

Tendencias climáticas en la región Altos Norte de Jalisco

Como hemos señalado en capítulos anteriores, el clima desempeña un papel determinante en el ciclo sociohidrológico, en el tipo de vegetación existente y, como consecuencia, en la productividad de una región. La cantidad de lluvia que cae (precipitación) no es un indicador directo de la disponibilidad de agua, ya que, dependiendo de la temperatura y otros factores, como veremos más adelante, el agua podrá evaporarse y de esta manera integrarse al ciclo del agua, acumularse en lagos, correr por los ríos o filtrarse para recargar los flujos de agua subterránea.

En este capítulo presentamos un análisis del comportamiento histórico de cuatro variables: precipitación, temperatura, evapotranspiración y vegetación en los municipios de San Juan de los Lagos y Lagos de Moreno. Hemos agregado en el análisis al municipio de Unión de San Antonio, también perteneciente a la región Altos Norte de Jalisco, debido a que estos tres municipios cubren 90% del área de la subcuenca del río Lagos, cuyo cauce principal es el río del mismo nombre. Consideramos que esta es una elección técnica adecuada para mantener el análisis del continuo climático del área de estudio.

Asimismo, en el desarrollo del capítulo mostramos los distintos escenarios de cambio climático en la región al hacer una evaluación del posible impacto que estos cambios podrían tener para la zona. Adicionalmente, conjuntamos la información necesaria para evaluar la vulnerabilidad del territorio ante el proceso de desertificación y cómo esta vulnerabilidad amenaza también el principal medio de vida regional: la ganadería y la producción avícola.

CONDICIONES CLIMÁTICAS HISTÓRICAS EN LA REGIÓN ALTOS NORTE DE JALISCO

La relación entre precipitación y temperatura es determinante en la caracterización de una región, puesto que incidirá en las tasas de evapotranspiración, que a su vez definen las características de la vegetación que se presenta. Esta última también influye en la retención de humedad en el sistema. Es así como la precipitación, temperatura, evapotranspiración y vegetación están íntimamente relacionadas en el ciclo del agua que confiere a un sitio sus características biofísicas (véase la figura 8.1).

En la figura 8.1 se muestra el contraste entre dos sitios hipotéticos que cuentan con la misma temperatura promedio de 28 °C, pero que presentan diferencias en cuanto a cantidad de precipitación y tipo de vegetación.

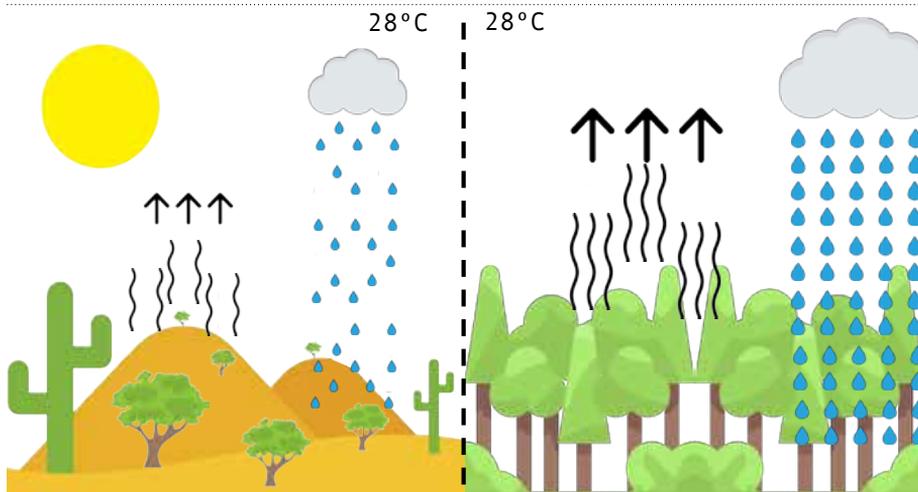
En el sitio de la izquierda la precipitación es baja y, por tanto, la evapotranspiración también es reducida, lo que genera un tipo de vegetación adaptada a condiciones de baja humedad y propia de los territorios semiáridos. En contraste, en el sitio de la derecha la precipitación es abundante y, por ende, también la evapotranspiración, dando como resultado una vegetación exuberante como la de las selvas tropicales. Este es un ciclo que se retroalimenta dependiendo de las lluvias y su intensidad, un factor que está relacionado tanto con fenómenos locales como globales.

En esta sección hablaremos de los datos climáticos y su relación con la vegetación de la región de los Altos Norte para lograr un mayor entendimiento de las condiciones biofísicas de la zona. Esta información servirá como preámbulo para entender los contenidos del capítulo siguiente, donde se abordan las relaciones de la zona con escenarios climáticos futuros.

Como punto de partida para conocer las condiciones biofísicas de la región Altos Norte, es necesario tener una referencia de las condiciones climáticas históricas de las zonas aledañas que se consideran áreas de influencia, así como de los cambios sufridos en la vegetación. Conocer las trayectorias históricas de la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la vegetación nos permite tener una idea de las tendencias de cambio observadas durante las últimas décadas y, por ende, de las transformaciones de los ecosistemas en la región.

Tanto para efectuar el análisis referente a los históricos climáticos como para establecer la segmentación de la región, se utilizaron sistemas de infor-

FIGURA 8.1 ESQUEMA DE LA RELACIÓN ENTRE TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN, EVAPOTRANSPIRACIÓN Y VEGETACIÓN



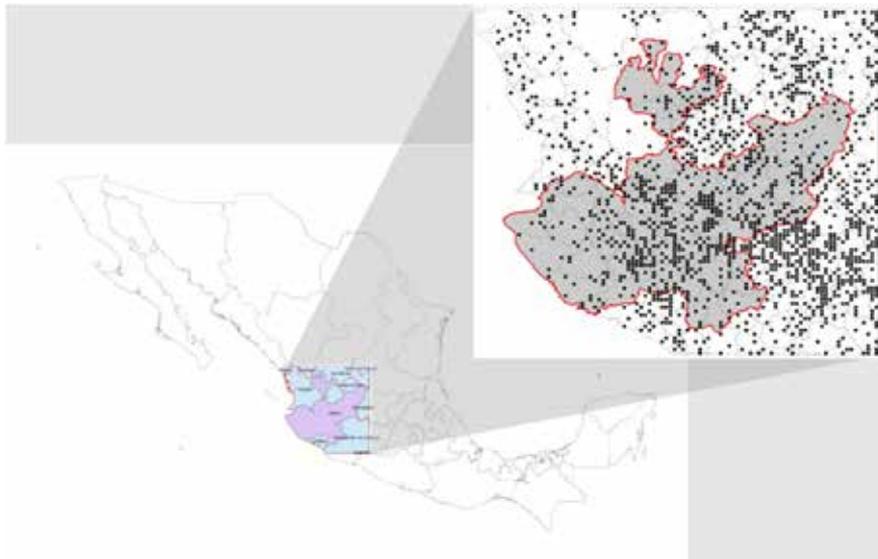
Fuente: elaborado por Ana Sofía Macías Ascanio.

mación geográfica (SIG) y sensores remotos proporcionados en el Portal de Geoinformación 2020 de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio, 2020), así como las bases de datos generadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi).

A continuación, explicamos la metodología empleada para construir las bases de datos históricos del clima. Para el geoprocésamiento de la información se requirió la construcción de material cartográfico, que se presenta a lo largo de este apartado. A partir de la división política estatal de la república mexicana, correspondiente a 2018 y con escala 1:250,000, se generó un polígono (véase la figura 8.2) que abarca el estado de Jalisco en su conjunto y algunos municipios de los estados colindantes: Aguascalientes, Colima, Durango, Guanajuato, Michoacán, Nayarit, Zacatecas y San Luis Potosí, que se consideran posibles zonas de influencia climática.

De cada uno de los puntos negros se obtuvieron datos de temperatura, precipitación, evapotranspiración y vegetación. La información se tomó en casi todos los municipios de Jalisco y en los municipios colindantes de los estados vecinos.

FIGURA 8.2 POLÍGONO SELECCIONADO PARA EL ESTUDIO CON LOS PUNTOS DE MUESTREO CLIMÁTICO EN MUNICIPIOS DE JALISCO Y ESTADOS COLINDANTES CON POSIBLE INFLUENCIA



Fuente: elaboración propia a partir del Portal de Geoinformación 2020 (Conabio, 2020).

Dentro del polígono, se generó una cuadrícula con celdas de 1 km² y se extrajeron las coordenadas de cada uno de los centroides (que es el punto central de cada celda de la cuadrícula). Posteriormente, de manera aleatoria se seleccionaron hasta cinco puntos de muestreo por municipio (siempre que estuvieran disponibles), con lo que se obtuvo un total de 1,536 puntos de submuestreo, que representan 20.7% del total de puntos (7,427) disponibles en el área del polígono seleccionado.

De cada uno de estos puntos se extrajeron los datos satelitales para las variables de clima (precipitación, temperatura, evapotranspiración) y de vegetación (NDVI o índice de vegetación de diferencia normalizada) (véase tabla 8.1). Los datos de precipitación y temperatura se obtuvieron desde 1981 hasta 2019, mientras que los datos de evapotranspiración se obtuvieron de 2000 a 2019 y los de NDVI de 2000 hasta 2014. El periodo de evaluación de cada variable está sujeto a los años en que se pudieron obtener datos y registros satelitales. Delimitamos las regiones para poder

TABLA 8.1 PERIODO Y FUENTE DE LOS DATOS CLIMÁTICOS Y DE VEGETACIÓN

Variable	Precipitación	Temperatura	Evapotranspiración	NDVI
Periodo	Enero de 1981 a julio de 2019	Enero de 1981 a enero de 2000 y febrero de 2000 a agosto de 2019	Enero de 2000 a agosto de 2014	Marzo de 2000 a diciembre de 2019
Satélite fuente de información	CHIRP	CHELSA NEO NASA	MODIS16	NEO NASA
Liga	https://bit.ly/3AGrxSj	https://chelsa-climate.org/ https://chelsa-climate.org/timeseries/ https://neo.gsfc.nasa.gov/	https://bit.ly/3T3xvmf	https://go.nasa.gov/47bhcdb

Fuente: elaboración propia con base en las fuentes referidas.

efectuar el análisis correspondiente de las variables climáticas, categorizándolas como áreas aledañas, municipios de Jalisco y municipios de la región Altos Norte.

En el estado de Jalisco, a excepción de tres municipios (Acatlán de Juárez, Techalutla de Montenegro y Tuxcueca) que se excluyen debido a que los puntos de muestreo no tenían datos asociados con el estudio, se consideran todos sus municipios (122), incorporados en 12 regiones que se describen a continuación. Asociadas a las localidades de Jalisco, elegimos también regiones de interés para el análisis de variables climáticas como sigue (entre paréntesis se menciona el número de municipios que conforman cada región que da soporte al estudio): Aguascalientes (10), Colima (10), Durango (2), Guanajuato (19), Michoacán (77), Nayarit (20), San Luis Potosí (9), Sinaloa (2) y Zacatecas (46). Por tanto, la suma de los municipios considerados en el estudio es de 317.

En términos generales, se espera que en los años con mayor precipitación la temperatura sea menor y en los de menos precipitación la temperatura sea mayor. La poca precipitación, por lo tanto, conlleva bajas tasas de evapotranspiración, lo cual a su vez se correlaciona con bajos porcentajes

de vegetación; estos porcentajes se miden con el NDVI. En los siguientes apartados, las figuras 8.3 a 8.6 muestran el resultado de un análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) de medidas repetidas, el cual se logra al comparar la variabilidad de los promedios anuales históricos en los territorios mencionados, en este caso de las variables precipitación, temperatura, evapotranspiración y NDVI.

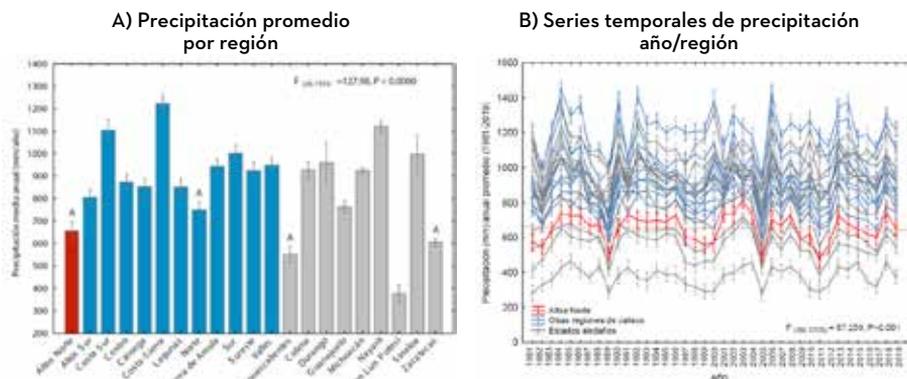
PRECIPITACIÓN HISTÓRICA DE ALTOS NORTE Y SUS REGIONES DE INFLUENCIA, 1981–2019

La precipitación media anual de la región Altos Norte se encuentra entre 600 y 700 mm, lo que significa que es la región donde llueve menos en todo el estado de Jalisco; a su vez, Costa Sierra y Costa Sur son las regiones con mayor precipitación del estado (promedio de 1,200 y 1,100 mm, respectivamente).

No obstante, la región de Altos Norte mantiene una similitud con los niveles de precipitación en algunos de los estados más áridos de referencia que se encuentran al norte: Aguascalientes y Zacatecas, con los cuales no se encuentran diferencias significativas. San Luis Potosí es el más seco de los estados incluidos en el polígono, con una precipitación media anual de 400 mm (véase la figura 8.3, A). Los niveles de precipitación observados en las regiones Altos Norte y Norte son más bien comparados con las regiones semidesérticas de los estados aledaños, lo cual nos habla de condiciones climáticas particulares dentro del estado, bajo las cuales el uso y gestión del agua deben ser un tema prioritario.

La figura 8.1, B, que se refiere a las series temporales de precipitación por región, demuestra que para el área de análisis los patrones de lluvia a través de los años son similares, aunque tengan un rango de diferencia pronunciado (entre 300 mm mínimo y más de 1,400 mm máximo). Para la región Altos Norte, y en general para el área de estudio, la cantidad de lluvia disminuyó significativamente durante los años 1989, 2005 y 2011 (hasta 800 mm); en cambio, los años que han tenido temporales más lluviosos fueron 1983 y 2003 (por debajo de 500 mm). Los incrementos y disminuciones en la precipitación parecen presentarse cada cierto tiempo y pudieran estar asociadas más bien a fenómenos meteorológicos globales, como ENSO (El Niño–Oscilación del Sur, por sus siglas en

FIGURA 8.3 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL HISTÓRICA EN ALTOS NORTE Y SUS REGIONES DE INFLUENCIA, 1981-2019



Claves de lectura: los datos correspondientes a la región Altos Norte se presentan en rojo, los relativos a otras regiones de Jalisco en azul y los que pertenecen a los estados aledaños en gris. Las regiones con letra A no presentan diferencias estadísticas con respecto al área de estudio. En las series temporales de precipitación por año/región, la línea de tendencia se muestra en rojo para la región Altos Norte.

En Jalisco, las regiones Norte y Altos Norte registran niveles de precipitación más bajos en comparación con otras áreas del estado, llegando a ser equiparables a los municipios colindantes de Zacatecas y Aguascalientes (identificados por la letra A). Aunque la cantidad de precipitación en la región Altos Norte varía cada año, fluctuando entre valores más bajos y más altos, permanece consistentemente por debajo de los niveles observados en otras regiones del estado. Durante el periodo comprendido entre 1981 y 2019, no se aprecia una tendencia discernible en los niveles de precipitación. Es plausible que se requiera un análisis de un periodo más extenso para identificar cambios en el clima.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de CHIRP.

inglés). Por el periodo de análisis (1981–2019), no se esperaría observar en el futuro próximo cambios significativos en los patrones de precipitación, ya que se necesitarían series de datos más extendidas para cotejar estos cambios.

En las siguientes figuras se presentan los resultados de ANOVA de medidas repetidas, donde A muestra las diferencias por región (en rojo la de Altos Norte, en azul las regiones de Jalisco aledañas a la zona de estudio y en gris las regiones aledañas que se encuentran en otros estados) y B muestra las tendencias a través del tiempo. Los estadísticos muestran el valor de F de Fisher, así como el grado de significancia representado por P. Las letras A indican que no hay diferencias significativas entre la región de estudio y las regiones señaladas con esta letra.

TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE ALTOS NORTE Y SUS REGIONES DE INFLUENCIA, 2000–2019

Las temperaturas medias anuales en la región Altos Norte (31.6 °C en promedio de 19 años), junto con las regiones Norte y Centro (30.6 °C y 31.3 °C, respectivamente), tienen el promedio más elevado para el estado de Jalisco. Cabe destacar que el municipio con las mayores temperaturas en el estado es Guadalajara (33.5 °C), seguido por Tonalá (32.6 °C).

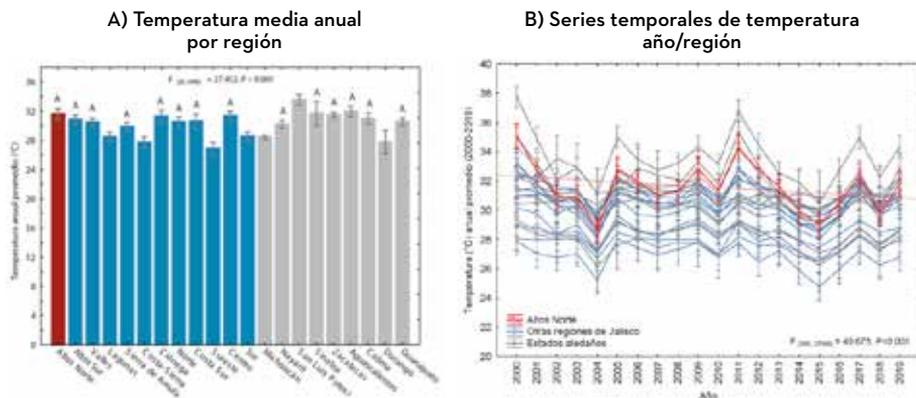
Los estados aledaños de referencia cuentan con temperaturas promedio anuales similares, con excepción de San Luis Potosí, cuyo promedio es mayor (33.6 °C), seguido por los estados de Michoacán y Durango. En lo que se refiere a las temperaturas, existe una tendencia similar para todas las regiones del estudio y se encuentran en un rango anual aproximado mínimo entre 17 °C y 43 °C máximo, llegando a temperaturas extremas de hasta 52.8 °C en el mes más cálido en el municipio de La Barca y 10.4 °C en el mes más frío en el municipio de Mezquital, Durango.

Para la región de Altos Norte, el rango de temperatura media anual estuvo entre los 27.6 °C y los 36.8 °C, es decir, en el rango superior de la temperatura media anual de todo el estado. El año más frío fue 2004, seguido por 2015 (28.3 °C promedio anual), mientras que los más cálidos fueron 2000 y 2011 (31.6 °C y 31.4 °C, respectivamente). La temperatura media anual de la región Altos Norte muestra cambios más pronunciados, hasta de 6 °C, que las demás zonas de Jalisco con diferencias entre años de 3 °C máximo. Las diferencias de temperatura entre los años más fríos y los más cálidos fue espacialmente marcada durante los periodos 2000–2004 y 2011–2015, pero la región mantiene valores históricos elevados en el sentido de que todas las regiones de Jalisco se encuentran por debajo de las temperaturas de la región Altos Norte (véase la figura 8.4, B).

TASAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN HISTÓRICAS EN ALTOS NORTE Y SUS REGIONES DE INFLUENCIA, 2000–2014

La evapotranspiración histórica de la región Altos Norte (391 mm/año) se mostró por debajo de la mayoría de las otras regiones de Jalisco (636.5 mm/año); solo guarda similitud con la región Norte, Centro y Altos Sur (490 mm/año). En relación con los otros estados, San Luis Potosí, Aguas-

FIGURA 8.4 TEMPERATURA MEDIA ANUAL HISTÓRICA EN ALTOS NORTE Y SUS REGIONES DE INFLUENCIA, 2000-2019



Claves de lectura: los datos correspondientes a la región Altos Norte se presentan en rojo, los relativos a otras regiones de Jalisco en azul y los que pertenecen a los estados aledaños en gris. Las regiones con letra A son las que fueron estadísticamente similares al área de estudio. En las series temporales de temperatura por año/región, la línea de tendencia se muestra en rojo para la región Altos Norte. Dentro del estado de Jalisco, vemos varias regiones que tienen temperatura promedio similar a la de la región Altos Norte (indicados por la letra A) y a varios municipios de los estados aledaños.

Aunque la temperatura varía entre los años evaluados, en general, la región Altos Norte tiende a tener temperaturas más altas que el resto de las regiones del estado y solo es superada por algunos estados colindantes, como San Luis Potosí.

Entre 2000 y 2019 se observa una leve tendencia a la baja en la temperatura de la región en estudio, sin embargo, se requiere analizar un periodo más extenso para estudiar esta tendencia de manera más precisa.

Fuente: elaboración propia a partir de datos satelitales de CHLSA y NEO NASA.

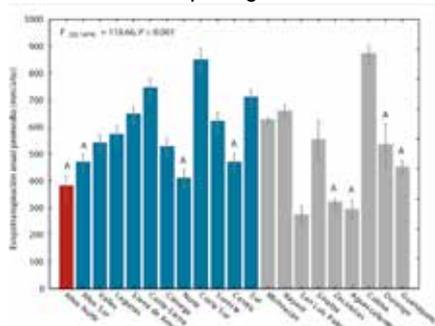
calientes y Zacatecas (326 mm/año en promedio) se encuentran por debajo de la evapotranspiración anual promedio de Altos Norte (véase la figura 8.5, A). En este caso no existen cambios tan abruptos, a excepción de 2011 que tuvo una disminución marcada (252 mm/año), y el año con mayor evapotranspiración fue 2004 (409 mm/año). La región Altos Norte se encuentra entre los valores más bajos de evapotranspiración (véase figura 8.5, B); esta zona es de baja precipitación. Las bajas tasas de evapotranspiración están asociadas también a baja precipitación y, en consecuencia, los índices de vegetación también suelen ser más bajos.

CAMBIOS HISTÓRICOS EN LA VEGETACIÓN DE ALTOS NORTE Y SUS REGIONES DE INFLUENCIA, 2000-2019

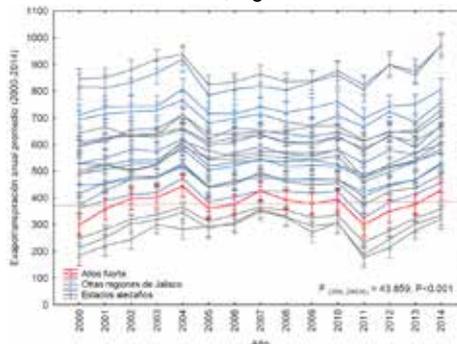
Los índices de vegetación analizados nos muestran que la región Altos Norte es la que menor NDVI tiene dentro del estado de Jalisco; en los

FIGURA 8.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL HISTÓRICA EN ALTOS NORTE Y SUS REGIONES DE INFLUENCIA, 2000-2014

A) Evapotranspiración media anual por región



B) Series temporales de evapotranspiración año/región



Claves de lectura: los datos correspondientes a la región Altos Norte se presentan en rojo, los relativos a otras regiones de Jalisco en azul y los que pertenecen a los estados aledaños en gris. Las regiones con letra A son las que fueron estadísticamente similares al área de estudio. En las series temporales de evapotranspiración por año/región, la línea de tendencia se muestra en rojo para la región Altos Norte.

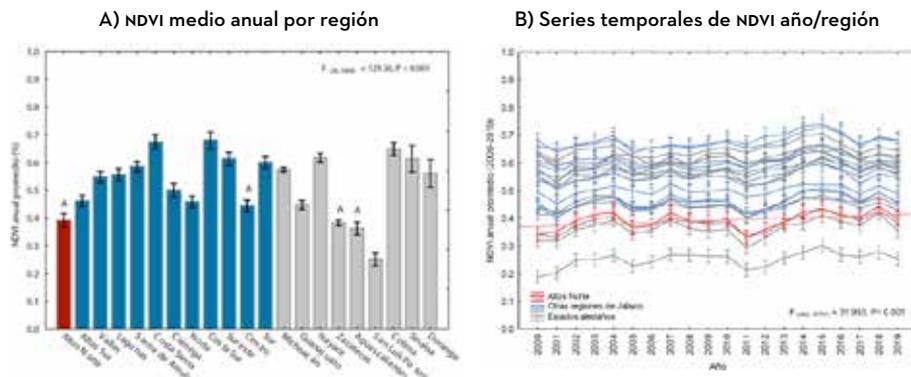
Dentro del estado de Jalisco, las regiones de Altos Norte, Norte y Centro son las que tienen los niveles de evapotranspiración más bajos (indicados por la letra A), junto con varios municipios de los estados aledaños, como Zacatecas, Aguascalientes, Durango y Guanajuato. La evapotranspiración varía entre los años evaluados, pero la región Altos Norte siempre tienen los valores más bajos del estado. Esto se explica por su baja precipitación, pero también por sus bajos niveles de vegetación.

Entre 2000 y 2014 no se observa una tendencia en la evapotranspiración de la región de estudio, pero es posible que se requiera analizar un periodo mayor para observar una tendencia de cambio.

Fuente: elaboración propia a partir de datos satelitales de MODIS16.

Altos Norte se presentan índices de vegetación promedios de 39%, mientras que el promedio general para Jalisco es de 53%. Las únicas dos regiones del estado que mantienen índices de vegetación estadísticamente similares son Altos Norte y Centro; cabe decir que la región Centro es la más urbanizada del estado. En relación con los estados de referencia, nuevamente son Aguascalientes, San Luis Potosí y Zacatecas los que mantienen valores menores con un promedio de 33% (véase la figura 8.6, A). Respecto a las series temporales, la tendencia general para todos los casos no presenta cambios abruptos o significativos en el periodo de análisis; sin embargo, si se considera únicamente la región Altos Norte, se observa un valor máximo durante 2018 (44%) y un mínimo durante 2011 (33%). En 2011 también se observó un alza en la temperatura, así como baja precipitación y evapotranspiración, lo cual es consistente con los valores bajos en la vegetación. En términos generales, identificamos que las condiciones climáticas de Altos Norte difieren de la mayoría de las regiones del estado y son más

FIGURA 8.6 NDVI MEDIO ANUAL HISTÓRICO EN ALTOS NORTE Y SUS REGIONES DE INFLUENCIA, 2000-2019



Claves de lectura: los datos correspondientes a la región Altos Norte se presentan en rojo, los relativos a otras regiones de Jalisco en azul y los que pertenecen a los estados aledaños en gris. Las regiones con letra A son las que fueron estadísticamente similares al área de estudio. En las series temporales de NDVI por año/región, la línea de tendencia se muestra en rojo para la región Altos Norte. Dentro del estado de Jalisco, las regiones de Altos Norte y Norte son las que tienen los índices de vegetación más bajos (indicados por la letra A) y similares a los municipios de los estados aledaños de Zacatecas y Aguascalientes. Los índices de vegetación varían poco entre los años evaluados, pero la región Altos Norte siempre tiene los valores más bajos del estado. Esto se puede explicar por el ecosistema de semidesierto, pero también por la extensión de uso de suelo agrícola y pecuario. Entre 2000 y 2019 no se observa una tendencia de cambio en los índices de vegetación, pero es posible que se requiera analizar un periodo mayor para observar una tendencia de cambio.

Fuente: elaboración propia a partir de datos satelitales de NEO NASA.

bien similares a las condiciones observadas en los estados aledaños del norte que son de tipo semidesérticas. Estas condiciones climáticas tienen un efecto directo en la vegetación, donde de igual manera observamos divergencia con otras regiones de Jalisco y convergencia con los estados del norte. En cuanto a las series temporales, no identificamos tendencias de cambio en ninguna de las variables para el periodo estudiado, pero sí identificamos patrones de cambio recurrentes en el clima local entre los años, los cuales pueden estar más bien asociados a fenómenos globales y tienen un efecto en las tasas de evapotranspiración y también en la vegetación.

EL CLIMA EN LA REGIÓN ALTOS NORTE

Para el propósito de este estudio, como ya se mencionó, hemos considerado tres municipios de los ocho que conforman la región Altos Norte: Lagos de Moreno, San Juan de los Lagos y Unión de San Antonio, dado que abarcan más de 90% del área de la subcuenca del río Lagos. Los otros

municipios de la región: Encarnación de Díaz, Ojuelos de Jalisco, San Diego de Alejandría, Teocaltiche y Villa Hidalgo, son tomados solo como referencia regional. Para analizar con mayor detalle las tendencias climáticas de la región Altos Norte, y específicamente de los tres municipios que conforman la subcuenca, se hicieron dos análisis de medidas repetidas, donde las variables dependientes fueron la precipitación anual (véase la figura 8.7) y la temperatura media anual (véase la figura 8.8), y la variable independiente fueron los municipios.

PRECIPITACIÓN (LLUVIA) HISTÓRICA EN LOS MUNICIPIOS DE LA REGIÓN ALTOS NORTE, 1981–2019

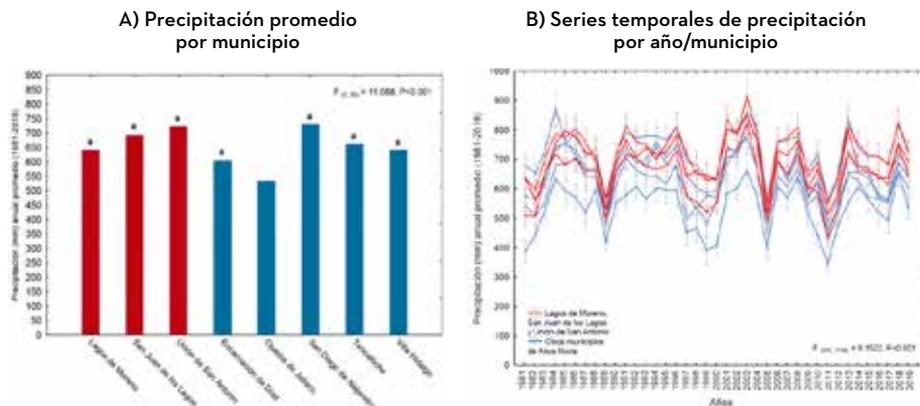
De los tres municipios del estudio, Unión de San Antonio tiene en promedio las lluvias más abundantes (740.7 mm/año), seguido de San Juan de los Lagos (708 mm/año) y, por último, el que tiene menos precipitación es Lagos de Moreno (659 mm/año). Entre los restantes, Ojuelos de Jalisco es el más seco (551 mm/año), mientras que San Diego de Alejandría es el más húmedo (748 mm/año), aunque la diferencia entre estos es pequeña debido a que se encuentran en el mismo territorio semiárido. Respecto a las series temporales de precipitación, los tres municipios de interés son en los que llueve más. Los años más secos fueron 1989, 2005 y 2011 (promedio de 515.8 mm/año), mientras que los más húmedos fueron 2001, 2003 y 2013 (812 mm/año).

En las siguientes figuras se presentan los resultados de ANOVA de medidas repetidas, donde A muestra las diferencias por municipio (en rojo los municipios estudiados y en azul el resto de los municipios de la región) y B muestra las tendencias a través del tiempo. Los estadísticos muestran el valor de F de Fisher, así como el grado de significancia representado por P. Las letras A indican que no hay diferencias significativas entre la región de estudio y las regiones señaladas con esta letra.

TEMPERATURA HISTÓRICA DE LA REGIÓN ALTOS NORTE, 2000–2019

Todos los municipios de la región Altos Norte muestran temperaturas medias anuales similares y por encima de los 30 °C. Dentro de los mu-

FIGURA 8.7 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL HISTÓRICA DE LOS MUNICIPIOS DE LA REGIÓN ALTOS NORTE, 1981-2019



Claves de lectura: se toman como referencia los municipios de Lagos de Moreno, San Juan de los Lagos y Unión de San Antonio (en color rojo), mientras que los demás municipios que componen la región se muestran en azul. A) Los municipios con letra A son las que fueron estadísticamente similares al área de estudio. B) El gráfico muestra las series temporales de precipitación para la región Altos Norte, desglosado en sus municipios.

Dentro de la región Altos Norte, los municipios estudiados (en color rojo) tienen una precipitación promedio similar al resto de los municipios de la región, con excepción de Ojuelos de Jalisco.

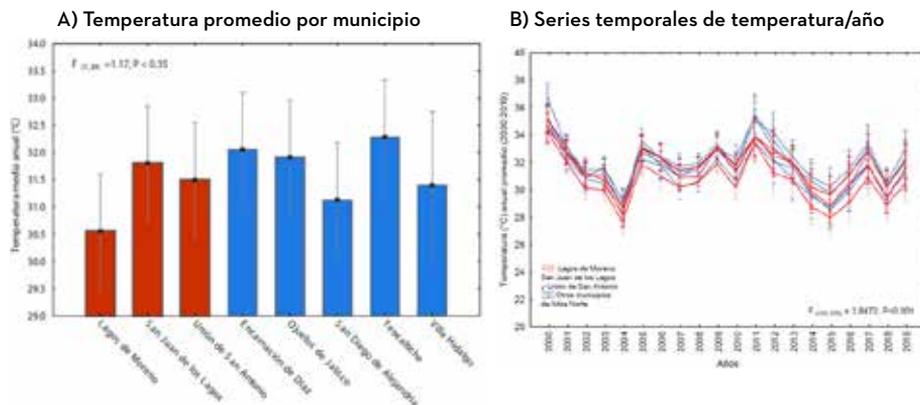
Observamos una variación muy grande en la precipitación entre los años estudiados que es constante en todos los municipios de la región.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de CHRIP.

municipios del área de estudio, Lagos de Moreno es el más fresco (30.6 °C) y San Juan de los Lagos más cálido (31.8 °C); de los otros municipios de la región, San Diego de Alejandría es más fresco (31.1 °C) y Teocaltiche más cálido (32.2 °C). En términos generales, el rango de variación de los promedios es muy pequeño, por lo que se asume que es poco significativo o que no hay cambios relevantes en la temperatura de toda la región Altos Norte. En relación con las series temporales, todos los municipios muestran tendencias similares; el año más fresco en los recientes años fue 2004 y 2015 (28.8 °C en promedio), y los más cálido 2000 y 2011 (34.7 °C en promedio). La evapotranspiración y vegetación tampoco presentaron diferencias significativas entre los municipios dentro del área de estudio ni en el tiempo, por lo tanto, no se presenta el análisis de varianza de medidas repetidas.

En la siguiente figura se muestran los resultados de ANOVA de medidas repetidas, donde A muestra las diferencias por municipio (en rojo los municipios estudiados y en azul el resto de los municipios de la región) y

FIGURA 8.8 TEMPERATURA MEDIA ANUAL HISTÓRICA DE LA REGIÓN ALTOS NORTE, 2000-2019



Claves de lectura: se toman como referencia los municipios de Lagos de Moreno, San Juan de los Lagos y Unión de San Antonio (en color rojo), mientras que los demás municipios que componen esta región se muestran en azul. A) variación de temperatura en los municipios que conforman la región Altos Norte. B) Series temporales de temperatura para la región Altos Norte, desglosado en sus municipios. Dentro de la región Altos Norte, no hay diferencias significativas en la temperatura promedio entre los municipios. Observamos una variación grande en la temperatura entre los años estudiados que es constante en todos los municipios de la región.

Fuente: elaboración propia a partir de datos satelitales de CHELSA y NEO NASA.

B muestra las tendencias a través del tiempo. Los estadísticos muestran el valor de F de Fisher, así como el grado de significancia representado por P.

Las tendencias históricas que existen entre la temperatura y la precipitación en esta región son consistentes; los años más secos tienden a ser más cálidos, mientras que en los años con mucha precipitación la temperatura suele ser menor. Esto queda en evidencia al tomar como referencia los años 2005 y 2011 (precipitación promedio de 536 mm y temperatura de 33.6 °C), que son los picos con clima más severo del periodo de tiempo en común y entre ambas variables analizadas. Este efecto influye directamente en las actividades económicas principales del área de estudio, que son la ganadería, la producción avícola y la agricultura. En las tres actividades principales hay un alza de demanda de agua, por lo que está demostrado que en años con pocas precipitaciones y temperaturas altas la producción de estas dos actividades baja significativamente, y en los años con abundantes precipitaciones y temperaturas bajas la producción es más alta. El aumento de temperaturas y la falta de agua hacen que el metabolismo tanto de plantas como de animales no funcione en óptimas condiciones,

lo que significa una disminución en el rendimiento, y genera un exceso de gasto calórico y menor ganancia de peso. Esto significa que la economía de la producción agropecuaria de la región será mejor o peor dependiendo del comportamiento de las condiciones climáticas (Curiel-Ballesteros et al., 2015). Es decir que las principales actividades económicas de la región son estrechamente dependientes de las condiciones climáticas, lo cual hace a la región altamente vulnerable ante el cambio climático.

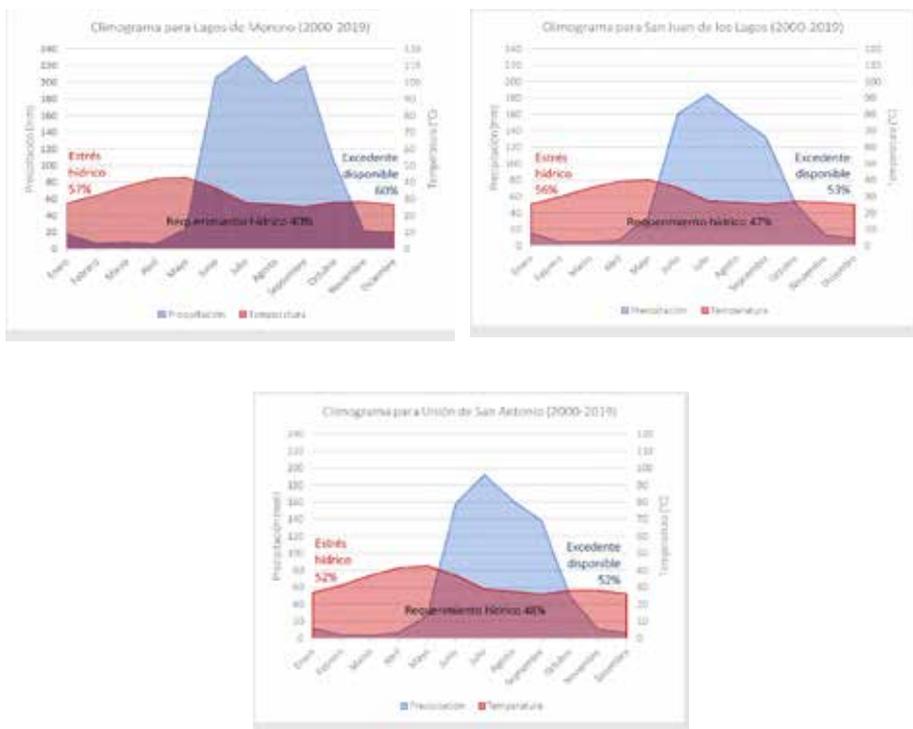
CLIMOGRAMAS DE SAN JUAN DE LOS LAGOS, LAGOS DE MORENO Y UNIÓN DE SAN ANTONIO

Los climogramas son herramientas visuales muy utilizadas en la meteorología para representar gráficamente las dos variables más significativas del clima: precipitación y temperatura, y establecen sus valores relacionados. Los datos que se reflejan en la figura 8.9 se recogieron de las estaciones meteorológicas y representan los valores medios de cada mes, para conocer la tendencia y para que los datos sean significativos.

Hay diferentes tipos de climogramas, no obstante, utilizamos el diagrama Walter-Lieth por considerarlo más completo, pues, además de representar los valores de temperatura y precipitaciones medias en una escala de 1:2 (es decir, que por cada unidad de temperatura hay el doble de precipitación), también arroja información de cuándo ocurren periodos de aridez, la duración y severidad del invierno, la posibilidad de ocurrencia de heladas, etcétera.

Estos diagramas son muy útiles para analizar la influencia del clima en la vegetación, especialmente en los usos agrícolas. Por ejemplo, en la figura 8.9 las zonas rojas corresponden a las temporadas del año que presentan un déficit de agua o estrés hídrico. Esto ocurre cuando la curva de las precipitaciones está por debajo de la curva de temperaturas, e indica que los requerimientos hídricos del sistema no están cubiertos, lo cual se manifiesta con suelos secos, vegetación sin hojas, entre otras. Las zonas azules corresponden a las temporadas donde hay un excedente de agua en el sistema y esta corre por los ríos o recarga los sistemas de flujo subterráneos. En estas temporadas es cuando los territorios semiáridos cambian su dependencia de las aguas subterráneas y hacen un aprovechamiento del agua superficial.

FIGURA 8.9 CLIMOGRAMAS CORRESPONDIENTES A LOS MUNICIPIOS DE INTERÉS EN LA REGIÓN ALTOS NORTE



Claves de lectura: el área azul representa la distribución de precipitación en el año, mientras que el área roja representa las temperaturas. Cada vez que la temperatura está por encima de la precipitación (sobresale el área roja), el sistema presenta estrés hídrico o falta de agua. Cuando, por el contrario, el área azul sobresale, el sistema tiene un excedente de agua que estará disponible en los ríos o para la recarga de acuíferos.

Dentro de los meses de noviembre y mayo los municipios de estudio tienen un fuerte estrés hídrico (zonas rojas), es decir, los territorios reciben menos agua de la que requiere el sistema. Esta condición nos habla de una característica importante de los semidesiertos.

Entre los meses de junio y octubre, los municipios reciben la mayor precipitación en el año.

Una vez que el agua satisface los requerimientos hídricos del sistema (zona morada), el agua que excede (zona azul) es la que finalmente corre por los ríos o se permea hacia las corrientes de agua subterránea

Para entender mejor las dinámicas del agua en los tres municipios que mayoritariamente abarcan la subcuenca del río Lagos en la región Altos Norte, hicimos climogramas considerando una temporalidad de 19 años (desde 2000 hasta 2019) (véase la figura 8.9), con la finalidad de visualizar el requerimiento hídrico, las temporadas de estrés y las que presentan excedente hídrico en cada uno de los municipios del estudio.

Los tres municipios estudiados tienen características similares relacionadas con el régimen de precipitación histórico; el mes en que más llueve es julio. A pesar de que todos tienen un requerimiento hídrico parecido, Lagos de Moreno presenta un porcentaje mayor de excedente hídrico disponible (60%), seguido de San Juan de los Lagos (53%) y Unión de San Antonio (52%). Siempre que el requerimiento hídrico no pueda ser cubierto por la disponibilidad de agua, tendremos un estrés hídrico.

El municipio con un mayor requerimiento hídrico (48%) es Unión de San Antonio, seguido de San Juan de los Lagos (47%) y, por último, Lagos de Moreno con el menor requerimiento hídrico (40%). A pesar de los resultados anteriores, Unión de San Antonio es el municipio con menor estrés hídrico (52%), seguido de San Juan de los Lagos (56%) y Lagos de Moreno (57%). Esto se explica porque el temporal de lluvias es de mayo a octubre, y durante los meses de estiaje, cuando el requerimiento hídrico es más grande que el nivel de las precipitaciones, se genera estrés hídrico en la región debido a que hay menos agua disponible de la necesaria.

Lo óptimo es que el estrés hídrico sea el mínimo posible en el territorio y que este periodo de tiempo no se alargue más de lo debido, pues, de lo contrario, pueden generarse problemas de sequía. En los tres municipios de nuestro estudio, el periodo de estrés hídrico se da por lo regular entre los meses de octubre a junio. La condición de estrés hídrico en los territorios, combinada con la alta demanda de agua de las actividades agropecuarias, explica el uso y sobredemanda de agua subterránea que, a largo plazo, cada vez tiene menor recarga. Esto hace que las condiciones para la producción sean cada vez más difíciles y vulnerables ante un escenario de desertificación.