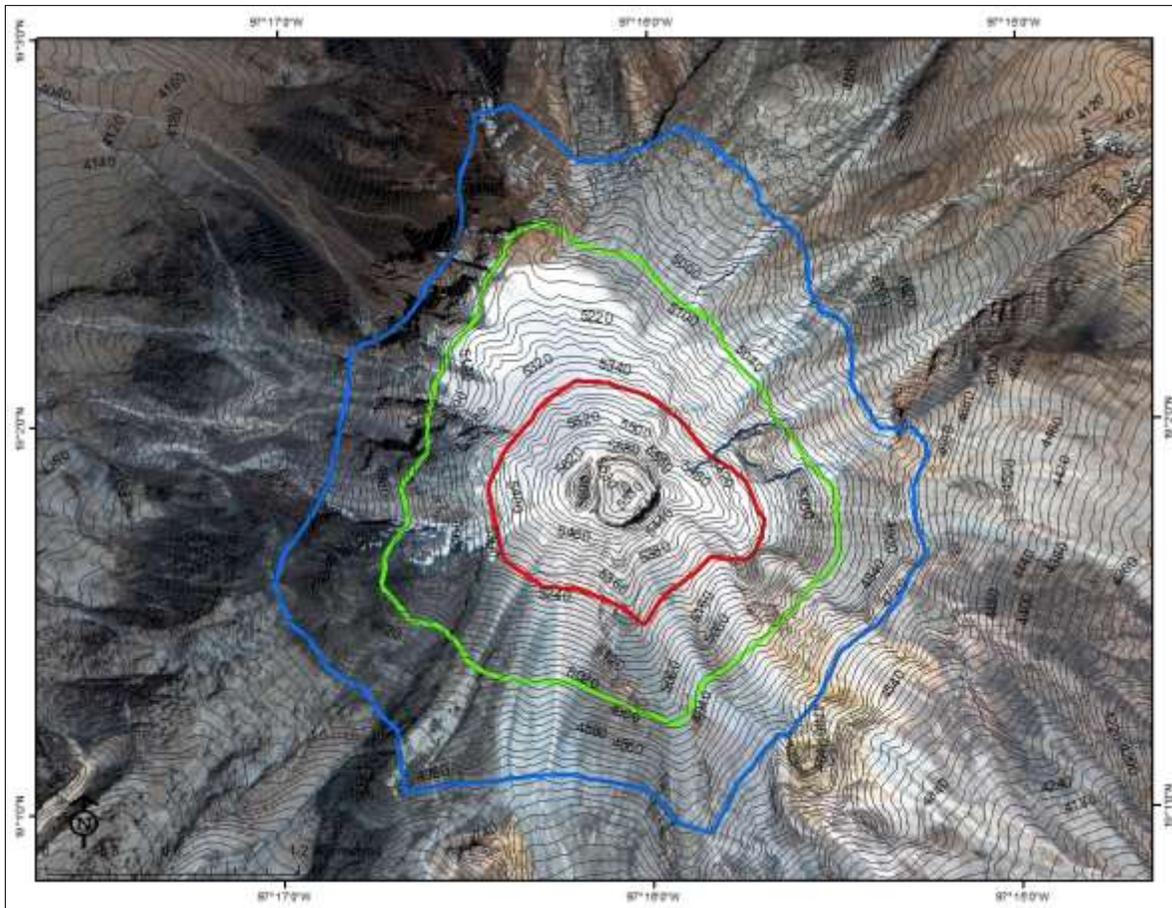


Figura 14. Isothermas en relación a las isohipsas. Elaboración propia.

Es fácil apreciar cómo para el año de 1907 la isoterma en cuestión se ubicaba a una altitud muy inferior en comparación con lo que para el año 2000 alcanzó; en 1907 la línea de equilibrio se encontraba cerca de los 4,720 msnm, mientras que para el 2000 ascendió a 5,000 msnm. Para el año 2029, según la predicción del modelo la isoterma en cuestión alcanzaría la cota 5,320 m, lo que coincide con la línea de tendencia graficada anteriormente. Al mapa se le ha sobrepuesto la capa de la superficie del glaciar, vectorizada a partir de una ortofoto del año 2004 en la cual se aprecia que el límite inferior del glaciar supera la altitud de la última

isoterma, lo que pone de manifiesto el continuo ascenso de la línea 0°C y a su vez le otorga validez al modelo.

La imagen compuesta por la misma ortofoto sobre el modelo digital del terreno muestra una perspectiva tridimensional del volcán, la cual señala con mayor énfasis lo mencionado con anterioridad, no dejando espacio para dudas sobre el ascenso en casi 300 metros de la isoterma 0°C a lo largo de 93 años y la posición que alcanzaría en cerca de dos décadas:

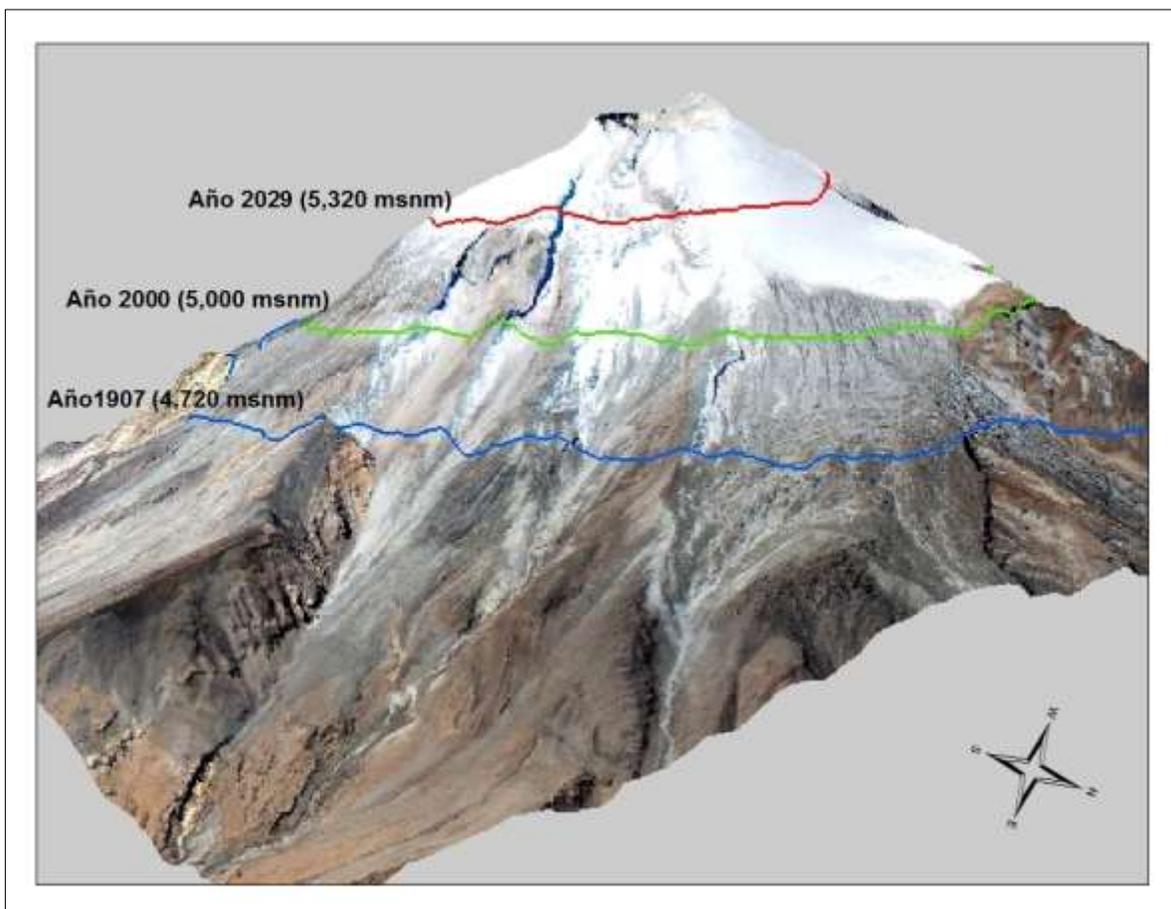


Figura 15. Perspectiva del volcán con las isotermas. Elaboración propia.

Resulta más que clara la apreciación del aumento de la temperatura en la parte alta del Citlaltépetl a partir de 1907, y que condiciona, entre otros factores, el continuo retroceso de su glaciar por fusión. Si las estimaciones a futuro sobre la tendencia térmica se mantienen constantes, para después de la tercer década sólo permanecerán fragmentos aislados en la parte más alta de lo que ha sido el mayor glaciar del país puesto que por debajo de la línea de 0°C no habrá existencia de hielo permanente, y su temperatura de congelamiento o fusión estará condicionada a las estaciones del año, experimentando así precipitación de nieve durante los meses más fríos para derretirse en la primavera o verano siguientes.

4.2 Cálculo de la oferta hídrica potencial del glaciar.

Según la Comisión Nacional del Agua en su reporte titulado: *Estadísticas del agua en México* (2011), dentro de los servicios ambientales generados por los ecosistemas el más importante para subsistir, para producir e intercambiar bienes y servicios, es el agua; y de ésta, una de las principales fuentes de agua dulce que aún posee la Tierra son los glaciares de montaña. Su importancia radica en que el aporte hídrico que estas representan se debe al nacimiento de corrientes perennes de agua fresca, las cuales son usadas cuenca abajo alimentando a la cuenca en las temporadas de estiaje. Así mismo, sus escurrimientos por el deshielo proveen de agua potable a los asentamientos ubicados en las faldas de estas montañas, dadas las características fisiográficas de esos sitios, ya que es la

única manera de que tengan acceso al vital recurso (Peter G. Knight, 1999; Ariza, 2006).

En 1958 el Glaciar Norte ocupaba una superficie de aproximadamente 2.23 km² (Cortés, 2009); sin embargo, en las últimas décadas su área se ha reducido considerablemente al igual que su espesor; para el año 2007 se estimó su superficie en sólo 0.62 km² (Palacios y Vázquez-Selem, 1996; Cortés, 2009).

Una vez procesada la información de profundidad por radar por Brown *et al* (2005) más la estimación de White (2002), junto con el área calculada a partir de una ortofoto del 2004, el mapa y perfil del glaciar quedó según la figura 16:

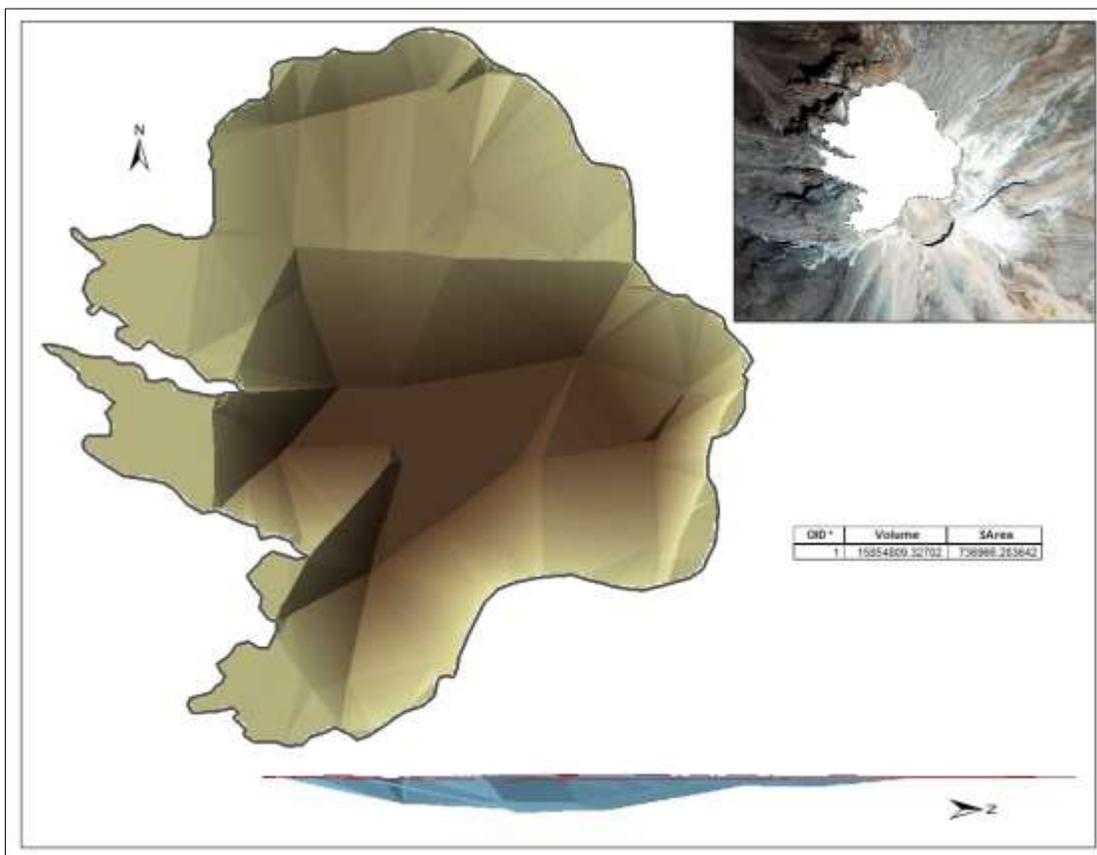


Figura 16. Volumen en planta y perfil del glaciar. Elaboración propia.

Tal como puede apreciarse, con base al cálculo elaborado, el área obtenida es de 736,966 m² y un volumen estimado en 15, 854,809 m³; por lo que de acuerdo al razonamiento físico de Serway (1997), el Glaciar Norte contiene un potencial equivalente a 14, 538,860 m³ de agua.

4.3 Identificación de los asentamientos hídrico-dependientes del glaciar.

En la parte baja del volcán, al oriente del mismo se encuentran diversos asentamientos que poseen características geográficas muy similares entre sí; el difícil acceso las mantiene en relativo aislamiento con respecto a comunidades que cuentan con mayores servicios e infraestructura.

Mediante la selección previamente propuesta, que haría suponer dado a sus condiciones orográficas, el difícil acceso y lo distante de poblaciones mayores, son hídricamente dependientes de los escurrimientos del glaciar para sus necesidades básicas, las comunidades que fueron identificadas (cuadro 4) a partir de las bases estadísticas del INEGI (2010):

Cuadro 4. Comunidades hídricamente dependientes de los escurrimientos del glaciar.

Municipio	Localidad	Altitud	Población	Viviendas
Calcahualco	Nuevo Jacal	3031	360	69
Calcahualco	Nueva Vaquería	3053	730	182
Coscomatepec	Cuiyachapa	2599	2248	498
Coscomatepec	El Aserradero	2648	218	55
La Perla	La Coyotera	2532	116	17
La Perla	Naranjillos	2585	3	1
La Perla	Las Trincheras	2608	50	12
La Perla	El Paso	2637	577	118
La Perla	Agua Escondida	2737	832	215
La Perla	El Comal	2776	203	39
La Perla	Rancho Nuevo	2782	348	71
La Perla	La Mata	2813	129	27
La Perla	El Minero	2879	72	13
La Perla	Galicia	2922	45	8
La Perla	Rancho Viejo	3066	68	15
La Perla	La Paloma	3076	22	5
La Perla	Potrero Nuevo	3257	175	37
La Perla	San Miguel Chinela	3288	130	30
La Perla	San Miguel Pilancon	3321	458	96
La Perla	Papalotla	2561	681	162
La Perla	Xometla	2551	725	176
Mariano Escobedo	San Baltazar	2570	425	7
Mariano Escobedo	San JosePilancon	3119	313	96
Mariano Escobedo	La Cieneguilla	2833	231	52
Mariano Escobedo	Agua escondida	2542	76	11
TOTALES			9235	2092

En el mapa de la figura 17 se aprecia su localización:

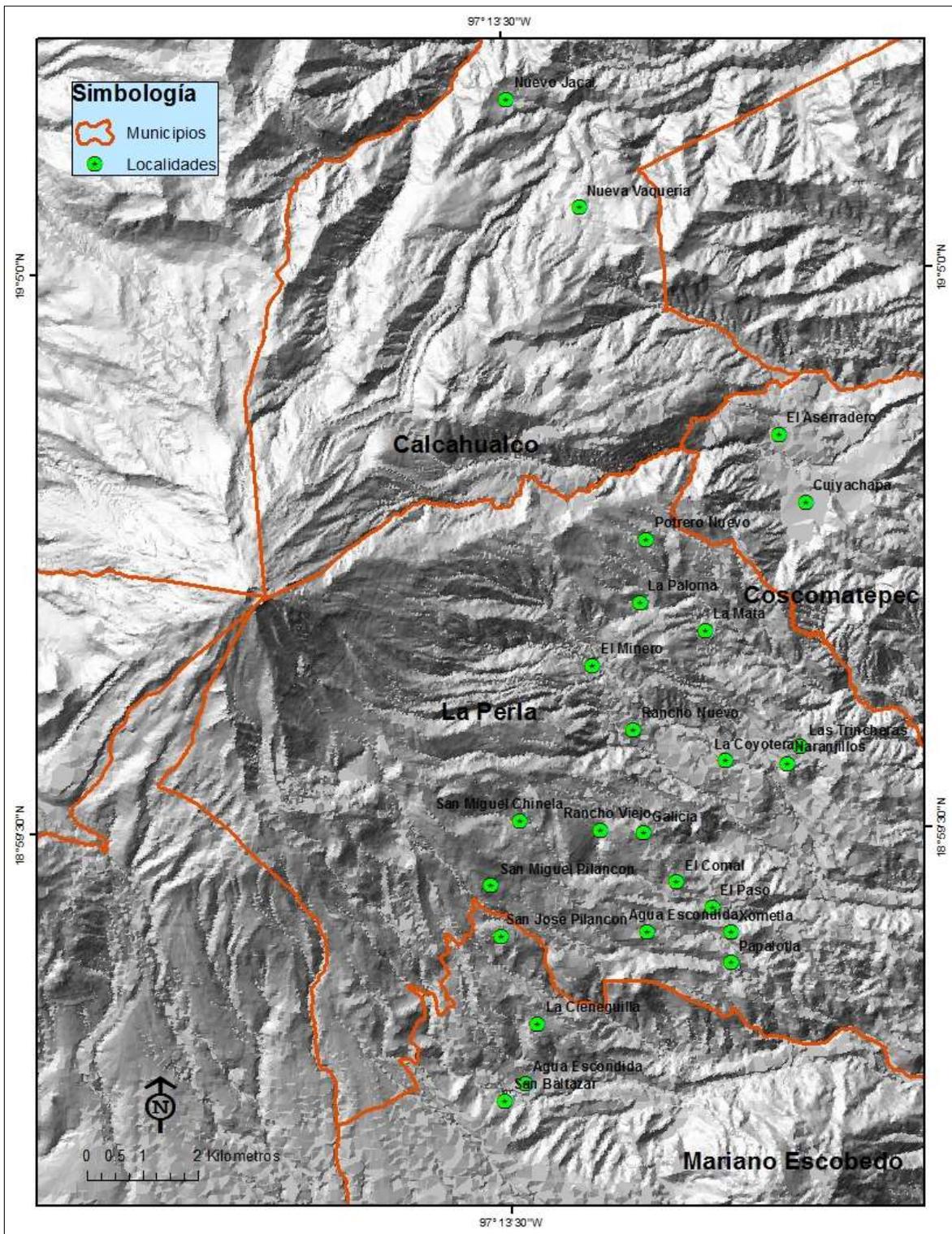


Figura 17. Mapa de localidades hídrico-dependientes identificadas. Elaboración propia.

En consultas realizadas a los encargados del área de obras públicas y de agua potable de los cuatro ayuntamientos: La Perla, Mariano Escobedo, Coscomatepec y Calcahualco ha sido posible constatar que la tarea de identificar las comunidades hídrico-dependientes es la correcta, puesto que de acuerdo a los servidores públicos de cada municipio, este listado coincide con las que ellos tienen identificadas.

4.4 Caracterización del proceso de los escurrimientos hídricos del glaciar hasta su aprovechamiento por las comunidades.

De acuerdo con Rodríguez-Elizarrarás y Lozano (citado por Palacios y Vazquez-Selem, 1996), la principal roca dominante en el Citlaltépetl es la andesita y la dacita; el primer tipo de roca se encuentra presente como flujo de lava intercalado con flujos piroclásticos, estos depósitos son los más recientes y están relacionados con las pequeñas erupciones de 1537, Hoskuldsson y Robin (1993) lo mencionan como *Flujo de lava de Jamapa*. El cono volcánico es cinerítico; esto es, que está conformado mediante los restos acumulados de erupciones previas de las que destacan suelos generados por cenizas volcánicas que poseen una consistencia suelta, con poca densidad; compuestos por granos finos (5 mm de diámetro) que ocasionan un drenaje deficiente en el lugar. En el grado de permeabilidad, de acuerdo a Stuart y Dixon, 1973; Dunn y Mehuys, 1984; Constanz et al., 1988; Brakensiek y Rawls, 1994 (citados por Fernández-Sanjurjo, 1999), quienes mencionan que la infiltración disminuye según aumenta la

proporción de fragmentos gruesos en el interior de los suelos, éste se encuentra entre los dos niveles mayores (una infiltración moderadamente rápida a rápida, en el orden de 6.25 hasta 25 cm³ /hr.). Este tipo de suelo de cenizas posee un espesor que va de 112 cm en los primeros 6.5 km del cráter, hasta los 24 km de distancia, donde alcanza un grosor entre 2 y 24 cm (Rossotti y Carrasco-Nuñez, 2004).

De acuerdo a la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (IUSS, 2007), el 83% del suelo del cono volcánico es de tipo andosol úmbrico; esto es, un suelo evolucionado a partir de cenizas y materiales piroclásticos, muy ácido y pobre en nutrientes, lo que condiciona, entre otros factores la inexistencia de vegetación en las partes superiores de sus laderas.



Figura 18. Fotografía tomada de norte a sur hacia el límite inferior del glaciar. Se aprecia el suelo tipo andosol úmbrico con su característico color oscuro. El cúmulo rocoso de la derecha corresponde al Sarcófago.

El perfil del suelo posee características que lo ubican principalmente, y de manera general dentro de las capas A y B (Palacios y Vazquez-Selem, 1996; Rossotti y Carrasco-Nuñez, 2004); para el caso de la capa A, con un espesor medio de 20 cm, ésta es más oscura (con tonos entre pardo oscuro y negro) debido a sus componentes de ceniza y materiales vítreos.

Descansa de manera adyacente sobre la capa B, de mayor espesor que oscila alrededor de los 50 cm y es de color más claro que la capa superior (tono pardo rojizo o amarillento). Por debajo de la capa B se aprecian materiales más solidificados, homogéneos y menos fragmentados que dan características a la capa C, que está en contacto directo con la roca madre, sobre la cual descansa.

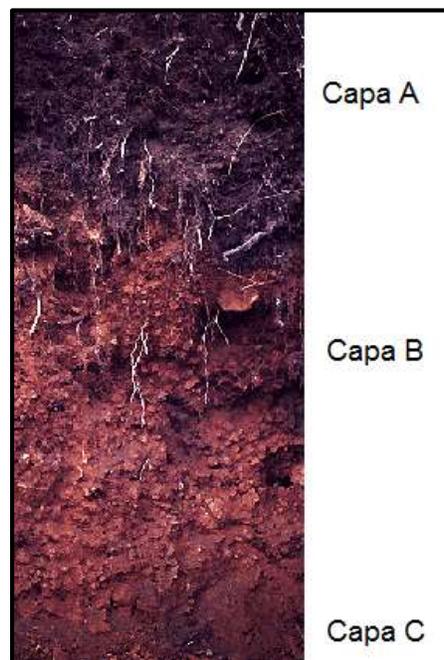


Figura 19. Perfil del suelo tipo andosol úmbrico. Fuente: IUSS-FAO (2006).

Sin embargo, para la parte alta del cono, Rossotti y Carrazco-Nuñez (2004) describen la estratigrafía del suelo de manera más detallada, quedando de la siguiente manera:

- Capa superficial o A0.

Es una delgada capa, de apenas unos 3 cm de espesor, con una tonalidad cercano al gris oscuro; rica en depósitos de cenizas y cristales. El 65% de su volumen lo integran los fragmentos de cristales de piroxeno, un 30% de fragmentos de plagioclasas, un 4% lo integran otros fragmentos de residuos vítreos y escoria, y el 1% restante está compuesto por piedra pómez.

- Capa u horizonte A.

Debido a la variación en su granulometría, se encuentra dividida en tres subcapas; la más baja de ellas está conformada por granos más finos que las demás y posee un grosor de 20 cm en promedio. La subcapa intermedia mide 15 cm de espesor y se compone de granos poco más gruesos. La subcapa superior posee entre 5 y 10 cm de grosor, con un diámetro de granos intermedia entre las otras dos subcapas. Sus colores oscilan entre gris-amarillento y gris cercano al negro.

- Capa u horizonte B.

Esta poco desarrollada, posee apenas entre 2 y 5 cm, su color oscila entre el pardo rojizo. Su composición mayoritaria (82%) lo forman fragmentos de pómez y el 18% restante se compone de restos líticos muy similares a parte inferior de la capa A.

- Capa u horizonte C.

Posee espesores entre 5 y 12 cm, su color es más claro que las demás y está conformada por fragmentos gruesos. Su composición en un 66% lo conforman restos de pómez y el 34% restante está integrado por clastos líticos diversos, que en su mayoría son fenocristales.

Por debajo de las capas anteriores se localizan los horizontes D, E y F los cuales son más difíciles de distinguir entre sí dado que sus diferencias son mínimas pero en esencia, corresponden a grandes fragmentos líticos considerados como roca madre.

Las partes inferiores del cono volcánico representan mayor complejidad, debido principalmente a las diversas fases de erupción que ha sufrido a lo largo del tiempo. Es por esa razón que por encima de los horizontes antes mencionados, se encuentran restos de lahares y de flujos piroclásticos posteriores, los cuales tienden a evolucionar y metamorfizarse con el paso de los años; tal proceso evolutivo ha sido interrumpido por nuevos flujos magmáticos y piroclásticos que nuevamente cubren los horizontes formados previamente, ocasionando un perfil edafológico complejo y desordenado. La imagen 20 muestra los perfiles para diversas comunidades en las faldas y partes inferiores al volcán.

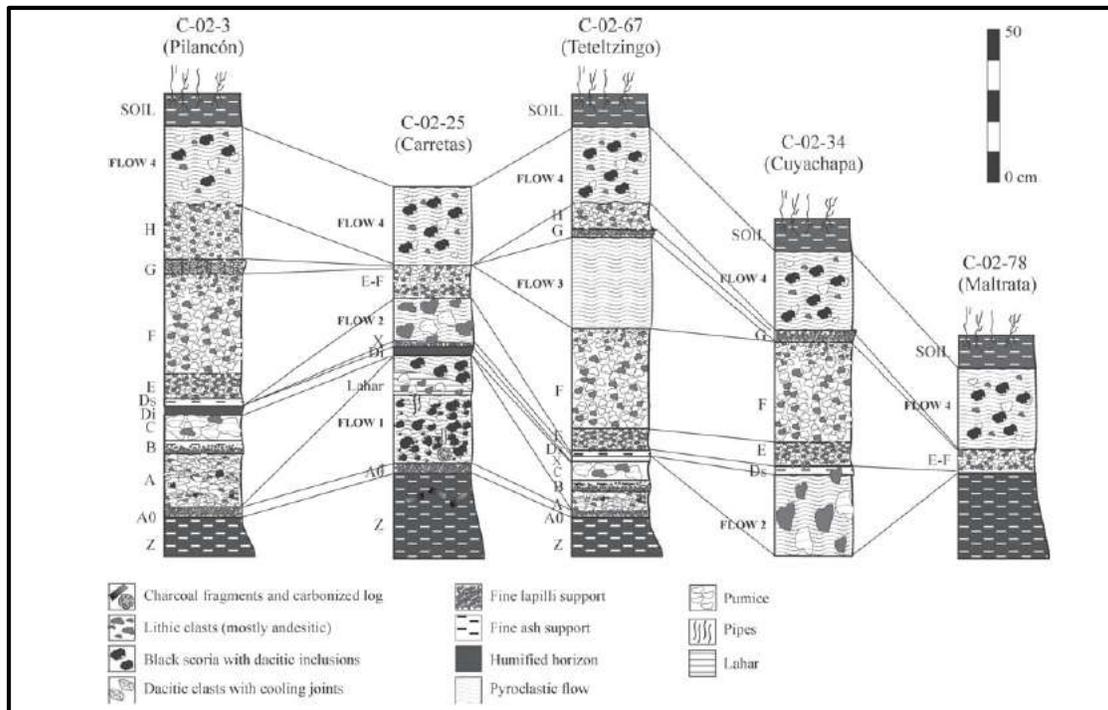


Figura 20. Diversos perfiles edafológicos complejos en las partes inferiores del cono volcánico. Fuente: Rossotti y Carrasco-Nuñez (2004).

Dadas las condiciones edafológicas anteriores, se tiene entonces que los escurrimientos del deshielo glacial rápidamente son infiltrados al interior del subsuelo llegando al lecho rocoso o al permafrost con características muy impermeables en ambos casos, ocasionando que por gravedad el agua se traslade vertiente abajo hasta llegar a zonas de cambio litológico o de corte topográfico del manto freático para emerger como manantiales, los cuales se localizan a una distancia de entre mil y dos mil metros del glaciar, lo que pone de manifiesto, y a la vez enfatiza, que la infiltración dado el poco espesor del suelo, solo se realiza a poca profundidad y que su tiempo de respuesta al flujo subterráneo sea rápido. Estas emanaciones hídricas son captadas por medio de pequeños embalses fabricados en cemento y ladrillo para que posteriormente sus

aguas sean trasladadas hacia los asentamientos próximos y sea así aprovechada por los lugareños. Mientras que en los valles de las barrancas, donde no existe esa captación, el agua comienza a fluir libremente cuenca abajo como pequeños cauces hasta que comienzan a converger en ella diversas corrientes menores que aumentan su volumen conforme descienden y dan origen al río que más abajo será conocido como Río Jamapa el cual termina su trayectoria en el Golfo de México.

En todos los casos, el sistema de abasto de agua para las comunidades se realiza por gravedad; ese método que poseen es relativamente reciente, algunas comunidades cuentan con él desde hace una década y otras desde hace poco más de veinte años; esto es, que anteriormente los habitantes de aquellas poblaciones debían caminar horas a través de barrancos a fin de encontrar corrientes que sirvieran para llenar los recipientes que posteriormente eran acarreados hacia sus hogares directamente sobre su cuerpo, o en los mejores casos por medio del empleo de mulas y caballos. En la actualidad, el sistema consiste en “capturar” el agua que emana del subsuelo y que previamente fue infiltrada de los escurrimientos del glaciar. Esta labor se logra mediante la fabricación de un pequeño embalse de 0.80 m x 1.0 m y 0.80 m de profundidad que momentáneamente retiene el agua y la canaliza a una manguera de pvc con un diámetro promedio de 3 pulgadas; esta manguera desciende varios kilómetros hasta llegar a las cisternas cuyas medidas en promedio son de 3.5 x 3.5 m y 2.5 m de altura, y que se ubican en la parte alta de cada asentamiento, para que posteriormente, en la base de la misma se desprenda una ramificación de

mangueras de 1 pulgada que llevan el agua hacia los hogares una vez más por gravedad.



Figura 21. Embalse para la captación de agua.



Figura 22. Trazo parcial de la manguera principal de abastecimiento. En la parte superior, en blanco, se aprecia el permafrost.



Figura 23. Entrada de la cisterna de almacenaje, se aprecia la manguera principal sujeta mediante un madero (Potrero Nuevo, La Perla).



Figura 24. Ramificación de mangueras secundarias en la base de la cisterna (Potrero Nuevo, La Perla).



Figura 25. Mangueras secundarias mediante las cuales es llevada el agua hacia los hogares (Potrero Nuevo, La Perla).

Resulta pertinente señalar que dadas las estaciones del año, el volumen del abastecimiento hídrico fluctúa de invierno a verano, siendo en la época invernal cuando menor aportación recibe cada cisterna, contrario a los meses cálidos cuando el flujo de agua es mucho mayor. A pesar de lo anterior, en la actualidad según los pobladores, el abasto es suficiente para sus necesidades de higiene personal, así como para la hidratación fisiológica. Este abastecimiento está calculado con base a las estimaciones del ayuntamiento de La Perla, donde señalan que es del orden de 19 lt/hr/hab. Este valor representa en un día, una oferta de 456 lt por individuo, lo cual excede por mucho las necesidades mínimas requeridas de acuerdo a la *Guía sobre saneamiento, agua y salud* de la

Organización Panamericana de la Salud (2009), donde de acuerdo a la figura 26 se requieren 30 lt diarios por persona para las necesidades primarias que son beber y cocinar. Para las necesidades secundarias, compuestas por el aseo personal, lavado de ropa, limpieza del hogar, cultivos domésticos (pequeñas hortalizas, plantas y jardín), así como para la disposición de desechos, se requieren al día 250 lt los cuales, sumados a los de primera necesidad se obtiene un total de 280 lt/día por persona; por lo tanto, se podría hablar que en promedio hay un superávit hídrico de 176 lt/día por individuo.

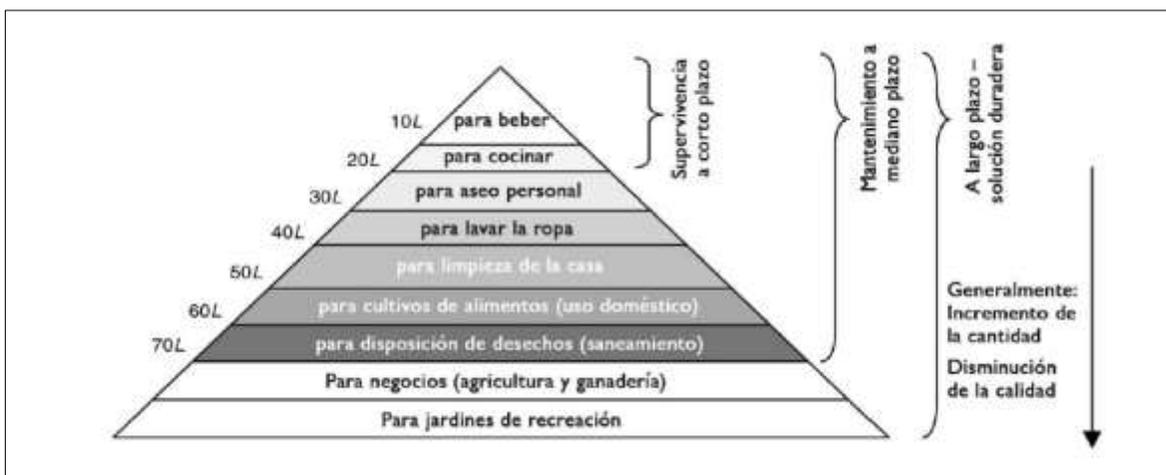


Figura 26. Necesidades diarias por persona según actividad realizada. Fuente: Organización Panamericana de la Salud (2009).

Todo parece indicar a que este comportamiento en la oferta hídrica del glaciar es el resultado del rápido retroceso y extinción del mismo, dado que la rápida fusión de su hielo se traduce en una mayor infiltración de agua al subsuelo para emanar posteriormente como manantiales y ser así llevada hacia las comunidades de las faldas del volcán. Resulta entonces necesario señalar que en años posteriores,

una vez que el glaciar haya desaparecido, este excedente dejará de existir y entonces la relación oferta-demanda de agua por habitante será muy distinta a la que se presenta actualmente.

4.5 Ámbito socioeconómico y crecimiento poblacional de las comunidades involucradas.

Tras la consulta de los índices económicos y sociales de las comunidades de la región, se han señalado diversos parámetros que ponen de manifiesto las precarias condiciones de bienestar social en las que se desenvuelven (el anexo 1 resume las principales características que prevalecen en cada asentamiento).

Quizá parte de esta marginación sea consecuencia de interacciones políticas friccionadas, muy comunes en el ámbito político mexicano puesto que se ha encontrado al menos en el presente milenio, que dentro de un estado con tradición partidaria priista, los distritos electorales federales XIV (Huatusco) y XV (Orizaba) han sido mayormente ganados por la coalición PRI-Partido Verde, situación que se repitió en la elecciones para el período 2010-2013 cuando ambos distritos fueron unificados en el distrito XV con cabecera en Orizaba. En contra parte, los distritos locales han sido en su mayoría ocupados por diputados de partidos de izquierda (PRD, PT, Convergencia y PAN); y para el caso de las presidencias municipales, una vez más la izquierda partidista ha sido la mayormente representada en cada ayuntamiento, con excepción del periodo

2011-2013 en Calchahuaco que es ocupado por la coalición “Veracruz para adelante”, con un rostro mayormente priista. Lo anterior pudiera señalar que muchas veces los decretos políticos no se orientan a favor de quien manifiesta mayor necesidad, sino que quizá son encausados hacia quienes brindan apoyo electoral a los tomadores de estas decisiones, convirtiendo con esto al tema del desarrollo comunitario en una lucha de partidarios contra detractores. El mapa de la figura 27 señala las condiciones de rezago que prevalecen en la región de estudio.

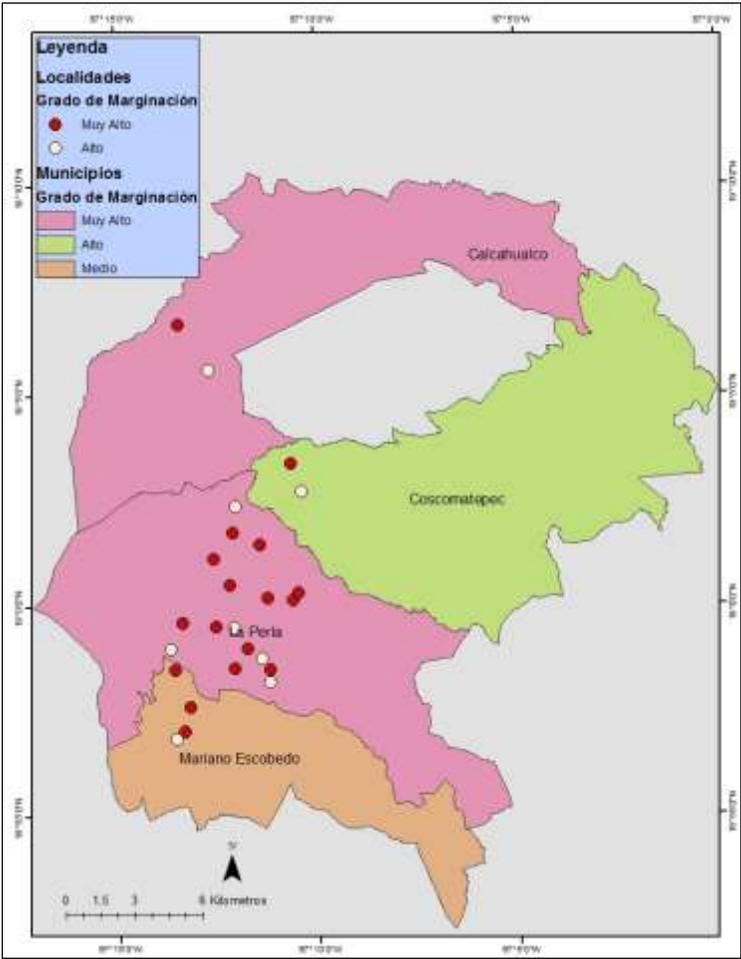


Figura 27. Grados de marginación municipal y local. Elaboración propia.

Claramente se muestran los grados de marginación tanto municipal como a nivel de localidad que la SEDESOL reconoce actualmente. Destaca de inicio, que las 25 localidades estudiadas se encuentran en los mayores niveles de pobreza; de las cuales 8 poseen un grado de marginación “Alto” y 17 de “Muy alto” dentro de un rango de 5 valores que va desde “Muy bajo” hasta “Muy alto”, y la mayoría se ubica en relativo aislamiento de su cabecera municipal puesto que no cuentan con transporte que las comunique con ésta. La figura 28 señala las comunidades con y sin servicio de transporte público.



Figura 28. Comunidades con y sin transporte público.

El nivel educativo de la región es muy bajo con relación a la entidad y más aun con el resto del país; posee un promedio de 3.11 años cursados de educación en comparación a los 7.7 del estado y a los 8.6 del país (INEGI, 2010). La figura 29 indica el grado educativo para cada una de las localidades:

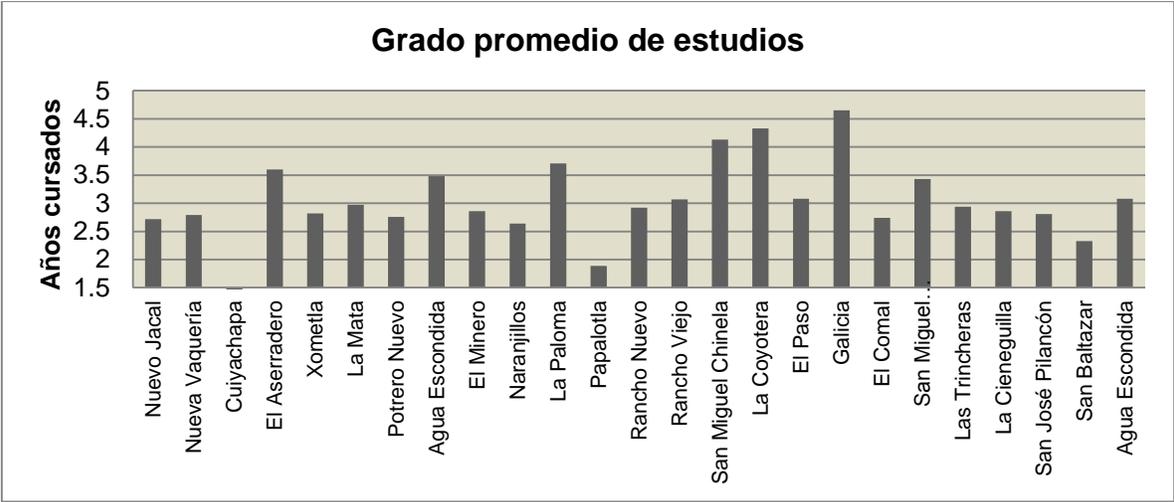


Figura 29. Grado educativo por localidad. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2010).

Lo anterior sin duda es factor determinante y se ve reflejado en el nivel de ingreso de la población, donde el 86% de los habitantes percibe menos del equivalente a un salario mínimo (figura 30); este ingreso es obtenido de la ocupación agrícola, que es la actividad primaria de la zona y sobre todo para el auto consumo. El comercio, a muy pequeña escala, se basa mayormente de la cosecha de papa para venta en mercados cercanos y la tala clandestina adquiere entonces mayor importancia; según la PROFEPA, en su informe del año 2011, en la zona del Pico de Orizaba se aseguraron 120, 647 m³ de madera clandestina aserrada y en rollo (SEMARNAT, 2012).



Figura 30. Ingreso por habitante. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2010).

Aunado a lo anterior, la principal problemática señalada por los habitantes de cada asentamiento según INEGI, 2010 es:



Figura 31. Principal problemática manifestada.

Como puede apreciarse, la mayoría de las comunidades señalan como principal problemática el aislamiento en que se encuentran por la falta de caminos o de transporte, seguidos de la escasez de empleo y de servicios de agua potable.

A pesar de todas sus condiciones y limitantes a las que se deben enfrentar, sólo en tres de las comunidades se presentan conflictos por posesión de tierras, y en cuestión de religión, en su totalidad son católicos lo que condiciona que nada más en una comunidad exista cierto grado de conflicto religioso; esto último hace ver que el conjunto de comunidades posean características muy comunes entre sí, y se traduzca en cierto grado de unión, siendo éste un factor que pudiera coadyuvar en la demanda colectiva a los gobiernos, de mayores y mejores condiciones de infraestructura básica, entre ellas, de agua potable.

Por otro lado, otro factor que pudiera agravar las precarias condiciones de las comunidades es la futura relación oferta-demanda de agua potable que se vislumbra; esta problemática, adicional a la disminución progresiva del recurso, radica en el aumento poblacional que se registra en cada comunidad. Lo anterior se aprecia en los dos últimos censos de población realizados por el INEGI, donde para el año 2000 la suma de las 25 comunidades reflejaba una población total de 7,492 habitantes y para el 2010 la cifra ascendió poco más del 23% para ubicarse en 9,235 habitantes. La misma experiencia, pero con un incremento mayor lo registra el número de viviendas totales, las cuales para el año 2000 alcanzaban 1,234 y ya para el ejercicio del año 2010 fueron contabilizadas 2,073; esto

representa un porcentaje de incremento del 68% en el número de casas habitadas. Lo anterior refleja, por un lado, que además del aumento en 174 nuevos pobladores anualmente entre los años 2000 y 2010, también para cada año la construcción de 86 nuevos hogares han demandado en suma al menos 50,048 litros más de agua cada día con respecto al año 2000.

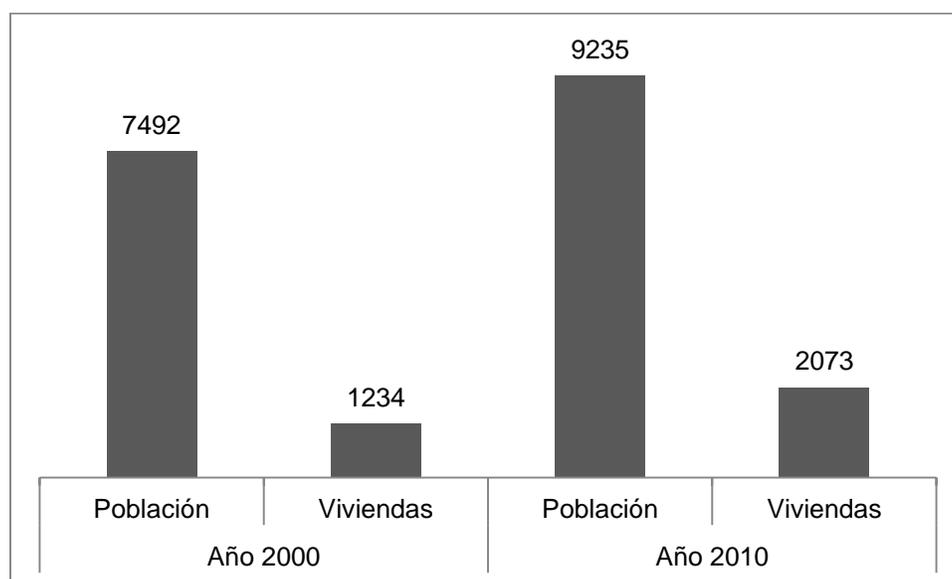


Figura 32. Incremento poblacional y de número de viviendas. Según datos de INEGI 2000 y 2010.

Los datos obtenidos mediante la proyección global de la población señalan que para el año 2030 reflejará las siguientes cifras:

Cuadro 5. Proyección exponencial de la población.

Año	Población
1990	5475
2000	7492
2010	9235
2020	12466
2030	16827
2040	22714

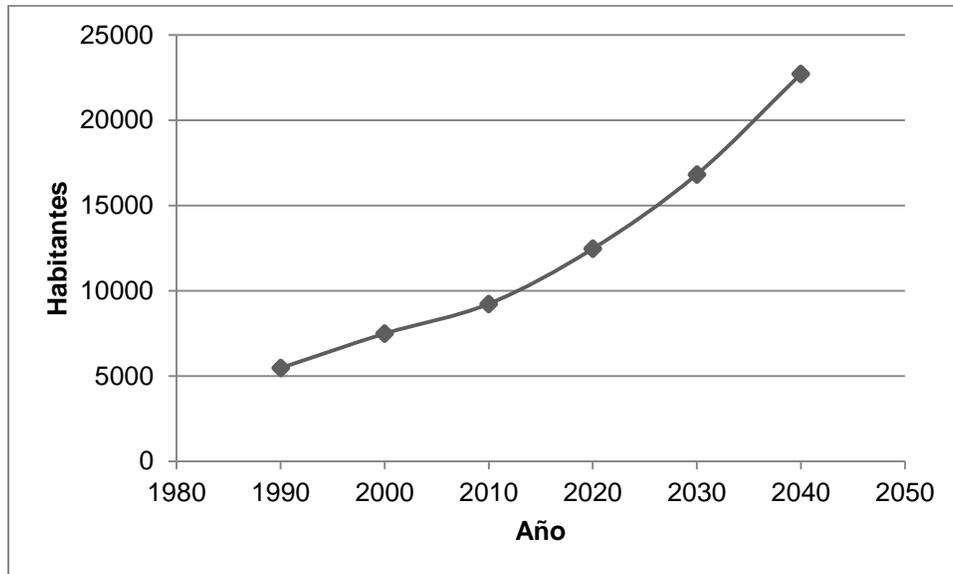


Figura 33. Tendencia y proyección poblacional.

Si se considera el crecimiento exponencial que la población experimenta, no sería aventurado pensar que el actual superávit hídrico será prontamente alcanzado y balanceado, para posteriormente sufrir un revés que lo convierta en déficit; lo anterior, considerando que existiera una oferta constante y permanente del flujo hídrico, pero se sabe que muy probablemente en unas décadas la principal fuente de abastecimiento haya dejado de proveer el líquido vital puesto que habrá entonces desaparecido.

4.6 Posición gubernamental ante la problemática.

Es notoria la relación inversa de la oferta-demanda hídrica que a futuro se prevé para las 25 comunidades asentadas en la parte más alta de la cuenca Jamapa-

Cotaxtla. Mientras que la fuente principal de abastecimiento se va reduciendo a través del tiempo debido, como previamente se señaló, a los efectos de las anomalías climáticas, el número de pobladores que habitan la zona de estudio se irá incrementando, y desde luego con esto existirá también una cada vez mayor necesidad del recurso hídrico. Esta situación requiere de atención anticipada para adecuar propuestas que enfrenten la situación prevista.

Para cumplir con los artículos 25 y 26 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de planeación en pro del desarrollo y bienestar comunitario, el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 señala cinco ejes principales que rigen la ruta a seguir para el cumplimiento de cada una de esas *Metas Nacionales*; dentro de éstas, La Meta número II: *Un México Incluyente* menciona que el alto porcentaje de la población sin acceso a los bienes públicos que por ley le pertenecen afecta sensiblemente el potencial de desarrollo del país, por lo que pretende hacer efectivo el alcance de la población a los servicios básicos de agua potable, drenaje, saneamiento, electricidad, seguridad social, educación, así como también la alimentación y el derecho a una vivienda digna; para conseguir lo anterior, el Plan reconoce inicialmente la existencia de políticas públicas inadecuadas, así como la errónea dirección de los recursos destinados a resolver los problemas de pobreza y desigualdad dado que más de la mitad de esos fondos están dirigidos a un sector de la población menos necesitada ya que poseen una mejor posición en la escala de ingresos, mientras que sólo el 10%

está enfocado hacia el 20% de la población más pobre (Gobierno de la República, 2013).

La incorrecta asignación de los fondos para la lucha contra las carencias del sector poblacional más vulnerable ha ocasionado que la escasez de servicios básicos en zonas rurales represente un 50.4%, a pesar de que entre 1990 y 2010 el crecimiento en esos servicios públicos permitió disminuir de un 44 a un 19% en el número de población carente de infraestructura básica. Esto, de acuerdo al Plan, reitera nuevamente la desigualdad en la asignación de recursos. La manera en la que el Gobierno Federal pretende atacar esas diferencias es mediante la integración social con equidad ante los derechos que posee. Para el desarrollo de una vivienda digna, el Plan sólo señala la pretensión de *mejorar la vivienda rural*. Dentro de las acciones con que se pretende obtener los resultados planteados destaca el objetivo número 2.5: *Proveer un entorno adecuado para el desarrollo de una vivienda digna*, donde aparece una línea de acción incluida en la Estrategia 2.5.2: *Reducir de manera responsable el rezago de vivienda a través del mejoramiento y ampliación de la vivienda existente y el fomento de la adquisición de vivienda nueva*; ésta es: *Dotar con servicios básicos, calidad en la vivienda e infraestructura social comunitaria a las localidades ubicadas en la Zona de Atención Prioritaria con alta y muy alta marginación*.

Dentro del programa de Zonas de Atención Prioritarias 2013 de la SEDESOL se encuentran los cuatro municipios de Calchahualco, Coscomatepec, La Perla y Mariano Escobedo; los tres primeros con un índice de marginación alto y muy alto, mientras que el último posee un nivel medio de rezago; por lo que al menos los primeros tres ayuntamientos cumplen con los requisitos planteados dentro del Plan Nacional de Desarrollo en materia de mejoramiento de vivienda rural.

La Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) es un instrumento de planeación a largo plazo mediante una ruta trazada a 10, 20 y 40 años. Surge a partir de la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y viene a complementar el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Su principal reto es lograr la reducción en un 30% de emisiones de bióxido de carbono para el 2020 y en un 50% para el año 2050.

Reconoce que la industrialización, la urbanización y el uso indiscriminado de recursos naturales representan una problemática social, económica y ecológica; por lo que la adaptación ante las circunstancias que éstas representan es una de sus tareas propuestas.

Dos de sus tres bases en materia de adaptación consisten en *Reducir la vulnerabilidad* y *Aumentar la resiliencia del sector social ante los efectos del*

cambio climático, y Conservar y usar de forma sustentable los ecosistemas y mantener los servicios ambientales que prevén.

Dentro del rubro social, la Estrategia planea atender a los grupos más vulnerables ante los efectos del cambio climático y los involucra activamente dentro de los primeros diez años, con lo que se espera que a veinte años la sociedad se encuentre comprometida con la tarea de reducir los efectos y al mismo tiempo haya aumentado su capacidad de adaptación ante los embates del cambio climático. A cuarenta años se espera que la sociedad se integre cultural y socialmente en el combate al cambio climático.

Para conseguir lo anteriormente planteado, las principales líneas de acción que se proponen son:

- Fortalecer la identificación y atención de zonas, asentamientos y grupos sociales prioritarios.
- Diseñar y fortalecer políticas públicas para proteger el patrimonio de la población (vivienda, infraestructura, etc.) ante los impactos del cambio climático.
- Dotar de infraestructura de calidad, emplear técnicas adecuadas para garantizar el abastecimiento de agua.

En el ámbito ecosistémico, dentro de los diez primeros años se espera proteger a los ecosistemas vulnerables mediante el uso sustentable, esquemas de gestión integral, así como de la implementación de estrategias y de tecnología. A veinte años se espera contar con una infraestructura suficiente para un manejo sustentable y eficiente del agua, a los cuarenta años se espera que el balance hídrico esté asegurado mediante el uso sustentable y eficiente del agua. Las principales líneas de acción encaminadas al cumplimiento de lo anterior son:

- Desarrollar programas de adaptación para mantener e incrementar la disponibilidad del agua superficial y subterránea, con un enfoque de manejo integral de cuencas hidrográficas.
- Crear fondos estatales para la restauración de los ecosistemas más degradados y vulnerables al cambio climático.

Por otro lado, el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 (dado que el correspondiente al periodo 2013-2018 se encuentra aún en consulta pública) señala en sus objetivos números 2: *Incrementar el acceso y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento*, y 7: *Evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico*. De manera particular, para el primer caso, propone la Estrategia 4 que consiste en *Incrementar la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado en las comunidades rurales, induciendo la sostenibilidad de los servicios*; mientras que para el segundo caso, existe un reconocimiento respecto a que el incremento de la temperatura puede ocasionar,

entre otros efectos, que disminuyan las precipitaciones y con esto la disminución de los escurrimientos y la menor captación del recurso, afectando de esta manera la disponibilidad del agua. Las primeras dos estrategias previstas en el último objetivo: 1.- *Evaluar los efectos del cambio climático en las variables del ciclo hidrológico, y 2.- Medir y evaluar los parámetros que inciden en el cambio climático*, proponen la integración de la información de estudios y caracterizaciones asociados al cambio climático, así como instrumentar sistemas de mediciones de variables climáticas que inciden en el fenómeno. La tercera estrategia: *Promover y apoyar la investigación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, en materia de medidas de adaptación ante el cambio climático* propone la caracterización de regiones en función al cambio climático, estudios de evapotranspiración, vulnerabilidad por salinidad en acuíferos y estudios sobre el comportamiento de eventos extremos.

Según la Agenda del Agua 2030 (CONAGUA, 2011), que postula estrategias para los próximos veinte años en materia de sustentabilidad hídrica, a fin de comprender los riesgos e implicaciones que sobre el sector hídrico podrían ocasionar los efectos del cambio climático, se realizó un estudio para estimar el incremento entre la brecha demanda-oferta existente, así como las medidas de adaptación necesarias para reducir esa brecha ante el escenario actual y futuro del cambio climático hacia el año 2030. Para conseguir su objetivo, según la Agenda, es necesario ampliar e intensificar medidas de bajo costo, así como

acciones de infraestructura de alto costo necesarias lo cual requiere de un incremento presupuestario para dicha implementación.

Dentro de las estrategias por llevar a cabo, propone dos lineamientos: a) Asegurar que todas las cuencas del país cuenten con una estructura de gobierno sólida, con capacidad suficiente para gestionar los recursos hídricos de forma responsable y sustentable, y b) Asegurar una mejor y más equilibrada distribución de competencias de fomento, regulación y prestación de los servicios de agua y saneamiento. Para el primer caso, menciona la necesidad de contar con Organismos, Consejos, Comités y Asociaciones consolidados y prácticos que permitan lograr el primer objetivo. En el segundo caso busca reforzar competencias y capacidades orgánicas, crear y formular marcos legales apropiados para cada nivel institucional, así como garantizar la suficiencia de recursos financieros para mejora y rehabilitación de los servicios de agua y saneamiento. Paralelamente, se plantea lograr el correcto y suficiente abasto hídrico de ríos, arroyos y lagos para salud de los ecosistemas y satisfacer las necesidades humanas mediante cauces limpios de basura, sin descargas residuales urbanas, industriales y agrícolas cuyas características vayan más allá de la capacidad de carga del cuerpo de agua en cuestión.

La cobertura universal es uno de sus primeros objetivos a mediano y largo plazo; para lograr esto, busca otorgar mayor relevancia en las atribuciones delegadas a

los gobiernos municipales con el apoyo de los estados para garantizar la calidad y cantidad suficientes para la población. Dentro de las iniciativas generales, destaca la de fortalecer el proceso de formulación, seguimiento y evaluación de los programas hídricos de largo plazo por región hidrológica orientados a la sustentabilidad hídrica; esto es, orientar correctamente la ruta de desarrollo sustentable de cada región, cuenca y acuífero del país considerando las particularidades de cada cuenca. La de propiciar que la comunidad científica y tecnológica contribuya de forma crecientemente efectiva a la formulación y despliegue de la política de sustentabilidad hídrica mediante la conjunción de la academia con los gestores y administradores del agua a fin de atacar las áreas de acción prioritarias. Y por último, la de crear el fondo contingente de adaptación al cambio climático; en este último renglón, se señala el desconocimiento institucional sobre el grado y la magnitud de los efectos del cambio climático en México, por lo que se busca contar con medidas que permitan realizar grandes modificaciones en el suministro de agua que pudieran condicionar los cambiantes patrones de precipitación, temperatura e insolación.

Se esperaba que el trabajo del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua *Adaptación al cambio climático: efecto del cambio climático en los recursos hídricos de México* señalara la problemática que compete en esta investigación y aportara una nueva perspectiva; sin embargo, dicho trabajo resume más o menos los escenarios generales que se aprecian hoy en día, así como también da una

ligera revisión a algunos de los programas sectoriales en materia hídrica, lo cual, ha sido tratado aquí de manera más detallada.

Para el caso particular de Veracruz, el Plan Veracruzano de Desarrollo 2011-2016 en su Capítulo V: *Un Veracruz Sustentable*, Apartado V.2: *Agua: Un recurso estratégico*, cataloga al estado como uno de los más potenciales en hidrología superficial puesto que sus volúmenes representan el 33% de todo el escurrimiento superficial del país. A pesar de lo anterior, menciona también, no es ajeno a la problemática en torno a su disponibilidad ya que gran parte de esa escorrentía es vertida en el mar sin ser aprovechada plenamente; además señala que dentro de sus 212 municipio hay 20,513 asentamientos que poseen una población menor a 2,500 habitantes lo cual, dentro de los criterios del INEGI son considerados como rurales.

El primer objetivo del Plan se basa en *Dar cobertura en los servicios de agua y saneamiento a toda la población de Veracruz, independientemente de su ubicación en regiones rurales o urbana*; a este respecto, la acción que comprende es el mejoramiento de la eficiencia técnica para el mejor aprovechamiento del suministro, así como atraer la inversión privada para la construcción y operación de algunos de los procesos internos, particularmente en el tratamiento de aguas residuales; sin embargo, estas acciones están más enfocadas hacia localidades

con más de 10,000 habitantes a fin de alcanzar una cobertura del 95% de población total atendida.

Por su parte, el Consejo del Sistema Veracruzano del Agua presentó en el 2006 su Programa Hidráulico Estatal para el período 2005-2010. En él se propuso como estrategia el control en la contaminación de ríos, y se reconoce la falta de cobertura e ineficiencia para el abasto de agua potable en las zonas rurales considerándola como uno de los principales retos para el gobierno del estado. Por esa razón, una de sus metas propuestas fue la de escalar del 44.37% al 69% de cobertura potable en el medio rural; a pesar de lo anterior, este último porcentaje se logró parcialmente dado que en el Plan Veracruzano de Desarrollo 2011-2016 se menciona un porcentual en cobertura del 64%. A pesar de las cifras planteadas, y con base a los datos del Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, este valor porcentual llega sólo al 58.54%.

De manera más específica, sea ésta el entorno municipal, cabe mencionar que los ayuntamientos de Coscomatepec y Mariano Escobedo no poseen un Plan de Desarrollo, ambos municipios plasman únicamente sus números e índices socioeconómicos mediante el Cuadernillo Municipal con el reflejo íntegro de los datos de los censos del INEGI; por lo que el tema del abastecimiento rural de agua potable no se contempla.

Calcalhualco posee un Plan elaborado para el período 2005-2007; en él resalta el conocimiento sobre los deshielos y escurrimientos del Citlaltépetl para formar afluentes hídricos cuenca abajo. La problemática de proveer servicios básicos a las comunidades rurales como luz, drenaje y especialmente agua entubada radica esencialmente en la distancia existente entre una y otra vivienda ya que la introducción de tuberías encarece el servicio y lo vuelve incosteable para el municipio. Así mismo, se refleja el conocimiento de la disminución de los cauces de escurrimientos superficiales. Dentro de este Plan existe la propuesta de concienciar a la población sobre el saneamiento de ríos y arroyos, así como de evitar la deforestación mediante la impartición de talleres por parte de instituciones y especialistas.

El Plan de Desarrollo municipal más reciente lo elaboró el ayuntamiento de La Perla para el periodo 2008-2010. En él se manifiesta el conocimiento de que las precipitaciones habían disminuido en los últimos años como consecuencia del cambio climático. Señala también al Pico de Orizaba como proveedor de escurrimientos por deshielo hacia la parte baja de la cuenca, así como de manantiales que proveen agua durante los meses de junio a octubre provocando corrientes intermitentes las cuales décadas antes eran permanentes; tal efecto le es atribuido también al cambio climático. Señala también que el servicio de agua potable es abastecido por los manantiales que proceden de la parte alta del volcán, algunas veces sus aguas son entubadas y otras son acarreadas manualmente. Dentro de sus estrategias de acción consistente en la *Ampliación*

de la red de servicios primarios municipales, se contempla el Programa de ampliación y mantenimiento de la red de agua y drenaje mediante la ampliación de la infraestructura del área rural y urbana. Dentro del objetivo 6.4: *Preservación del medio ambiente y los recursos naturales*, se reconoce entre otras problemáticas la escasez de los nacimientos de agua, por lo que pretende solucionarlo mediante acciones de protección, restauración y aprovechamiento racional de los recursos. Por último, contempla también el saneamiento de las aguas de ríos y arroyos del municipio.

Por todo lo anterior, podemos entender lo siguiente:

Los Planes o Programas federales y estatales enfatizan que proveer servicios básicos a toda la población es una de sus prioridades, más aun para el entorno rural. Resaltan la importancia de evaluar los efectos que a futuro puede ocasionar el cambio climático sobre los recursos hídricos ya que el conocimiento que se posee es muy general y su preocupación se enfoca al uso sustentable de los cauces de las partes medias y bajas de las cuencas, por lo que es en esos puntos donde procuran la aplicación de medidas de saneamiento de las corrientes y el tratamiento residual. De los cuatro municipios involucrados en la problemática, solamente dos han elaborado en algún período de administración un Plan de Desarrollo para su territorio; en estos también se contempla la cobertura en los servicios de agua para su población rural. Calchualco y La Perla además de procurar la limpieza de los ríos, tienen el conocimiento de que los deshielos del glaciar generan escurrimientos que más abajo se convierten en corrientes

permanentes mayores y La perla sustenta que el cambio climático ha afectado los flujos de agua proveniente de los manantiales que abastecen a los asentamientos ubicados en las laderas del Citlaltépetl. No obstante lo anterior, no existe la conciencia de que esos manantiales que actualmente les abastecen fluyen de los escurrimientos del glaciar que fueron previamente infiltrados para emerger a decenas o cientos de metros de distancia. Pero más importante aún es que a pesar de que algunas instancias mencionan las actuales y futuras consecuencias del cambio climático sobre los recursos, en ningún Plan se contempla el tema del retroceso del Glaciar Norte y menos aún las consecuencias que su continua disminución y casi segura extinción podrían ocasionar al ya no existir el suministro hídrico que actualmente aporta a la población asentada en las faldas del volcán.

Discusión

El diseño de la investigación ha permitido comprender los factores físicos y sociales que prevalecen en la zona de estudio y que condicionan el actual estado de abastecimiento hídrico de las 25 comunidades estudiadas.

Se demostró que, al igual como sucede en diversos países, particularmente los localizados en las diversas cuencas de los Andes (Comunidad Andina, 2007; IDEAM, 2012), el glaciar del Citlaltépetl funge como abastecedor hídrico para un gran número de pobladores, y el resultado de su continua y acelerada fusión es manifestado en el volumen actual de su abastecimiento. Esta oferta hoy en día es suficiente e incluso mayor que la cantidad requerida por habitante (Organización Panamericana de la Salud, 2009) de la parte alta de la cuenca Jamapa-Cotaxtla; sin embargo, de acuerdo a esta investigación ese volumen hídrico pronto habrá de ser revertido; con esto se ha reconocido el alto valor ambiental, en materia de hidrología, que el glaciar posee para la cuenca y lo comprometido que se encuentra en la actualidad como fuente abastecedora, particularmente para las 25 comunidades de la parte superior de la misma y sus 9,235 habitantes (INEGI, 2010) a los que hídricamente provee.

Una fase remarcable de esta investigación que tiene que ver con el modelamiento de la temperatura hacia la cima del cono volcánico, es que la metodología

aplicada resulta muy práctica para el estudio de parámetros climáticos en las altas montañas del país; donde de inicio, el método para el cálculo del GVTT particular de la zona de estudio ha sido el empleado en diversos estudios, entre ellos están Burgos (1965), Villalobos (1997) y Ramos Aguilar *et al.*, (2008); y la posterior extrapolación de registros térmicos con base al DEM de la región se ha aplicado en trabajos de investigación de ecosistemas en regiones montañosas de Sudamérica (Fries *et al.*, 2012). En este contexto se encontró, primeramente, que el mapa térmico obtenido corresponde claramente con los valores de temperatura que señala Enriqueta García (1988) en su adaptación del modelo climático de Köppen, para la República Mexicana; coincidiendo ampliamente los valores numéricos de temperatura obtenidos con los rangos señalados por la autora; así como también el traslape de los límites de transición de un tipo de clima a otro con los mismos valores generados. En segundo lugar, se debe señalar que el gradiente térmico particular de la zona de estudio obedece estrictamente a la orografía del entorno, mostrando una disminución de la temperatura que responde inversamente al valor de las isohipsas tal como se presenta en el trabajo de Fries y colaboradores (2012) para la zona sur de Ecuador. Por las razones anteriores, para el caso de México, donde no existe cobertura de estaciones climáticas a más de 3,500 msnm, y no hay evidencia de una metodología similar, este método de estimación representa una aproximación mayor para investigaciones que requieran conocer los datos de temperatura del aire en altitudes por encima de las que la red de estaciones aporta.

Por otro lado, los resultados percibidos en el pronóstico de la evolución de la temperatura del aire de la zona de estudio señalan lo que se ha mencionado en todos los medios disponibles que tratan el tema del cambio climático: un aumento constante e invariable de sus valores (Grudd, 1990; Erickson, 1992; Kaser y Osmaston, 2002; Magaña *et al.*, 2004; Ariza, 2006; Conde, 2006; Comunidad Andina, 2007; Delgado, 2007; Bustos, 2009; IMTA, 2012). La estación Huatusco (30066) al ser una de las que más años con serie de datos posee en el país (1906-2000) ha sido medular para este estudio y a su vez enfatiza esa tendencia aumentativa a través de sus 94 años de continuos registros climáticos. Consecuencia de lo anterior, y como puede advertirse, en veinte años el mayor glaciar mexicano se encontrará muy fragmentado y casi extinto; esto tiene gran correspondencia con el señalamiento de diversos autores (Comunidad Andina, 2007; Poveda y Pineda, 2009; SEMARNAT, 2009; IDEAM, 2012) quienes mencionan que el período de desaparición para muchos glaciares de características similares oscila a partir de cerca del año 2040 en adelante, puesto que tal como Ariza (2006) señala, el Glaciar Norte del Pico de Orizaba corresponde de igual manera a la reacción sufrida por las condiciones climáticas de las últimas décadas. Los señalamientos de Kaser y Osmaston (2002), Delgado Granados (2007) y Comunidad Andina (2007) hacen válida la hipótesis sobre la condena hacia la extinción de los glaciares tropicales en el mundo; ya que entre ellos, los glaciares mexicanos, y particularmente el del Pico de Orizaba han dado muestras claras de ese retroceso, así como del futuro no lejano que le aguarda, el cual, más allá de empobrecer el paisaje de alta montaña con su ausencia ante el marco del calentamiento global, acarreará severas consecuencias hídricas,

particularmente para los cerca de veinte mil posibles habitantes que para ese entonces estarían habitando la parte baja de su cono volcánico.

Todo indica que en unas décadas se estaría dando el mismo efecto sucedido en el monte Chalcataya de Bolivia (Comunidad Andina, 2007), donde la inicial fragmentación y posterior extinción de su glaciar reportada recientemente en el año 2009, y cuya altitud de apenas 200 metros menor que la del Citlaltépetl, señala los pasos que habrá de seguir el mayor volcán mexicano ante la irreversible manifestación del incremento térmico del aire a escala mundial. Resulta entonces necesario señalar esto último, ya que como se comentó en su momento, el constante aumento en altitud de la isoterma 0°C ya alcanzó al glaciar del Chalcataya, y con la escasa diferencia de altura en relación al Citlaltépetl, habrá de repetirse la misma historia.

Junto con la bibliografía consultada, el modelo térmico proyectado a futuro ha sido verificado mediante la sobre posición de la capa ráster del área glacial con las isotermas trazadas en el volcán, lo cual señala el continuo ascenso del límite inferior en la línea de equilibrio del cuerpo de hielo, por lo que ambas verificaciones otorgan un alto nivel de validez al modelo desarrollado.

Por otra parte, es bien sabido que la tarea de medir el espesor del hielo glaciar de alta montaña mediante GPR se torna por demás exhausta debido a lo pesado del

arrastre del equipo de medición, la baja presión atmosférica a la que se está expuesto y la reducción de oxígeno en el sitio de trabajo; y en el Citlaltépetl, debido a su gran altitud y la pronunciada pendiente de su glaciar ha representado una meta difícil de lograr. Como muestra de ello se han elaborado trabajos en su momento para el Popocatépetl, y más recientemente en el Iztaccíhuatl; ambos edificios volcánicos poseen una orografía relativamente más accesible y estable, y a la vez el acceso en automotor es más fácil que en el Pico de Orizaba. Por las condicionantes anteriores, el trabajo de Brown *et al.*, (2005) se limitó a realizar sondeos de espesor en la parte inferior del cuerpo de hielo del Pico de Orizaba; y para los fines de este trabajo, esos valores se complementaron con las observaciones de Sydney E. White (2002) para la parte superior del mismo. Es imperativo señalar que la estimación obtenida, si bien dista de ser precisa, vendría a representar el único intento al momento para calcular el volumen actual del Glaciar Norte o Jamapa; por lo que consecuentemente destaca aquí la necesidad de realizar (en la medida de lo posible) nuevas mediciones GPR que aporten datos más veraces y actuales del espesor del mayor glaciar mexicano a fin de complementar los trabajos realizados recientemente sobre su extensión y superficie que se traduzcan en un cálculo más preciso sobre su volumen.

Respecto a las condiciones sociales y económicas que prevalecen en el entorno de estudio, se encontró que de acuerdo a SEDESOL, de los cuatro municipios involucrados, tres ocupan los mayores niveles de rezago; de las 25 comunidades hídrico-dependientes, 17 poseen un nivel de marginación “Muy Alto” y el resto

pertenecen al grado de “Alto”, lo que representa una población de 7,376 y 1,859 para cada nivel de rezago respectivamente. Los datos que arrojó INEGI para el 2010 señalan que las localidades en su mayoría no cuentan con transporte público que las comuniquen con la cabecera municipal, poseen apenas tres años en promedio de enseñanza escolar y en su mayoría perciben un ingreso medio per cápita inferior a un salario mínimo. Posiblemente el bajo nivel educativo, sumado al raquítico ingreso por familia han motivado al saqueo forestal que se lleva a cabo diariamente en la región en busca de mejores percepciones; en este sentido, cabe mencionar que durante los días de prospección a la zona de estudio era frecuente a lo lejos y en diferentes direcciones el inconfundible sonido de las motosierras, así como del avistamiento de mulas en descenso cargadas de maderos. Paralelamente a lo anterior, son tres las principales problemáticas que se lograron identificar: falta de transporte público, falta de empleo, y de infraestructura para el abasto de agua. Sin duda, aquí se enfatiza que el sector social más marginado es el que termina pagando las mayores consecuencias ante los efectos de cambio climático, ya que los procesos que puedan conducir a su adaptación pueden tornarse complejos y difíciles de realizar, debido a que las dimensiones de su vulnerabilidad social, económica y política van más allá de sus dimensiones propiamente físicas.

Los tres censos del INEGI (1990, 2000, 2010) analizados manifiestan un crecimiento promedio entre cada uno de sus conteos del 33%, lo cual significa que para cuando el glaciar se encuentre severamente degradado habría cerca del doble de habitantes de los que existen hoy en día. Lo preocupante del caso es

que los programas y proyectos de desarrollo vigentes a nivel federal y estatal no indican el conocimiento de la no lejana extinción del Glaciar Norte, y desde luego, entre sus propuestas no existe ningún plan de mitigación o adaptación respecto al futuro abasto de agua para la zona, y sólo se han preocupado por plantear dentro de sus planes de desarrollo y de protección ambiental el saneamiento de las principales corrientes superficiales en la parte media y baja de la cuenca, esto es propiciado quizá porque es en estas zonas donde se encuentran los principales asentamientos urbanos e instalaciones industriales del estado. Por su parte, los planes de desarrollo municipales elaborados en su momento, si bien indican que los escurrimientos que descienden del volcán alimentan los ríos que se originan más abajo, manifiestan desconocer que las infiltraciones de la fusión del hielo aportan el agua que extraen de los manantiales que los hidrata. Esta falta de percepción sobre el valor ambiental que el glaciar posee motiva a pensar que quizá sea necesario que los responsables de las políticas públicas revisen los trabajos realizados en Perú, por ejemplo, sobre la importancia hídrica que sus glaciares poseen, y de las medidas contempladas para mitigar los impactos negativos que su retroceso traerá consigo para la población a quienes abastecen. Como muestra de lo anterior, en el documento *Adaptándonos al cambio climático en los Andes* del Programa de adaptación al Cambio Climático (PACC, 2009) se señala que con base a cuatro ejes: Conocimiento, Monitoreo e información, Actuación, y Aprender e incidir, se está trabajando para que el futuro próximo en materia hídrica no sea tan severo para su población. Esta medida es llevada a cabo a nivel nacional, regional y local; dando prioridad a las microcuencas comprometidas, mediante el análisis integral del clima, agua, agro, riesgos, cultura

y economía. Sus reuniones técnicas han generado un Plan Piloto de Adaptación en la microcuenca Mollebamba, distrito de Juan Espinosa Medrano y dentro de la provincia de Antabamba; aquí se prioriza la gestión hídrica, seguridad alimentaria y la reducción de riesgos bajo las premisas anteriormente citadas.

No obstante a que la zona del Citlaltépetl está lejos de contar con una estrategia similar y a pesar de las dificultades en común para vivir de los habitantes de la región, la relativa cercanía existente entre sus comunidades, aunado a la escasa presencia de conflictos políticos y religiosos, le brindan al conjunto de asentamientos un elemento de unión que facilitaría cierto grado de fortalecimiento organizacional, en la demanda al unísono, si es que lo deciden, de proyectos que pudieran subsanar la problemática que se antevé.

Debido a que el desarrollo social y económico depende de la disponibilidad del agua, al encontrarse ésta incluida en mayor o menor medida dentro de todos los procesos dinámicos y productivos de cada sector, se espera que el análisis pleno de este trabajo integral brinde un escenario lo suficientemente claro para los gobiernos de los tres niveles, y coadyuve en la planeación de nuevas estrategias, gestiones y gobernanzas que repercutan de manera positiva en el beneficio de los actuales y futuros habitantes de esas 25 localidades altamente marginadas.

Conclusión y aplicaciones.

Este trabajo muestra el panorama socio económico actual de las comunidades que se ubican en la parte más alta de la cuenca Jamapa-Cotaxtla, y de manera particular el escenario que se vislumbra a futuro sobre la extinción del Glaciar Norte y las repercusiones sobre la aportación hídrica que les abastece, para que los tomadores de decisiones en los niveles municipal, estatal y federal tomen conciencia y adecuen medidas apropiadas que mitiguen el déficit de agua potable que se prevé para esos asentamientos.

De manera específica, se logró señalar el ascenso continuo de la isoterma 0°C durante los últimos cien años lo cual obedece a la tendencia que condiciona el calentamiento global. Con esto ha sido posible establecer una fecha tentativa, cercana al año 2030, para señalar el periodo de gran fragmentación y posible extinción del mayor glaciar de México; este señalamiento, más allá de empobrecer el paisaje de alta montaña del país, manifiesta paralelamente los años en que los asentamientos de las faldas del volcán habrán de enfrentar severos problemas para abastecer sus hogares con agua potable.

Dentro del estudio de la evolución de la temperatura en la parte superior del Citlaltépetl se ha empleado una metodología no usada previamente en el territorio nacional, la cual resulta muy útil para las altas montañas de México

donde no existe cobertura de estaciones climáticas en altitudes superiores a los 3,500 msnm.

Se ha podido realizar la única aproximación disponible para estimar el volumen potencial de agua que el glaciar posee, siendo este de 14, 538,860 m³.

Saltó a luz el muy alto grado de rezago social, económico y de infraestructura que prevalece para las 25 comunidades que dependen hídricamente del glaciar.

Se encontró que, con base a la revisión de los distintos programas o planes nacional, estatal y municipales en materia de desarrollo y gestión hídrica, no existe conocimiento de la importancia que el Glaciar Norte posee para las veinticinco localidades a quienes abastece de agua, y desde luego, no hay documento alguno que señale alguna medida de adaptación ante su consecuente déficit hídrico que se anticipa.

Por todo lo anterior, mediante este trabajo se espera que:

- Los parámetros altitudinales señalados en la evolución de la isoterma 0°C a partir del año 1906 y hasta el 2030 proporcionen un marco referencial en análisis de tendencia térmica del aire para la región y el país.

- El año 2030, estimado para el vislumbrar el severo retroceso, fragmentación y posible extinción del Glaciar Norte, sirva como referencia para trabajos posteriores en el ámbito periglacial, particularmente en los volcanes y montañas tropicales.
- La metodología para estimar la temperatura en el ámbito de alta montaña mexicana, más allá de los 3,500 msnm sirva para ser aplicada en trabajos de investigación posteriores donde resulta necesario conocer los valores de la temperatura del aire que condiciona, entre otros factores el estado de los ecosistemas de las altas montañas mexicanas.
- Los antecedentes y el método empleados para calcular el volumen potencial de agua del glaciar sirva como aliciente para realizar trabajos más precisos, como el empleo de sondeos GPR que proporcionen datos reales sobre el espesor del cuerpo de hielo que a su vez se traduzcan en una estimación más real de su volumen.
- La gobernanza en los tres niveles del país hagan conciencia de la vital importancia que posee el glaciar del Citlaltépetl en materia hídrica, ya que solo así es posible comprender verdaderamente las repercusiones en el abasto de agua potable que se ven venir. Una vez logrado lo anterior, se estaría en condiciones de adecuar o incluso de generar

nuevas gestiones y estrategias de mitigación y adaptación ante el escenario hídrico futuro de la región de estudio.

- Si bien el objetivo de este trabajo está enfocado a las veinticinco localidades de la parte alta de la cuenca Jamapa-Cotaxtla, la conciencia generada por este documento coadyuve en la mejora de las actuales estrategias hídricas que se emplean en el resto del país donde quizá no existan glaciares que les abastezcan, pero si existen marcados factores que condicionan el desabasto y baja calidad de sus aguas.

Bibliografía

- Alonso, V. y González S. 1998. Presencia de hielo glaciar en los picos de Europa (Cordillera Cantábrica): El Helero del Jou Negro. Cuaternario y Geomorfología, **12 (1-2)**: 35-44.
- Aparicio, J. 2004. Fundamentos de hidrología de superficie. Ed. Limusa, México, D.F. 303 pp.
- Ariza, A. 2006. Retroceso de glaciales tropicales en los Andes Centrales de Colombia mediante imágenes Landsat. Revista de la Universidad Politécnica de Puerto Rico. **13 (1)**: 33-43.
- Arroyo, A. J. y Gurmendi P. P. 2011. Cambios en el régimen hídrico de la Laguna Lasuntay y Chuspicocha por variaciones en el Nevado Huaytapallana. Apuntes de Ciencia y Sociedad. **1 (2)**: 141-150.
- Austin, M. A. 1982. Climatología, Quinta edición, Ediciones Omega, S.A. Barcelona. 379 pp.
- Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM). Acceso en línea, página <http://clicom-mex.cicese.mx>
- Brown, S.C., Weissling B. P., and Lewis M. J. 2005. An ice thickness study utilizing ground penetration radar on the lower Jamapa glacier of Citlaltépetl (El Pico de Orizaba), México. Workshop on Radar Investigations. Houston, Tx.
- Burgos, J. J. 1965. Estimación del régimen térmico de Venezuela por el método de los gradientes medianos de Defina y Sabella. Agronomía Tropical **15 (1-4)**: 9-26.
- Bustos, C. 2009. La temperatura media en Río Negro dentro de un marco de calentamiento global. Presencia **(53)**: 5-8.
- Cancer, P. L., Lampre F., Ollero A. 2001. Glaciares actuales del Pirineo español: Catálogo de masas aproximación hidrológica. Treballs de la Societat Catalana de Geografia. **(23)**: 165-194.
- Comisión Nacional del Agua. 2008. Programa Hídrico Nacional 2007-2012. SEMARNAT, México, D.F. 163 pp.
- Comisión Nacional del Agua. 2011. Agenda del Agua 2030. SEMARNAT, México, D.F. 70 pp.
- Comisión Nacional del Agua, Subdirección general técnica, Gerencia de aguas subterráneas, 2010. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero (3008) Cotaxtla, estado de Veracruz.

- Comisión Nacional del Agua, Subdirección general técnica, Gerencia de aguas subterráneas, Subgerencia de evaluación y modelación hidrogeológica, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Costera de Veracruz. SEMARNAT. México, D.F. 17 pp.
- Comunidad Andina, Secretaría General. 2007. ¿El fin de las cumbres nevadas? Glaciares y cambio climático en la Comunidad Andina. Ed. Libélula, Comunicación, Ambiente y Desarrollo S.A.C. Lima, Perú. 103 pp.
- CONAGUA, 2011. Estadísticas Del agua en México, Edición 2011. SEMARNAT (ed.). México, D.F. 181 pp.
- Conde, C. 2006. México y el cambio climático global. Ed. Dirección General de Divulgación de la Ciencia. Ciudad Universitaria, México, D.F. 23 pp.
- Consejo Nacional del Ambiente (CONAM). 2005. Escenarios Climáticos Futuros y Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Santa. Fondo Editorial del CONAM. Perú. 32 pp.
- Conway H., Hall B. L., Denton G. H., Gades A. M., Waddington E. D. 1999. Past and future grounding-line retreat of the West Antarctic Ice Sheet. *Science*, **286 (5438)**: 280-283.
- Coordinación del Consejo Municipal de Desarrollo Rural Sustentable de La Perla, Ver. 2004. Plan de Desarrollo 2003-2010. 198 pp.
- Cortés, R. J. 2009. Evolución espacio-temporal de la superficie del Glaciar Norte del volcán Citlaltépetl utilizando sensores remotos. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Cortés-Ramos, J. and Delgado-Granados H. 2012. The recent retreat of Mexican glaciers on Citlaltépetl Volcano detected using ASTER data. *The Cryosphere Discussions*. **(6)**: 3149-3176.
- Delgado, G. H. 2007. Climate change vs. Volcanic Activity: Forcing Mexican glaciers to extinguish and related hazards en Memorias de la Primera Conferencia Internacional de Cambio Climático: Impacto en los Sistemas de Alta Montaña. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Suiza. 294 pp.
- Delgado, H. 1997. The Glaciers of Popocatépetl volcano (México): changes and causes. *Quaternary International* **(43)**:1-8.
- Delgado, H. and M. Brugman. 1996. Monitoreo de los glaciares del Popocatépetl en volcán Popocatépetl. pp. 221-244. *En: Volcán Popocatépetl, estudios realizados durante la crisis de 1994-1995*. CENAPRED (Secretaría de Gobernación)-UNAM. México, D.F.

- Delgado, H., R. Arciniega and D. Calvario. 1986. Loa glaciares del Popocatepetl y el Iztaccíhuatl. Comunicaciones Técnicas, Serie Investigación, Instituto de Geofísica, UNAM. México, D.F. 20 pp.
- Donn, W. L., 1965. Meteorología, tercera edición. Mcgraw-Hill. Barcelona, España. 484 pp.
- Erickson, J. 1992. Las edades del hielo, La próxima glaciación. Ed. Mcgrawn-Hill. Madrid, España. 133 pp.
- ENCC. 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40. Gobierno de la República. SEMARNAT (ed.). México, D.F. 60 pp.
- Fallas, J. 2007. Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones. [Actualizado al 15 de febrero de 2013].
Página electrónica.
http://www.mapealo.com/costaricageodigital/documentos/alfabetizacion/mde_teoría_2007.pdf
- Fernández-Sanjurjo, M. J. 1999. Influencia de los fragmentos gruesos en algunas propiedades físicas y químicas del suelo: antecedentes y estado actual del tema. Sociedad Española de Ciencia del Suelo. 6: 95-107.
- Fries, A., Rollenbeck R., Nauß T., Peters T. and Bendix J. 2012. Near surface humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. Agricultural and Forest Meteorology. **(152)**: 17-30.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Ed. Offset Larios, S.A. México, D.F. 46-52.
- Gobierno de la República. 2013. Plan Nacional de Desarrollo. México, D.F. 184 pp.
- Gobierno del Estado de Veracruz. 2011. Plan Veracruzano de Desarrollo 2011-2016. Xalapa Enríquez, Ver. pp. 307.
- Grudd, H. 1990. Small glaciers as sensitive indicators of climatic fluctuations. Geografiska Annaler **72A (1)**: 119-123.
- Guerra, B. P. 2006. Estudio cuantitativo del sector oriental del volcán Iztaccíhuatl, Puebla para determinar la recarga al acuífero proveniente de la masa del glaciar. Tesis de Maestría, Universidad autónoma de Chihuahua, Chih., México.
- H. Ayuntamiento de Calcahualco, Ver. 2006. Plan de Desarrollo y Diagnóstico 2005-2007. Calcahualco, Ver. 59 pp.
- H. Ayuntamiento de La Perla, Ver. 2009. Plan Municipal de Desarrollo 2008-2010. La Perla, Ver. 157 pp.

- Herrera, G. y Ruíz J. 2009. Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Bocayá-Colombia, 1986-2007. *Perspectiva Geográfica*. **13**: 27-36.
- Hobai, R. 2009. Analysis of air temperature tendency in the upper basin of Barlad river. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **4** (2): 75-88.
- Hoskuldsson, A. and Robin C. 1993. Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, Eastern México. *Bulletin of Volcanology* (55): 571-587.
- IDEAM. 2012. Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo. IDEAM (ed.). Bogotá, Colombia, 344 pp.
- Instituto Boliviano de la Montaña. 2006. Memoria del foro-debate: Retroceso de los glaciares y recursos hídricos en Bolivia-De la investigación a la acción. La Paz, Bolivia. 48 pp.
- Instituto de Ecología, A.C., CONANP. 2011. Tasa de cambio de uso del suelo en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Veracruz, México en el período 2003-2011, reporte final. Xalapa, Ver. 47 pp.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. 2007. Memorias de la primera conferencia internacional del cambio climático: Impacto en los sistemas de alta montaña. Ed. IDEAM, Bogotá, Colombia. 249 pp.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. 2012. Adaptación al cambio climático: efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. IMTA (ed.). Coordinación de Hidráulica. Jiutepec, Mor. 124 pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990. XI Censo General de Población y Vivienda. Resultados por localidad.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. XII Censo General de Población y Vivienda. Resultados por localidad.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. XIII Censo de Población y Vivienda. Resultados por localidad.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base referencial mundial del recurso suelo. Primera actualización 2007. Informe sobre recursos mundiales de suelos No. 13. FAO. Roma, Italia.
- Kaser, G., and Osmaston, H. 2002. Tropical Glaciers. *International Hydrology Series*. Ed. Cambridge University Press. New York, NY. 205 pp.
- Knight, P. G. 1999. Glaciers. Ed. Stanley Thornes. London, United Kingdom. 122 pp.

- Larraín, S. 2007. Glaciares chilenos: Reservas estratégicas de agua dulce. *Revista Ambiente y Desarrollo*. **23 (3)**: 28-35.
- Leonardi, Q. G. A. 2010. Análisis mensual de los balances de masa glaciológico e hidrológico del glaciar tropical Zongo (Bolivia). Tesis de Licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Llamas, J. 1989. Hidrología general. Universidad Autónoma del Estado de México. Primera Edición. 627 pp.
- Lorenzo, J. L. 1964. Los glaciares de México, segunda edición. Universidad Nacional Autónoma de México. Monografías del Instituto de Geofísica. Cd. Universitaria, D.F. 123 pp.
- Macías, J. L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (ed.). Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de Geología Mexicana. Tomo LVII (3): 379-424.
- Magaña, M. V., Villanueva, E. y Maderey, L. 2004. Vulnerabilidad en el recurso agua de las zonas hidrológicas de México ante el Cambio Climático Global. pp. 215-225. *En: Cambio climático, una visión desde México*. Ed. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.
- Magaña, R. V. 2004. El cambio climático global: Comprender el problema. pp. 17-27. *En: Cambio climático, una visión desde México*. Ed. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.
- Marcos, de J. y Palacios, D. 1996. Deglaciación de los grandes estratovolcanes mexicanos en 1994/95. IV Reunión de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología, La Coruña, España. **(21)**: 519-529.
- Maya, M. E. 2008. Relación agua superficial-agua subterránea en el acuífero Costera de Veracruz. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. 2012. El estado de los bosques del mundo. Oficina de Intercambio de Conocimientos, Investigación y Extensión, FAO. Roma, Italia. 64 pp.
- Oficina de ciencias de la UNESCO para América Latina. 1973. Hidrología de nieves y hielos en América Latina. Notas de clase y Desarrollo del curso Regional de Formación en Hidrología de Nieves y Hielo, Chile-Argentina 15 de noviembre- 18 de diciembre, 1971. Montevideo, Uruguay. 158 pp.

- Organización Meteorológica Mundial, OMM. 2012. Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2011 núm. 1085. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza. 19 pp.
- Organización Panamericana de la Salud. 2009. Cantidad mínima de agua necesaria para uso doméstico (Guía técnica número 9). Ed. Organización Mundial de la Salud. Génova Suiza. 4 pp.
- Palacios, D. and Vázquez-Selem, L. 1996. Geomorphic Effects of the Retreat of Jamapa Glacier, Pico de Orizaba Volcano (Mexico). *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*. **78 (1)**:19-34.
- Poveda, G., and Pineda, K. 2009. Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010-2020 decade? *Advances in Geosciences*. **(22)**: 107-116.
- Programa de adaptación al cambio climático, PACC. 2009. Adaptándonos al cambio climático en los Andes. Boletín técnico informativo. Ed. PACC. Cusco, Perú. 16 pp.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD. 2012. El desarrollo humano como vía para transformar la sociedad rural. *Revista Hechos de Paz* **(64)**: 2-3.
- Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., González-Castelán, Y. y Montiel Peralta, B. 2005. Monitoreo y vigilancia del volcán Citlaltépetl o Pico de Orizaba (análisis geomorfológico). *Revista Geofísica* **(61)**: 33-45.
- Ramos, A. R., Máximo R. P. y Borjas H. J. Modelación de isolíneas meteorológicas y cálculo del gradiente térmico para la ciudad de Puebla durante el periodo junio 2005-2006 con apoyo de imágenes satelitales. *Temas de Ciencia y Tecnología* **12 (34)**: 25-36.
- Ribstein, P., Francou, B., Rigaudière, P., Saravia, R. 1995. Variabilidad climática y modelización hidrológica del glaciar Zongo, Boliva. *Bull. Inst. fr. études andines*. **24 (3)**: 639-649.
- Rincón, M. M. y Fajardo, V. M. 2007. Teoría y métodos demográficos para elaboración de estimaciones y proyecciones de población (Insumos para la Planificación). Documento de trabajo. Bogotá, Colombia. 180 pp.
- Rossotti, A. y Carrasco-Nuñez, G. 2004. Stratigraphy of 8.5-9.0 ka B.P. Citlaltépetl pumice fallout sequence. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. **21 (3)**: 353-370.
- Sánchez, F. J. 2012. Conceptos fundamentales de hidrogeología. [Actualizado al 17 de septiembre de 2013]. Página electrónica http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf.

- Santamaría, G. L. 2011. Modelación hidrológica en la cuenca del río Jamapa, Veracruz. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F., México.
- Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL. Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias. Reglas de Operación 2013. 33 pp.
- Secretaría de Finanzas y Planeación del Estado de Veracruz. 2013. Sistema de Información Municipal, Cuadernillos Municipales, 2013. Mariano Escobedo, Ver. 11 pp.
- Secretaría de Finanzas y Planeación del Estado de Veracruz. 2013. Sistema de Información Municipal, Cuadernillos Municipales, 2013. Coscomatepec, Ver. 11 pp.
- Secretaría General de la Comunidad Andina. 2007. ¿El fin de las cumbres nevadas? Ed. Libélula Comunicación, Ambiente y Desarrollo, S.A.C. Lima, Perú. 103 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. 2009. Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. México, D.F. 81 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. 2012. Informe Anual PROFEPA 2011. México, D.F. 141 pp.
- Serway, R. A. 1997. Física: Tomo I cuarta edición. Ed. McGraw-Hill. México, D.F. 645 pp.
- Union of Concerned Scientist. 2011. [Actualizado al 6 de junio de 2013]. Página electrónica <http://www.climatehotmap.org/global-warming-locations/chacaltaya-glacier-bolivia.html>
- Universidad de Chile, Departamento de Geofísica. 2006. Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe final. Santiago de Chile. 63 pp.
- Vargas, A., Santos, A., Cárdenas, E., y Obregón, N. 2011. Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. *Dyna*, **78 (167)**: 151-159.
- Vázquez-Selem, L. and Heine, K. 2011. Late Quaternary Glaciation in Mexico. *Developments in Quaternary Science* **15**: 849-861.
- Villalobos, F. R. 1997. Estimación de la temperatura media mensual en localidades carentes de observaciones termométricas. *Meteorología y Oceanografía* **4 (2)**: 147-157.
- White, E. S. 2002. Glaciers of North America- Glaciers of México. US Geological Survey Professional Paper **1386-J-(3)**: 383-403.

Anexo A. Resumen de índices socioeconómicos

Municipio	Localidad	Actividad económica primaria	Población	Total viviendas	Grado escolar	Porcentaje de ingreso por habitante en salarios mínimos						Transporte público a la cabecera	Problemática local	Conflicto por tierras	Conflicto por religión	Grado de marginación
						Sin ingreso	Menos de 1	De 1 a 2	De 2 a 5	De 5 a 10	Más de 10					
Calchahuaco	Nuevo Jacal	Agricultura	50	12	2.72	41.67	28.57	11.9	15.48	0	2.38	No hay transporte	Falta de equipamiento o servicios para la educación	NO	NO	Muy Alto
calchahuaco	Nueva Vaquería	Agricultura	577	118	2.79	29.57	52.69	10.75	6.99	0	0	No hay transporte	Falta de empleo o emigración	NO	NO	Alto
Coscomatepec	Cuiyachapa	Cría de animales	3	1	*	37.18	39.92	15.34	7.35	0.21	0	Autobús	Falta de energía eléctrica	NO	NO	Alto
Coscomatepec	El Aserradero	Agricultura	2248	498	3.6	47.92	41.67	10.42	0	0	0	Micro, combi o camioneta	Falta de infraestructura o servicio de agua	NO	NO	Muy Alto
La Perla	Xometla	Agricultura	348	71	2.82	16.18	57.23	16.76	8.09	1.73	0	Autobús	Falta de infraestructura o servicio de agua	NO	NO	Muy Alto
La Perla	La Mata	Agricultura	129	27	2.97	16.13	80.65	3.23	0	0	0	No hay transporte	Falta de carretera o transporte	NO	NO	Muy Alto
La Perla	Potrero Nuevo	Agricultura	72	13	2.76	9.09	81.82	3.03	6.06	0	0	Autobús	Falta de energía eléctrica	NO	NO	Alto
a Perla	Agua Escondida	Agricultura	45	8	3.48	47.41	46.55	3.45	2.59	0	0	No hay transporte	Falta de empleo o emigración	NO	NO	Muy Alto
La Perla	El Minero	Agricultura	68	15	2.86	87.5	12.5	0	0	0	0	No hay transporte	Falta de carretera o transporte	SI	NO	Muy Alto
La Perla	Naranjillos	Agricultura	22	5	2.64	s/inf	s/inf	s/inf	s/inf	s/inf	s/inf	No hay transporte	Falta de equipamiento o servicios para la educación	NO	NO	Muy Alto
La Perla	La Paloma	Agricultura	175	37	3.71	25	62.5	12.5	0	0	0	No hay transporte	Falta de carretera o transporte	NO	NO	Muy Alto
La Perla	Papalotla	Agricultura	130	30	1.89	13.04	73.29	11.8	1.24	0	0.62	No hay transporte	Sequía, inundaciones o clima adverso	SI	NO	Alto
La Perla	Rancho Nuevo	Agricultura	458	96	2.92	67.27	27.27	1.82	3.64	0	0	No hay transporte	Falta de carretera o transporte	NO	NO	Muy Alto
La Perla	Rancho Viejo	Agricultura	681	162	3.07	70	0	30	0	0	0	Autobús	Falta de carretera o transporte	NO	NO	Muy Alto
La Perla	San Miguel Chinela	Agricultura	725	176	4.13	10	90	0	0	0	0	Autobús	Falta de empleo o emigración	NO	NO	Muy Alto
La Perla	La Coyotera	Agricultura	730	182	4.33	35	35	30	0	0	0	Autobús	Delincuencia o inseguridad	NO	NO	Muy Alto
La Perla	El Paso	Agricultura	218	55	3.08	24.07	50	18.52	3.7	0.93	2.78	Micro, combi o camioneta	Falta de drenaje y alcantarillado	NO	NO	Alto
La Perla	Galicia	Agricultura	425	87	4.65	80	20	0	0	0	0	Autobús	Falta de apoyo o deficiencia gubernamental	NO	NO	Alto
La Perla	El Comal	Agricultura	313	77	2.74	92.59	7.41	0	0	0	0	No hay transporte	Falta de carretera o transporte	NO	NO	Muy Alto
La Perla	San Miguel Pilancón	Agricultura	231	52	3.43	50	44.29	5.71	0	0	0	No hay transporte	Falta de infraestructura o servicio de agua	NO	NO	Alto
La Perla	Las Trincheras	Agricultura	76	11	2.94	42.86	50	0	7.14	0	0	No hay transporte	Falta de otros servicios o equipamiento	NO	NO	Muy Alto
Mariano Escobedo	La Cieneguilla	Agricultura	116	17	2.86	26.67	44.44	24.44	4.44	0	0	Autobús	Falta de infraestructura o servicio de agua	NO	NO	Muy Alto
Mariano Escobedo	San José Pilancón	Agricultura	832	215	2.81	36.59	51.22	7.32	3.66	1.22	0	Autobús	Falta de equipamiento o servicios de salud	NO	SI	Muy Alto
Mariano Escobedo	San Baltazar	Agricultura	203	39	2.33	47.56	39.02	12.2	1.22	0	0	No hay transporte	Falta de empleo o emigración	NO	NO	Alto
Mariano Escobedo	Agua Escondida	Agricultura	360	69	3.08	50	33.33	16.67	0	0	0	No hay transporte	Falta de carretera o transporte	SI	NO	Muy Alto
Totales/Promedios			9235	2073	3.11	41.8	44.55	10.24	2.98	0.17	0.24					