



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

UMBRAL DE SEQUÍA EN EL DESIERTO SONORENSE:
RELACIÓN ENTRE RADIACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN.

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Ecología)

P r e s e n t a

Mayra Guadalupe Gaxiola Morales

Guaymas, Sonora, agosto de 2021.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 13 del Mes de Agosto del 2021, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"UMBRAL DE SEQUÍA EN EL DESIERTO SONORENSE: RELACIÓN ENTRE RADIACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN"

Presentada por el alumno:

Mayra Guadalupe Gaxiola Morales

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN Ecología

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

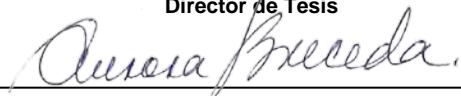
LA COMISIÓN REVISORA



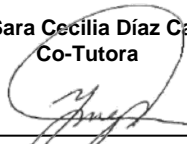
Dr. Luis Brito Castillo
Director de Tesis



Dra. Sara Cecilia Díaz Castro
Co-Tutora



Dra. Aurora Margarita Breceda Solís Cámara
Co-Tutora



Dra. Yolanda Lourdes Maya Delgado
Co-Tutora



Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho
Co-Tutor

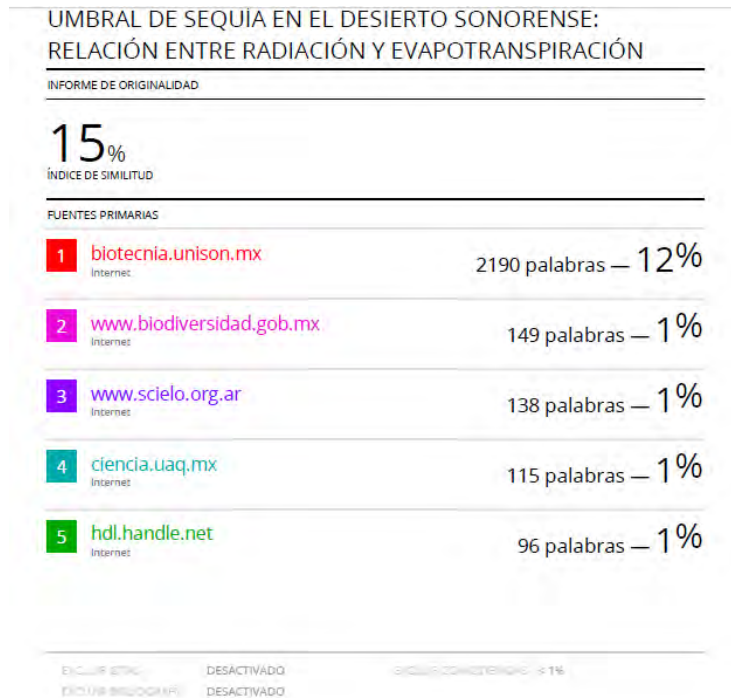


Dra. Gracia Aicicia Gómez Anduro
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos

La Paz, Baja California Sur, a 16 de agosto de 2021.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante **Mayra Guadalupe Gaxiola Morales** del Programa de **Doctorado en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales**, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el VoBo dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:
iThenticate
- Filtros utilizados:
Incluir citas, bibliografía
Excluir coincidencias <1%
- Porcentajes de similitud:
15%
Se muestra captura de pantalla



Firmas del comité



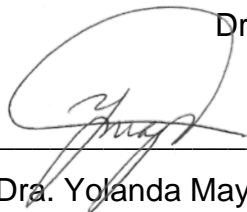
Dr. Luis Brito



Dra. Sara Díaz



Dra. Aurora Breceda



Dra. Yolanda Maya



Dr. Oscar Gutiérrez



Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. Luis Brito Castillo
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Director de Tesis

Dra. Sara Cecilia Díaz Castro
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Co-Tutora de Tesis

Dra. Aurora Margarita Breceda Solís Cámara
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Co-Tutora de Tesis

Dra. Yolanda Lourdes Maya Delgado
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutora de Tesis

Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho
Universidad Estatal de Sonora
Co-Tutor de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. Luis Brito Castillo
Dra. Sara Cecilia Díaz Castro
Dra. Aurora Margarita Breceda Solís Cámara
Dra. Yolanda Lourdes Maya Delgado
Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho

Jurado de Examen

Dr. Luis Brito Castillo
Dra. Sara Cecilia Díaz Castro
Dra. Aurora Margarita Breceda Solís Cámara
Dra. Yolanda Lourdes Maya Delgado
Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho

Suplentes

Dr. Javier Caraveo Patiño
Dr. Jorge Eduardo Chávez Villalba

Resumen

La sequía es un fenómeno anómalo que se caracteriza por déficits en la precipitación durante un periodo extendido. La temperatura superficial, que es modulada por al menos tres factores: la rugosidad del terreno, la radiación y la evapotranspiración, está asociada a la ocurrencia de sequías. El factor de radiación implica que, al incrementarse el albedo, la radiación absorbida por la superficie disminuye, enfriándola, resultando en una relación inversa albedo-temperatura. Esta relación es válida sólo en desiertos con valores altos de albedo y poca vegetación como ocurre en el Desierto Sonorense. El factor de evapotranspiración involucra a la vegetación. En el proceso de deshidratación de la vegetación la superficie se vuelve menos opaca y con valores cada vez más altos de albedo; al irse deshidratando la vegetación absorbe cada vez menos radiación y ésta pasa directamente a la superficie, calentándola. Por lo tanto, el factor de evapotranspiración implica una relación directa albedo-temperatura. Utilizando valores calibrados mensuales de imágenes de satélite de albedo, temperatura superficial y el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), para el periodo febrero/2000-febrero/2018, con resolución espacial de $0.05 \times 0.05^\circ$ (~ 5.6 km) en cinco cuadrantes de $1^\circ \times 1^\circ$ cada uno, se analizaron a detalle las relaciones albedo-temperatura superficial en el Desierto Sonorense. Las relaciones encontradas entre albedo-temperatura superficial y valores sobrepuestos de NDVI ayudaron a esclarecer la respuesta no lineal de la vegetación, y elucidar los valores umbrales de NDVI, representativos del límite en el que la vegetación muestra condiciones hacia una deshidratación severa. Se encontró que valores umbrales de NDVI de <0.10 son típicos de las zonas más áridas de los cuadrantes situados en el centro de Baja California y en el sitio del Patrimonio de la UNESCO El Pinacate y Gran Desierto de Altar (cuadrante 2 y 5 respectivamente). Las zonas más húmedas, en el sur y en el centro de la península de Baja California, y en la llanura costera de Sonora, experimentan valores umbrales de NDVI de <0.15 (cuadrantes 1, 3 y 4, respectivamente). El ciclo anual de las series de albedo, temperatura superficial, NDVI y precipitación revelaron que los periodos más propensos a condiciones climáticas desérticas (es decir, más cálidas y secas) son para el mes de junio en los cuadrantes 1, 2, 4 y 5, y en noviembre-febrero en cuadrante 3. Los resultados de esta investigación pueden ser de interés para los responsables de toma de decisiones aplicados al monitoreo de la sequía, además de ser útiles para el desarrollo de mejores prácticas de gestión y conservación de los recursos en el Desierto Sonorense.

Palabras clave: Albedo; Temperatura Superficial; NDVI; Valor umbral.

ORCID: 0000-0003-0335-3787



Vo.Bo. Dr. Luis Brito Castillo
Director de Tesis

Summary

Drought is an anomalous phenomenon characterized by deficits in precipitation over an extended period. Surface temperature, which is modulated by at least three factors: terrain roughness, radiation and evapotranspiration, is associated with the occurrence of drought. The radiation factor implies that as albedo increases, the radiation absorbed by the surface decreases, thus cooling the surface and resulting in an inverse albedo-temperature relationship. The radiation factor is valid only in deserts with high albedo values and few vegetation, as is the case in the Sonoran Desert. The evapotranspiration factor is related to vegetation. In the process of dehydration, the surface becomes less opaque with increasingly higher albedo values; in this case the vegetation absorbs less and less radiation and consequently the radiation passes directly to the surface, heating it. Therefore, the evapotranspiration factor implies a direct albedo-temperature relationship. Using monthly calibrated satellite image values of albedo, surface temperature and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), for the period February/2000-February/2018, with spatial resolution of $0.05 \times 0.05^\circ$ (~5.6 km) in five squares of $1^\circ \times 1^\circ$ each, the albedo-surface temperature relationships in the Sonoran Desert were analyzed in detail. The relationships found between albedo and surface temperature, and overlapping NDVI values, helped elucidate the nonlinear response of vegetation, and to determine threshold NDVI values, representative of the limit at which vegetation shows severe dehydration conditions. Threshold NDVI values of <0.10 were found in the driest areas of the squares located in central Baja California and in the UNESCO World Heritage site El Pinacate and Gran Desierto de Altar (squares 2 and 5, respectively). The wettest areas, in the south and center of the Baja California peninsula, and on the Sonoran coast, experienced NDVI threshold values of <0.15 (squares one, three and four, respectively). The annual cycle of albedo, surface temperature, NDVI, and precipitation series revealed that the periods with increasing drought conditions (i.e., warmer and drier) correspond to June in squares 1, 2, 4 and 5, and to November-February in square 3. The results of this research could be of interest to decision-makers concerned with drought monitoring, and for the development of improved management and conservation practices in the Sonoran Desert.

Key words: Albedo; Surface temperature; NDVI; Threshold value.

ORCID: 0000-0003-0335-3787



Vo.Bo. Dr. Luis Brito Castillo
Director de Tesis

Dedicatoria

*En memoria de quienes se adelantaron en el camino,
pero sus recuerdos permanecen en nosotros.*

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste por la oportunidad y apoyo en mi formación académica, durante el tiempo requerido para la realización de este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante mis estudios de doctorado (Becaria No. 300458).

A la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) de CONACyT por el financiamiento otorgado para la realización de la investigación (Registro 254533).

A mi Director de Tesis, Dr. Luis Brito Castillo por su apoyo, disponibilidad y consejos a lo largo de estos años de preparación académica.

A los miembros de mi Comité Tutorial, Dra. Sara Cecilia Díaz Castro, Dra. Aurora Nargarita Breceda Solís Cámara, Dra. Yolanda Lourdes Maya Delgado, Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho, por los incesantes ánimos, su disponibilidad e incondicional apoyo, por su valiosa ayuda y sugerencias para la realización de esta tesis, por su cariño y amistad... ¡gracias por no dejar de creer en mí!

Al Laboratorio de Modelación Espacial y Sensores Remotos, por el apoyo en el procesamiento de datos, en especial al Ing. Julio Egrén Félix Domínguez.

Al Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de CIBNOR, por el apoyo y capacitación otorgada, en especial al Ing. Joaquín Rivera Rosas y al Ing. Gil Ezequiel Ceseña Beltrán.

Al personal de Posgrado: Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro, Lic. Osvelia Ibarra Morales, Lic. Leticia González Rubio, Lic. Claudia Olachea León, Adriana Franzoni García, Tania Verónica Núñez Valdez, por todas sus atenciones y disposición ante cualquier inquietud o trámite.

Al personal de Laboratorio de Cómputo y Biblioteca, Lic. Horacio Sandoval Gómez, Ing. Xicohténcatl Galicia García, Lic. Ana María Talamantes Cota, Lic. María Esther Ojeda Castro, gracias a cada uno de ustedes por su apoyo.

A todo el personal técnico, administrativo e investigación de CIBNOR Unidad Guaymas, que de alguna manera fueron parte de mi formación, especialmente a la M. en C. María Sara Burrola

Sánchez, al M. en C. Edgar Alcántara Razo y Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga, quienes siempre me brindaron su apoyo, aliento y valiosos consejos... siempre estaré agradecida con ustedes.

A mis compañeros de vida, mi pequeña familia, Alexander Emmanuel y Erick Efrén, que fueron una pieza importante de motivación para superarme, para convertirme en una mejor persona, a demostrarme a mí misma que mis aspiraciones se pueden cumplir y que con apoyo, amor, esfuerzo y dedicación lo pudimos lograr.

A mis Padres que en cada paso me han brindado su apoyo y grandes consejos para jamás rendirme, gracias infinitas porque sin ustedes no habría llegado a donde estoy el día de hoy. Gracias por ser ese refugio donde descansar y tomar aliento para seguir adelante... mil gracias.

A mis familiares y amistades, que permanecieron alentándome durante esos años de estudio; a ustedes que estuvieron pendientes de todo lo que pasaba durante mis estudios y escuchaban las largas charlas de mi tema de tesis.

A todos mis compañeros de posgrado, gracias por los miércoles de risoterapia que hicieron más llevadera la vida en posgrado.

Contenido

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
Abreviaturas	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
3. JUSTIFICACIÓN	10
4. HIPÓTESIS	11
5. OBJETIVOS	12
5.1 Objetivo general	12
5.2 Objetivos particulares	12
6. MATERIALES Y MÉTODOS	13
6.1 Área de estudio	13
6.2 Selección de cuadrantes	16
6.3 Preparación y procesamiento de datos	18
6.4 Estimación de regresión no lineal entre albedo–temperatura	20
6.5 Modelo de regresión entre albedo y temperatura, por tipo de vegetación y tipo de suelo	21
7. RESULTADOS	22
7.1 Caracterización de cuadrantes	22
7.1.1 Cuadrante 1 (C1)	22
7.1.2 Cuadrantes 2 (C2) y 3 (C3)	22
7.1.3 Cuadrante 4 (C4)	23
7.1.4 Cuadrante 5 (C5)	23
7.2 Ciclo intra-anual de variables	24
7.3 Modelo de regresión no lineal entre albedo y temperatura	26
7.3.1 C1	26
7.3.2 C2	29
7.3.3 C3	31
7.3.4 C4	34
7.3.5 C5	37
7.4 Gradientes identificados	41
7.5 Modelo de regresión entre albedo y temperatura, por tipo de vegetación y tipo de suelo	42
8. DISCUSIÓN	45
9. CONCLUSIONES	51
10. LITERATURA CITADA	53
11. ANEXOS	59

Anexo A.-Artículo Publicado.-Análisis de los factores de radiación- <i>evapotranspiración</i> en el Desierto Sonorense.	59
Anexo B.-Artículo Sometido.-Characterizing enhanced desert conditions in the Sonoran Desert through the analysis of surface temperature modulating factors.	68

Lista de figuras

- Figura 1.** Relación entre la temperatura superficial y el albedo en el Desierto Sonorense (30-31°N; 112-113°W): (a) para el mes de junio y (b) para el mes de agosto. Los puntos indican valores promedio de AVHRR NDVI en el periodo 1984-95 en una malla de 16 km × 16 km (Fuente: Tereschenko *et al.*, 2012).9
- Figura 2.** Ubicación del Desierto Sonorense. El área sombreada representa los límites del Desierto Sonorense (Shreve y Wiggins, 1964).13
- Figura 3.** Climatología diaria de precipitación de algunas estaciones localizadas en el Desierto Sonorense y que contienen registros con más de 40 años. Se muestra en cada caso la clave de la estación y el número de años con que se realizó el cálculo (tomada de Gaxiola-Morales y Brito-Castillo, 2019).15
- Figura 4.** Ubicación de los cuadrantes de estudio. C1-C5 son los cuadrantes seleccionados. Fuera del mapa, las zonas oscuras muestran el número de píxeles (N) filtrados en cada cuadrante una vez removidos los píxeles localizados en mar, zonas agrícolas y urbanas (identificados en color blanco).19
- Figura 5.** Fotografías del terreno en cada uno de los cuadrantes seleccionados. a) Cuadrante 1, La Paz, Baja California Sur. Carretera Federal México 1, La Paz-San Juan de la Costa; b) Cuadrante 2, Mulegú, Baja California Sur. Carretera Federal México 1, Santa Rosalía-Guerrero Negro; c) Cuadrante 3, Mulegú, Baja California Sur. Carretera Federal México 1, Carretera Transpeninsular; d) Cuadrante 4, Sonora, México. Carretera N° 37, Caborca, Sonora; e) Cuadrante 5, Puerto Peñasco, Sonora, México. Carretera Federal 2, San Luis Río Colorado-Sonoyta, Sonora. Fuente: Google Earth Pro (2020).24
- Figura 6.** Ciclo intra-anual de variables. a) Albedo; (b) temperatura superficial; (c) NDVI; (d) precipitación. Las barras grises en c, d corresponden a los picos mensuales de NDVI y precipitación para la mayoría de las áreas.25
- Figura 7.** Relación mensual entre albedo y temperatura superficial en cuadrante 1 (C1). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.28
- Figura 8.** Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 1 (C1) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.29
- Figura 9.** Relación mensual albedo–temperatura superficial en cuadrante 2 (C2). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.30
- Figura 10.** Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 2 (C2) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.31
- Figura 11.** Relación mensual albedo–temperatura superficial en cuadrante 3 (C3). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.33
- Figura 12.** Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 3 (C3) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las

elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.....	34
Figura 13. Relación mensual albedo–temperatura superficial en cuadrante 4 (C4). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.....	36
Figura 14. Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 4 (C4) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.....	37
Figura 15. Relación mensual albedo–temperatura superficial en cuadrante 5 (C5). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.....	39
Figura 17. Gradientes identificados al interior de los cuadrantes de estudio.....	41
Figura 18. Relaciones entre albedo y temperatura en áreas de matorral sarcocaule y matorral desértico en C1, C3 y C4.....	43
Figura 19. Relaciones entre albedo y temperatura en suelos tipo Regosol calcárico, Regosol eútrico y Vertisol crómico en C1 y C3.	44

Lista de tablas

Tabla 1. Número de píxeles en C1-C5 por tipo de vegetación y de suelo.	17
Tabla 2. Resultados de análisis de varianza (ANOVA) de las variables albedo, temperatura superficial y NDVI en zonas localizadas al interior de los cuadrantes de estudio.	42

Abreviaturas

° C	Grados Celcius
ALB	Albedo
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas)
Ts	Temperatura superficial

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno anómalo que se caracteriza por déficits en la precipitación durante un periodo extendido, que se presenta de manera irregular a través del tiempo y el espacio (Esquivel, 2002; Ramírez y Brenes, 2002). En zonas áridas la sequía es una de sus mayores amenazas debido a la escasez de humedad, cuyos efectos han sido clasificados de severos a extremadamente severos (Ivanova y Gámez, 2012). A la ocurrencia de las sequías se asocian factores climáticos como la temperatura superficial cuyas manifestaciones extremas provocan desestabilización del balance energético terrestre, que pueden alterar los patrones de precipitación incidiendo negativamente en la disponibilidad de agua y aumentando la ocurrencia de sequías (Del Toro-Guerrero y Kretzschmar, 2020). La temperatura superficial, por su parte, es modulada por al menos tres factores: la rugosidad del terreno, la radiación y la evapotranspiración (Magaña, 2004).

La rugosidad del terreno incrementa la turbulencia en las capas bajas de la atmósfera; al ocurrir esto se produce una mezcla del aire circundante que modifica la relación entre calor sensible y calor latente afectando la temperatura superficial, que a su vez influye en el desarrollo de tormentas y circulación atmosférica (Marrero, 2011).

El factor de radiación implica que conforme aumenta el albedo (fracción de la energía solar entrante que es reflejada por la Tierra de vuelta al espacio sin cambio en sus propiedades electromagnéticas), la radiación de onda corta absorbida por la superficie disminuye, lo que provoca un enfriamiento de la superficie. Según la teoría, entre más clara y amplia sea una superficie, esta absorbe menos radiación, se incrementa el albedo y consecuentemente se produce enfriamiento; esto resulta en una relación inversa entre el albedo y la temperatura superficial en áreas que son claras (Otterman, 1974; Charney, 1975).

El factor de evapotranspiración tiene que ver con los componentes de balance de energía a nivel local cuando se reduce la vegetación (ya sea por procesos naturales o inducidos). Una superficie con vegetación verde y turgente es más opaca que una con vegetación seca y, por tanto, tiene valores más bajos de albedo y temperaturas más frescas. Esto sucede porque las

plantas verdes absorben calor en forma de onda corta para realizar su proceso de fotosíntesis y a la vez producir transpiración. Por el contrario, cuando la vegetación comienza a secarse por falta de humedad, ésta se torna gradualmente en tonalidades claras incrementando el albedo.

El calor que antes era utilizado por la planta para transpirar ya no se utiliza más y ahora llega directamente a la superficie calentándola. Por tanto, conforme la vegetación pierde humedad, tanto el albedo como la temperatura se incrementan (el calor hace que aumente la temperatura en la superficie y atmosfera circundante) manteniendo una relación directa temperatura-albedo (Vivoni *et al.*, 2008).

Uno de los índices utilizados para analizar el estado de la vegetación es el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI por sus siglas en inglés), que además ha resultado muy útil en calidad de indicador para dar seguimiento a las sequías, monitorear su desarrollo y cobertura (Peters *et al.*, 2002; Gu *et al.*, 2007; Karnieli *et al.*, 2010; Millano y Paredes, 2016; Nanzad *et al.*, 2019). Tereshchenko *et al.*, (2012) proponen una alternativa para monitorear la sequía utilizando valores de NDVI, albedo y temperatura superficial y el análisis de dos factores que modulan la temperatura superficial: 1) el factor de radiación y 2) el factor de evapotranspiración; en su estudio, el cambio de pendiente en la línea de regresión entre albedo y temperatura superficial, a la que se sobreponen los valores de NDVI, se pudo detectar que ocurre a partir de un valor umbral de NDVI de 0.08 ± 0.01 . Esto significa que cuando la relación entre albedo y la temperatura superficial pasa de ser creciente a decreciente la vegetación alcanza su punto máximo de estrés justo en el cambio de pendiente de la línea de regresión que coincide con el valor umbral de NDVI. Por lo tanto, el valor umbral identificado puede servir de base para el monitoreo de la sequía. Cuando la línea de regresión entre el albedo y la temperatura superficial es creciente, significa que el factor que modula temperatura superficial es el de evapotranspiración (Tereshchenko *et al.*, 2012). Por el contrario, cuando la relación es decreciente, el factor que modula la temperatura superficial es el de radiación.

Los resultados obtenidos por Tereshchenko *et al.* (2012) se obtuvieron en uno de los sectores más áridos del Desierto Sonorense. Debido a la gran diversidad de condiciones (de suelo, de

vegetación, de lluvia) que se observan en todo el territorio de este desierto, es razonable investigar si los resultados obtenidos por estos autores son representativos de todo el Desierto Sonorense, o bien, dependiendo del escenario ecológico de cada región del desierto, son distintos los valores umbrales de NDVI en las relaciones albedo–temperatura superficial.

2. ANTECEDENTES

La sequía no cubre una dirección fija más bien se extiende de manera irregular a través del tiempo y el espacio (Ramírez y Brenes, 2002). Por su impacto se distinguen cuatro tipos de sequía: la meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica (Keyantash y Dracup, 2002). La sequía meteorológica se presenta cuando la precipitación es muy inferior a la esperada por un largo período. Esta clase de sequía conduce a la aparición de los otros tipos de sequía. La sequía hidrológica, por ejemplo, ocurre cuando hay un déficit continuo en las escorrentías alcanzando un nivel inferior a las condiciones normales y/o cuando disminuye el nivel de las aguas subterráneas provocando problemas de abastecimiento de agua. Se dice que se presenta una sequía agrícola cuando se combinan la disminución en la cantidad de precipitación y su cobertura, en las reservas de agua del suelo y un aumento en las pérdidas debidas a la evaporación, causando disminución considerable de los rendimientos de cultivos y la productividad del ganado por deterioro de las pasturas. La sequía socioeconómica es consecuencia de la ocurrencia de alguno de los tipos de sequías anteriores, razón por la cual es posible expresar el grado de severidad de la sequía en términos de sus impactos sociales y económicos (Ravelo *et al.*, 2014).

La sequía se presenta en gran parte del mundo cada vez con mayor frecuencia (UNESCO, 1979); históricamente se ha comprobado que es el fenómeno que mayor daño económico causa (Cody *et al.*, 1998), por ende, identificar anticipadamente el fenómeno de la sequía con fines de mitigación es de interés mundial. Algunos periodos intensos de sequías ocurrieron hace cientos de años (Stahle *et al.*, 2016), en épocas donde no se usaban instrumentos para medir las características del clima como la temperatura o la precipitación. Sin embargo, eso ha motivado a los científicos para estudiarlas a detalle (Castillo, 2014). En épocas recientes, México ha padecido sequías extremas de gran magnitud y extensión (Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2016), como las ocurridas en el periodo 1998-2004 y la de 2011-2012. Esta última, considerada como la más severa de las últimas décadas y está asociada a las enormes pérdidas en la agricultura, ganadería y economías locales de los estados del Norte de México que fueron afectados, sus consecuencias particulares para las regiones agrícolas de temporal del Altiplano (Vega-Camarena *et al.*, 2018).

En un esfuerzo conjunto por monitorear la sequía mediante la aplicación de diversos índices (Índice de Precipitación Estandarizado, Índice de Sequía por Escurrimiento, entre otros), especialistas de México, Estados Unidos y Canadá se unieron en abril de 2002 para crear el Monitor de Sequía de Norteamérica (NADM, 1999, por sus siglas en inglés), cuyos antecedentes están basados en el exitoso Monitor de Sequía de Estados Unidos (Lawrimore *et al.*, 2002, USDM, por sus siglas en inglés). Recientemente, en junio de 2017, el Instituto de Geofísica de la UNAM propuso el nuevo Monitor de Sequía Multivariado en México (Mosemm, 2017) (Agencia Informativa CONACyT, 2017), para monitorear la intensidad y magnitud de una sequía.

Por otro lado, existen alternativas para el estudio de la sequía, como la propuesta por Otterman (1974) y Charney (1975), basada en el mecanismo térmico de mesoescala, la cual sugiere que, en condiciones de elevada carga antrópica, el incremento de la radiación reflejada desde la Tierra hacia la atmósfera, provoca enfriamiento en la superficie ya que se absorbe menos radiación solar. Esta condición a su vez causa que la convección se debilite y a nivel de mesoescala, se reduzca la formación de nubes y la caída de precipitación, acentuando las condiciones de sequía. En esas condiciones se observa una relación inversa entre el albedo y las precipitaciones. Esta relación es conocida como la hipótesis del albedo (Otterman, 1974). Esta hipótesis se planteó para explicar las diferencias de temperaturas observadas entre la península del Sinaí, que vista desde el espacio muestra superficies claras (i.e. valores mayores de albedo), y el noroeste de Negev, con vegetación degradada y superficies oscuras (valores menores de albedo). Las mediciones de temperatura realizadas a finales de agosto de 1973 mostraron una diferencia de 5 °C entre estas dos regiones (40 °C en la península del Sinaí con superficies claras, y 45 °C en el desierto del Negev con superficies oscuras). Para finales de febrero de 1974, se volvió a corroborar la diferencia, pero ahora las mediciones efectuadas mostraron en promedio aproximadamente 30 °C en el lado claro y 33.5 °C en el lado oscuro.

Posteriormente, se verificó que la hipótesis del albedo solamente es válida en los desiertos donde hay poca vegetación y valores muy altos de albedo (que son características típicas del Desierto Sonorense); pero han surgido interrogantes sobre la regulación de la temperatura en áreas que cuentan con vegetación abundante y variada, es decir, se desconoce cómo cambia la

relación albedo–temperatura superficial en áreas donde aumenta la vegetación. Como ya se mencionó anteriormente, se conoce que la temperatura superficial está modulada por al menos dos factores que intervienen en el proceso: el factor de radiación y el factor de evapotranspiración (Tereshchenko *et al.*, 2012).

El factor de radiación se basa en la teoría de que cuando una superficie es clara y amplia, se absorbe menos radiación, pues sus valores de albedo son altos. Esta condición provoca enfriamiento de la superficie; es decir *valores altos de albedo indican menor temperatura superficial* en áreas que son claras. Por su parte, el factor de evapotranspiración tiene que ver con los componentes de balance de energía a nivel local: cuando se reduce la vegetación, sea por falta de precipitación o por acción del hombre, se incrementa el albedo, ya que la superficie se vuelve menos opaca. Una planta que experimenta estrés hídrico por falta de humedad, disminuye su transpiración pues deja de absorber radiación solar que es útil para la fotosíntesis. Entonces, la radiación que ya no es utilizada por la planta pasa directamente a la superficie calentándola; en este caso, *valores altos de albedo indican mayor temperatura superficial* en áreas donde la vegetación disminuye a raíz del estrés hídrico. El efecto contrario también ocurre, es decir, al incrementarse la precipitación hay un incremento de la vegetación y una disminución del albedo, ya que la superficie se vuelve más opaca reduciendo el calentamiento de la superficie (Vivoni *et al.*, 2008). Esto ocurre en sitios donde la vegetación es verde y por lo tanto más opaca, como en los trópicos, donde se absorbe más radiación por la superficie, y donde los valores de albedo son menores en comparación con los desiertos. En este caso, la radiación solar en forma de onda corta es absorbida por las plantas para realizar su proceso de fotosíntesis haciendo que transpiren. Cuando las plantas absorben el calor y transpiran, disminuye la temperatura superficial pues la radiación solar no llega directamente a la superficie. Por lo tanto, conforme la vegetación pierde humedad, el albedo y la temperatura se incrementan (se utiliza el calor para aumentar la temperatura en la superficie y atmósfera circundante) manteniendo una relación directa albedo–temperatura.

En algunos sectores del Desierto Sonorense con zonas claras y valores altos de albedo (entre 20-35 %, como el desierto de Altar), se podría afirmar que el factor que domina la modulación de la

temperatura superficial es el de radiación; mientras que donde la vegetación aumenta y hay más variedad (es decir, áreas más opacas), y los valores de albedo son menores al 20 %, se podría afirmar que el factor que domina la modulación de la temperatura superficial es el de evapotranspiración. La transición en la dominancia entre un factor y otro dependerá de las condiciones de humedad del suelo y de la opacidad en la vegetación. Por lo tanto, si se analizan las relaciones albedo–temperatura superficial entre sitios con distintos tipos de vegetación y de suelo dentro del Desierto Sonorense se puede identificar como cambian estas relaciones en el tiempo. Si además en el modelo de regresión entre albedo–temperatura superficial se superponen los valores de NDVI, y se detecta un cambio en la pendiente, por ejemplo, de creciente a decreciente o viceversa, se puede identificar el valor promedio de NDVI donde ocurre el cambio. Este valor sería un indicador del *valor umbral* en el estado de la vegetación.

En las últimas décadas se han desarrollado algoritmos que utilizan la tecnología de percepción remota para monitorear en forma regular y sinóptica los cambios de la vegetación como respuesta a las fluctuaciones ambientales. Estos algoritmos permiten dar seguimiento a las sequías, supervisar e identificar zonas de riesgos susceptibles a incendios y desertificación (Kogan, 1997). Para poder analizar el estado de la vegetación se hace uso de índices de vegetación por satélite. Uno de ellos es el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), que emplea una fórmula de diferencias para cuantificar la densidad del crecimiento de la planta en la Tierra: radiación cercana al infrarrojo menos la radiación visible dividida por radiación infrarroja cercana más radiación visible, el cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\text{NDVI} = \frac{(IR - R)}{(IR + R)} \quad (I)$$

Donde *IR* se refiere a los valores de pixel de la banda infrarroja, y *R* a los valores de pixel de la banda roja. Los cálculos de NDVI para un píxel dado siempre dan como resultado un número que varía de (-1) a (+1); sin embargo, ninguna hoja verde da un valor cercano a cero. Un cero significa que no existe vegetación, mientras que valores ~ 1 (0.8-0.9) indican mayor densidad posible de hojas verdes. Los valores resultantes de NDVI son sumamente utilizados ya que

ayudan a compensar los cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie, la orientación entre otros factores. Finalmente, el estado de la vegetación tiene que ver con la cantidad de radiación que se absorbe y refleja, es por ello que el NDVI utiliza diferentes espectros. Para determinar la densidad del verde en la superficie terrestre, los investigadores deben observar los distintos colores (longitudes de onda) de la luz visible y del infrarrojo cercano reflejado por las plantas. Como puede verse a través de un prisma, muchas longitudes de onda diferentes forman el espectro de la luz solar. Cuando la luz del sol golpea objetos, ciertas longitudes de onda de este espectro son absorbidas y otras longitudes de onda se reflejan. El pigmento en las hojas de la planta, la clorofila, absorbe fuertemente la luz visible (de 0.4 a 0.7 μm) para su uso en la fotosíntesis. Por otro lado, la estructura celular de las hojas refleja fuertemente la luz del infrarrojo cercano (de 0.7 a 1.1 μm). Cuantas más hojas tiene una planta, más estas longitudes de onda de luz se ven afectadas, respectivamente.

Mediante el uso de valores de NDVI, observaciones de albedo y temperatura superficial, Tereshchenko *et al.*, (2012) proponen una metodología alternativa para llevar a cabo el monitoreo de la sequía, con base en los factores de radiación y evapotranspiración que modulan la temperatura superficial de las tierras secas áridas y semiáridas. Los resultados del análisis aplicado a un sector del Desierto Sonorense (Fig. 1a) confirman que existe una reducción del balance de radiación en función del incremento del albedo y disminución de la temperatura superficial. Durante el mes de agosto, por ejemplo, que es cuando la vegetación ya ha recibido suficiente humedad por las lluvias previas de julio-agosto, y comienza a declinar la cantidad de precipitación a finales de agosto y principios de septiembre, se observa que el factor de evapotranspiración domina la relación albedo–temperatura superficial (Fig. 1b), es decir esta relación es creciente. Esto sucede para valores de albedo entre 15 % y 20 %, mientras que a valores de albedo entre 19 % y 22 %, que indican mayor estrés de la vegetación por reducción de la humedad, domina el factor de radiación. En este caso, la relación albedo–temperatura superficial es opuesta o decreciente. El cambio de dominancia del factor de evapotranspiración al factor de radiación en la modulación de la temperatura superficial se pudo detectar a partir de un valor umbral de NDVI de 0.08 ± 0.01 . Este valor fue sugerido como base para el monitoreo de la sequía pues indica el umbral en que la vegetación alcanza su

máximo estrés, al pasar de condiciones húmedas (durante julio-agosto) a secas (septiembre-octubre).

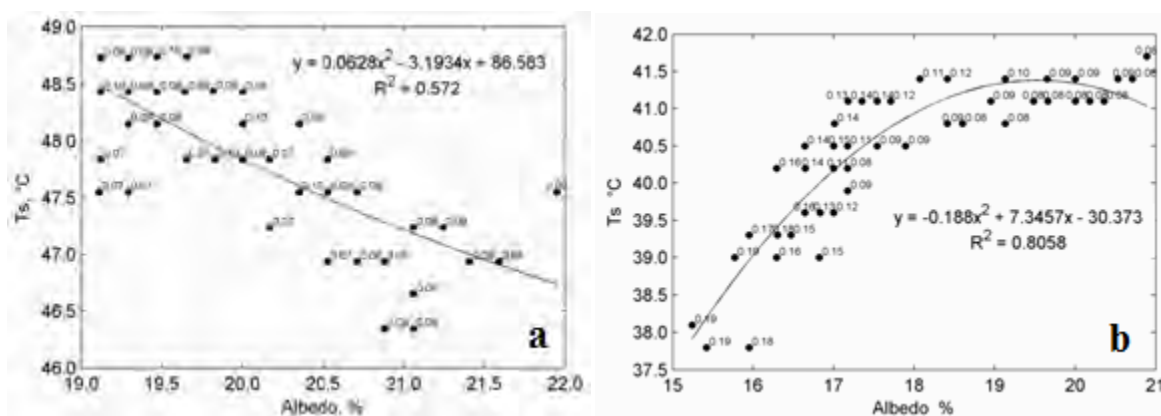


Figura 1. Relación entre la temperatura superficial y el albedo en el Desierto Sonorense (30-31°N; 112-113°W): (a) para el mes de junio y (b) para el mes de agosto. Los puntos indican valores promedio de AVHRR NDVI en el periodo 1984-95 en una malla de 16 km × 16 km (Fuente: Tereschenko *et al.*, 2012).

3. JUSTIFICACIÓN

Si bien la sequía ha sido un fenómeno muy estudiado, aún existen interrogantes sobre sus causas y orígenes. Se han desarrollado diferentes metodologías para su estudio con el uso de varios índices (ver por ejemplo: The North American Drought Monitor (NADM—El Monitor de Sequía de Norteamérica), disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/maps/en/202101>). Particularmente, en el noroeste de México se han realizado diversos esfuerzos para obtener algunas respuestas a esas interrogantes (Balling, 1988; Bryant *et al.*, 1990; Tereshchenko *et al.*, 2012); estos estudios o bien se han centrado en la zona fronteriza entre México y Estados Unidos (Balling, 1988; Bryant *et al.*, 1990) o bien en el sector más árido del Desierto Sonorense (Tereshchenko *et al.*, 2012). Debido a las diferentes condiciones de vegetación, tipo de suelo, cantidad de precipitación, entre otras características que se observan en todo el Desierto Sonorense, aún se desconoce si los resultados obtenidos por estos autores se pueden extender a toda la región de este desierto.

Por lo anterior, es importante identificar el valor umbral de NDVI en diferentes condiciones de vegetación, suelo y cantidad de precipitación dentro del Desierto Sonorense y corroborar los resultados obtenidos por Tereshchenko *et al.*, (2012). De esta manera, es posible tener una noción más completa y clara sobre los cambios que experimenta el Desierto Sonorense a lo largo del año, permitiendo obtener más evidencias sobre las condiciones que caracterizan la intensificación del desierto. Estos resultados pueden ser de interés a tomadores de decisión para el monitoreo de la desertificación inducida por factores climáticos y para las personas interesadas en el desarrollo de mejores prácticas de manejo y conservación en el Desierto Sonorense.

4. HIPÓTESIS

Se propone que el indicio de sequía en el Desierto Sonorense, es un proceso influenciado por dos factores: el de radiación y el de evapotranspiración. La dominancia de un factor respecto al otro depende del grado de estrés de la vegetación, caracterizado por el valor umbral del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada; este valor varía en función de la heterogeneidad de la cubierta vegetal y de las condiciones edáficas, de tal suerte que no solo existe un valor fijo, sino que éste varía de acuerdo con las características heterogéneas del Desierto Sonorense.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Determinar el valor umbral del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas, basado en la relación albedo–temperatura superficial en distintas condiciones ecológicas del Desierto Sonorense.

5.2 Objetivos particulares

Caracterizar distintos cuadrantes dentro del Desierto Sonorense, tomando en cuenta diferentes condiciones de cobertura vegetal y tipo de suelo.

Determinar la relación albedo y temperatura superficial, en los cuadrantes seleccionados durante la estación seca y húmeda, por tipo de vegetación y tipo de suelo.

Determinar si existen diferencias significativas del valor umbral del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas entre los cuadrantes de estudio.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

Los desiertos son biomas que comparten una gran cantidad de características que les son comunes como clima, geomorfología, suelos, vegetación y vida animal, propios de zonas donde el balance hídrico se ve realmente afectado por el déficit de agua (Evenari, 1999; Martínez, 2017; Goldstein y Dellasala, 2020); son ecosistemas con mecanismos de adaptación complejos, maduros y sumamente estables, que soportan una biodiversidad relativamente elevada debido a que los gradientes ambientales ocurren en un espacio muy corto (Martínez, 2017).

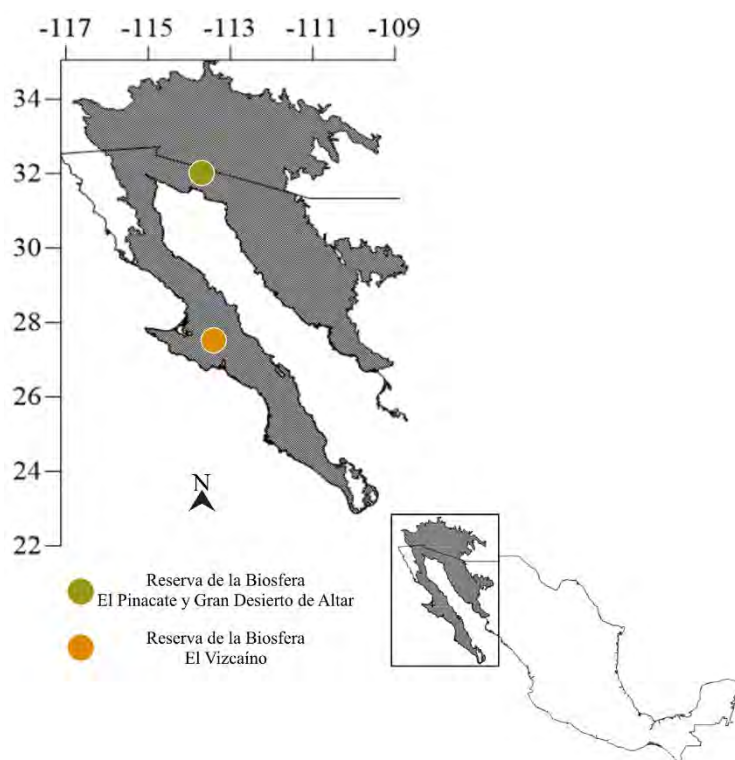


Figura 2. Ubicación del Desierto Sonorense. El área sombreada representa los límites del Desierto Sonorense (Shreve y Wiggins, 1964).

El Desierto Sonorense se ubica en la región árida del noroeste de México entre 23°–35°N y 109°–117°O, cubriendo una extensión de más de 300,000 km², en la mitad sur de Arizona y sureste de California en Estados Unidos, la mayor parte de la Península de Baja California, algunas islas del Golfo de California y una gran proporción del estado de Sonora (Dimmitt *et al.*, 2015) (Fig. 2). Este desierto es el más septentrional y uno de los cuatro grandes desiertos que

existen en Norte América. Los otros tres son el desierto de Mojave, la Gran Cuenca y el de Chihuahua.

Soporta una variedad de flora y fauna, ya que es el hogar de más de 130 especies de mamíferos, más de 500 tipos de aves, 20 especies de anfibios, aproximadamente 100 reptiles y 30 especies de peces nativos de agua dulce. Es considerado como el desierto botánicamente más rico del mundo (Shreve y Wiggins, 1964), ya que, de las aproximadamente 4,000 especies que se encuentran en Sonora, Arizona, Baja California y el sur de California, más de 2,500 especies nativas de plantas se encuentran dentro de los límites del Desierto de Sonoreense (Dimmitt *et al.*, 2015). Aparte de las plantas micrófilas predominantes, en el Desierto Sonoreense podemos encontrar saguaro gigante (*Carnegiea gigantea*), una de las especies más emblemáticas de la región (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010; Vanderplank y Ezcurra, 2020); esta área también incluye algunos árboles achaparrados como el palo fierro (*Olneya tesota*), el palo-verde (*Parkinsonia florida* y *P. microphylla*) y los mezquites (*Prosopis* spp.). La escasez de vegetación leñosa es compensada por la gran abundancia de plantas efímeras que brotan después de las lluvias, cubriendo el desierto con un denso y colorido manto de flores (Ezcurra *et al.*, 2002). Grenade y Stevens (2020), estiman que existen más de 2,000 manantiales en el Desierto Sonoreense, que proporcionan un hábitat propicio para el desarrollo de la biodiversidad silvestre y especies nativas endémicas (Vanderplank y Ezcurra, 2020). Por ejemplo, se estima que, las leguminosas del desierto en el centro de la Península de Baja California, alcanzan un 60-70 % de endemismo (Garcillán *et al.*, 2010).

El Desierto Sonoreense, situado entre el desierto de Mojave en el noroeste y el desierto de Chihuahua en el sureste, es un territorio con una distribución bimodal de la precipitación anual, donde la influencia de las fuentes de humedad tropicales, que resultan de la circulación monzónica norteamericana (Douglas *et al.*, 1993), disminuye conforme aumenta la latitud (Gaxiola-Morales y Brito-Castillo, 2019) (Fig. 3). El patrón y la fuente de invierno son similares a los del desierto de Mojave, mientras que la temporada de verano es análoga a la del desierto de Chihuahua (MacMahon *et al.*, 1985). Por otra parte, las lluvias de verano (de julio a septiembre), en general predominan cuando las temperaturas superan los 40 °C a la sombra y están controladas por el monzón de Norteamérica (Douglas *et al.*, 1993, Higgins *et al.*, 2003), la

precipitación de invierno (de noviembre a marzo), cuya contribución es entre 30 y 40 % en relación con el total anual, aumenta en cantidad hacia el norte y se asocia al paso de los sistemas de latitudes medias y de los ciclones extratropicales (Jáuregui, 1995). Los períodos secos se observan a principios de verano (mayo–junio) y a principios de otoño (septiembre–octubre).

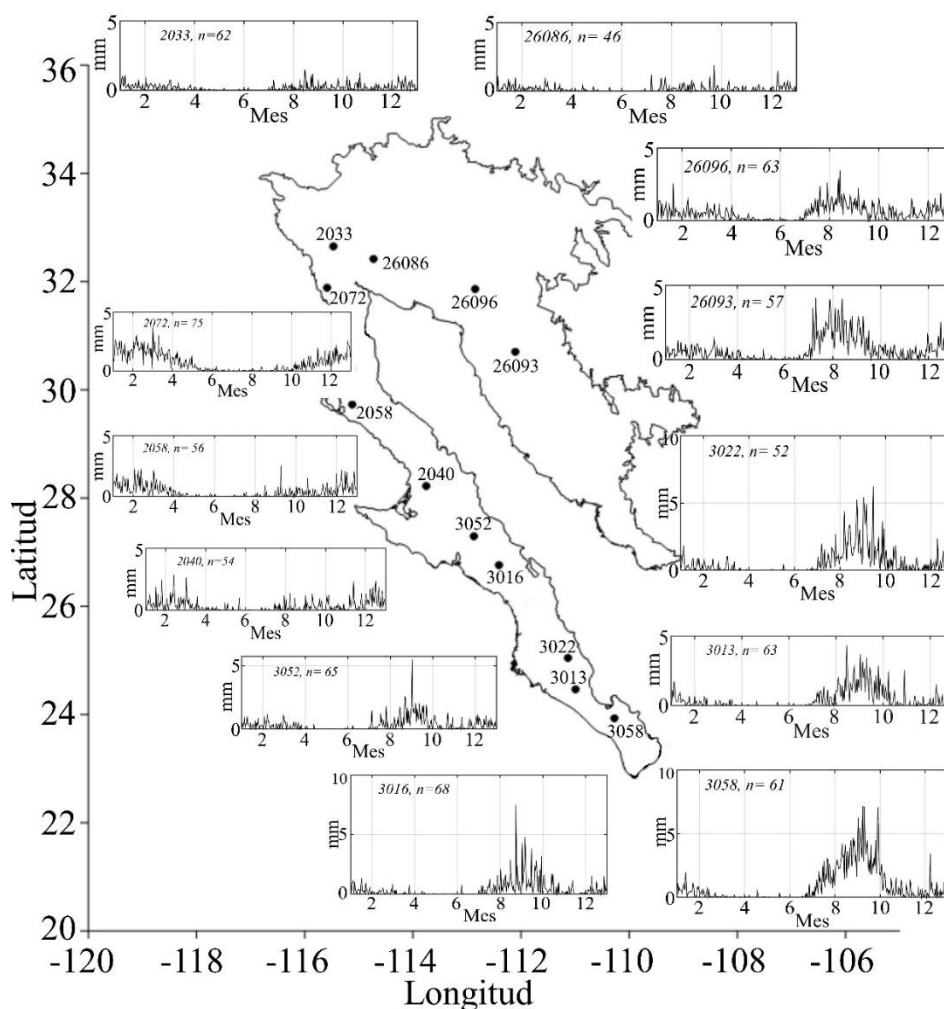


Figura 3. Climatología diaria de precipitación de algunas estaciones localizadas en el Desierto Sonorense y que contienen registros con más de 40 años. Se muestra en cada caso la clave de la estación y el número de años con que se realizó el cálculo (tomada de Gaxiola-Morales y Brito-Castillo, 2019).

Por su parte, la temperatura en el Desierto Sonorense se caracteriza por ser extremadamente elevada; las temperaturas del aire en verano habitualmente superan 40 °C y, a menudo, alcanzan 48 °C. Estas altas temperaturas cercanas a la superficie interactúan con el aire fresco y húmedo de la atmósfera para producir las violentas tormentas eléctricas de los monzones de

verano. A medida que la humedad en la superficie del suelo y en el aire cercano a la superficie se evapora después de una tormenta, las temperaturas pueden disminuir 10 °C o más en cuestión de minutos. Las temperaturas de invierno son benignas, con valles típicamente libres de heladas, mientras que las montañas circundantes pueden tener una densa capa de nieve en las partes elevadas. Durante cualquier estación, los cambios diarios de 15 °C o más son comunes, ya que la atmósfera seca y la cubierta vegetal relativamente baja facilitan la radiación del calor diario a la atmósfera durante la noche (National Park Service, 2019).

Dos zonas que no pueden pasar desapercibidas son la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, en Baja California Sur y la Reserva de la Biosfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar, en Sonora (Fig. 2). El Vizcaíno, siendo un área extensa de desierto en la península entre dos mares, el Golfo de California y el Océano Pacífico, lo hace único al tener contrastes entre el desierto y el mar, dunas de arena y vegetación halófila con lagunas costeras y manglares (INEGI, 2013a). La mayor parte de la vegetación está constituida por matorral espaciado en que destacan como eminencias las ramas de *Yucca valida*, que alcanzan hasta 10 m de altura. En el estrato principal dominan *Ambrosia magdalanae*, *Lycium californicum* y *Encelia frutescens*. Cerca del litoral existen zonas de dunas bastante activas con una gran vegetación característica de matorral bajo de *Prosopis spp.*, *Rhus spp.*, y diversas plantas herbáceas (Rzedowski, 2006). Por su parte la región del Pinacate, destaca por sus características físicas y biológicas únicas, por la presencia de un escudo volcánico, así como por las extensas zonas de dunas activas que lo rodean y por la mayor concentración de cráteres tipo Maar (Hartman, 1989). La Sierra del Pinacate reviste características orogénicas de alto interés por su conformación abrupta, producto de frecuentes erupciones volcánicas que acumularon lavas en rocas compactas, arenas y cenizas volcánicas, rocas ígneas en las que la intemperización ha producido coloraciones de especial belleza y cráteres como El Elegante, Cerro Colorado, MacDougal y Sykes (INECC, 2007).

6.2 Selección de cuadrantes

Se seleccionaron cinco cuadrantes de 1°×1° (1° en estas latitudes corresponde aproximadamente 100 kilómetros lineales), en una malla de 0.05°×0.05° (21×21 con pixeles de 5.6 km de lado) (Fig. 4), en un gradiente latitudinal con diferencias en vegetación, características de suelo y patrón de distribución de lluvias. Los tres primeros cuadrantes se ubican en la

península de Baja California, el primero (denominado C1) en el municipio de La Paz, BCS, y el segundo (C2) y tercer (C3) cuadrantes, dentro de la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno. El cuarto cuadrante (C4) en la porción media del estado de Sonora, y un quinto y último cuadrante (C5) en la Reserva de la Biosfera El Pinacate.

De acuerdo a la información obtenida de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación (INEGI, 2013b) y la Carta de Edafología (INIFAP-CONABIO, 1995), se logró caracterizar el tipo de suelo y vegetación de los cuadrantes de estudio, analizando las características que comparten y difieren en cada uno de ellos (Tabla 1). Se lograron identificar un total de 13 polígonos para vegetación y 15 para suelo. En la Tabla 1 se muestra el número de pixeles que conformaron cada polígono de vegetación y suelo en los cuadrantes.

Tabla 1. Número de pixeles en C1-C5 por tipo de vegetación y de suelo.

	C1	C2	C3	C4	C5		
Tipos de vegetación	Desierto arenoso		94	27	30	119	
	Encino			2			
	Galería	4	1	17	3		
	Halófila		89	51	2	5	
	Matorral crasicaule					1	
	Matorral desértico		52	20	144		
	Matorral desértico micrófilo	4				109	
	Matorral sarcocrasicaule	62	17	49			
	Matorral sarcocrasicaule de neblina	10					
	Matorral sarcocaule	116	82	203	72	25	
	Mezquital	12		2	10		
	No aplicable		4	2	3		
	Sin vegetación aparente		13	12		27	
	Tipos de suelo	Feozem háplico		12	13		
		Fluvisol calcárico		3		19	28
Fluvisol eútrico			10	32	4		
Litosol		3	28	180	47	38	
Regosol calcárico		25	66	25	55	171	
Regosol eútrico		51	149	152	58	10	
Solonchak gleyico			14	9			
Solonchak órtico			2	1		4	
Vertisol crómico			2	19	2		
Xerosol calcárico			5		2		
Xerosol háplico		37	5		7		
Xerosol lúvico			1		3		
Yermosol calcárico		8	2		17	26	
Yermosol háplico		39	19	28	53	10	
Yermosol lúvico		6	7		1		

El área sombreada indica los polígonos con cobertura ≥ 15 pixeles

Para C1, el tipo de vegetación que cubrió mayormente la superficie del cuadrante fue matorral sarcocaula y suelos de tipo Regosol; en C2 vegetación típica de desierto arenoso y halófila, con tipos de suelos Regosol. Por su parte en C3 la vegetación con mayor cobertura fue matorral sarcocaula y suelos de tipo Litosol; en resultado en C4, mostró mayor vegetación de tipo matorral desértico y suelo tipo Regosol. En C5 se encontró vegetación típica de desierto arenoso y suelos de tipo Regosol calcárico.

6.3 Preparación y procesamiento de datos

Se utilizaron los registros diarios de precipitación en el periodo 1965-2016 de 476 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México para estimar los acumulados mensuales en cada uno de los píxeles. Se construyó una cuadrícula utilizando la función `gridfit` en Matlab (R2020b). La función `gridfit` divide cada celda de la cuadrícula en un triángulo y luego realiza una interpolación lineal dentro de cada triángulo. En los casos en que un mes tuvo menos del 90 % de registros diarios, la suma se consideró dato faltante. Los valores negativos de precipitación después de la interpolación se sustituyeron por ceros.

Se consultaron bases de datos de diversas instituciones como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, <https://www.inegi.org.mx/datos/>) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>). Se utilizaron datos calibrados mensuales de albedo, temperatura superficial y NDVI de imágenes de satélite distribuidos por el U.S. Geological Survey/National Aeronautics and Space Administration Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC; ver <https://lpdaac.usgs.gov/>) de los productos MODIS MCD43C3-V6 (Schaaf *et al.*, 2015), MOD11C3-V6 (Wan *et al.*, 2015) y MOD13C2-V6 (Didan, 2015), para el periodo febrero/2000–febrero/2018, con resolución espacial de 5.6 km. Los valores de albedo inferiores a 15 % fueron removidos del análisis ya que, de acuerdo a Dobos (2003), no corresponden a las condiciones de desiertos.

En los límites de cada uno de los cuadrantes seleccionados se extrajeron los datos de albedo, temperatura superficial y NDVI en formato de malla (de $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ y píxeles de $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$) resultando en un total de 441 píxeles por cuadrante. Adicionalmente, se estimó la precipitación mensual acumulada en cada cuadrante con las mismas dimensiones que los datos mencionados anteriormente para que hubiera consistencia en los análisis. Para evitar sesgos en el análisis debido a influencia humana y presencia de cuerpos de agua, los píxeles localizados en mar, zonas agrícolas y zonas urbanas fueron removidos del análisis, resultando un total de 169, 349, 365, 267 y 409 píxeles para los cuadrantes C1–C5, respectivamente (Fig. 4). La Figura 5 muestra tomas fotográficas del terreno característico para cada uno de los cuadrantes.

Con la finalidad de analizar el ciclo intra-anual de las cuatro variables (albedo, temperatura superficial, NDVI y precipitación) se calculó, para cada variable, la media mensual histórica en cada uno de los cuadrantes (Fig. 6). El promedio histórico se calculó en el período 1965–2016 para precipitación, y en el período 2000–2018 para el resto de las variables. Estos períodos corresponden a los períodos de disponibilidad de datos.

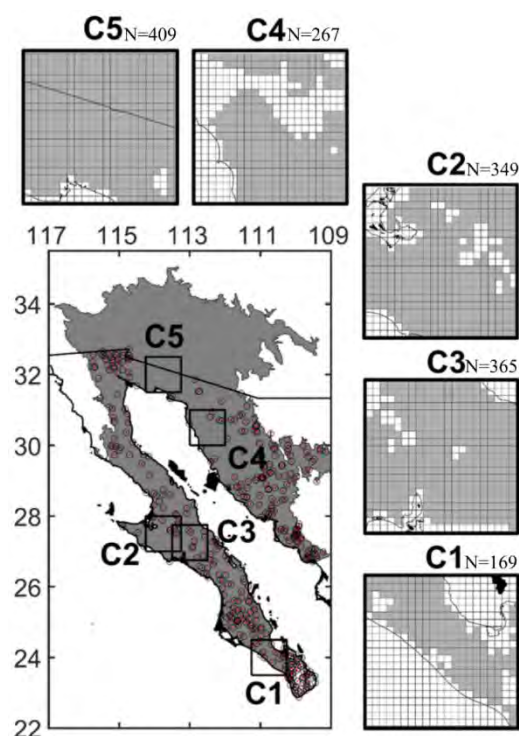


Figura 4. Ubicación de los cuadrantes de estudio. C1-C5 son los cuadrantes seleccionados. Fuera del mapa, las zonas oscuras muestran el número de píxeles (N) filtrados en cada cuadrante una vez removidos los píxeles localizados en mar, zonas agrícolas y urbanas (identificados en color blanco).

6.4 Estimación de regresión no lineal entre albedo–temperatura

Una vez removidos los pixeles localizados en mar, zonas agrícolas y zonas urbanas, se estimaron las regresiones no lineales entre albedo y temperatura superficial en los cuadrantes C1 a C5.

Para esto se tomaron en cuenta los promedios históricos para cada mes en cada uno de los pixeles de cada cuadrante, para el período febrero/2000–febrero/2018. La línea de regresión se obtuvo ajustando, por mínimos cuadrados, un polinomio de segundo grado. Los cálculos se realizaron en Matlab (2020b). A cada par de datos albedo–temperatura superficial, en el modelo de regresión, se superpusieron los valores correspondientes de NDVI en una escala de colores fija en todos los casos para identificarlos adecuadamente. Para establecer el punto de pendiente cero en la línea del modelo regresión se calculó la primera derivada del polinomio ajustado. El punto de pendiente cero representa el valor máximo o mínimo de la curva en la relación albedo–temperatura superficial que está asociado a un valor umbral de NDVI y que es representativo del cambio en la dominancia entre los factores de radiación y evapotranspiración.

En el análisis se consideró como verano los meses comprendidos entre mayo–octubre, mientras que invierno los meses de noviembre–abril.

Adicionalmente, se analizó el comportamiento de la vegetación en cada cuadrante; para lo cual se graficaron los valores de NDVI conservando la escala de colores utilizada en el modelo de regresión. Con este procedimiento se dio seguimiento a los cambios que experimenta la vegetación en el ciclo anual. Para un mejor análisis, se agregaron las curvas de nivel del terreno.

Posteriormente se realizó un análisis de varianza o ANOVA, para probar si había o no diferencias estadísticamente significativas entre las zonas con variaciones en la vegetación, suelo y elevación del terreno; este análisis se realizó para las variables de albedo, temperatura superficial y NDVI, comparando el valor del estadístico F con su valor tabular.

6.5 Modelo de regresión entre albedo y temperatura, por tipo de vegetación y tipo de suelo

En cada cuadrante del C1 al C5 se tomó en cuenta la distribución de los diferentes tipos de vegetación y de suelo, con base en la información de las cartas de Uso de Suelo y Vegetación (1:250 000) y la de Edafología (1:250 000). En cada caso, el modelo de regresión, entre albedo y temperatura superficial, se estimó únicamente cuando la cobertura en cada tipo (vegetación y/o suelo) fue ≥ 15 píxeles. En estos casos, para el cálculo del modelo de regresión se utilizaron los promedios históricos mensuales de albedo y de temperatura superficial por píxel, con base en el período febrero/2000–febrero/2018, correspondiente a cada tipo de vegetación y de suelo. En todos los casos sólo se consideraron los valores de albedo mayores al 15 %.

7. RESULTADOS

En primera instancia, se logró caracterizar cinco escenarios biológicos dentro del Desierto Sonorense, los cuales se describen en seguida.

7.1 Caracterización de cuadrantes

7.1.1 Cuadrante 1 (C1)

El cuadrante 1 (de ahora en adelante C1), fue seleccionado por su ubicación geográfica y su climatología. Se localiza en el municipio de La Paz, Baja California Sur, entre las coordenadas 24° 30' y 23° 30' de latitud, y -111° 15' y -110° 15' de longitud. Según el censo de población 2020, en este municipio reside una población de 250,141 habitantes. En C1 existe una red de comunicaciones compuesta mayormente por brechas de terracería y carretera pavimentada; su fisiografía es de lomerío, sierra alta compleja con mesetas y llanuras desérticas con piso rocoso, donde predominan suelos con tonalidad clara de tipo Regosol, Xerosol y Yermosol. La vegetación está compuesta por matorral sarcocaula y sarcocrasicaule (Fig. 5a), cubriendo un 50 % y 40 %, respectivamente (Tabla 1).

7.1.2 Cuadrantes 2 (C2) y 3 (C3)

El cuadrante 2 (de ahora en adelante C2) fue seleccionado debido a que es un área mayormente conformada por zonas de dunas (áreas claras) y vegetación efímera; por su parte el cuadrante 3 (de ahora en adelante C3) fue agregado al análisis *a posteriori* debido a que presenta condiciones más húmedas que en C2, muy probablemente por su cercanía con el Golfo de California y por sus elevaciones.

El cuadrante C2, se localiza entre las coordenadas 28° 00' y 27° 00' de latitud y -114° 15' y -113° 15' de longitud, mientras que el cuadrante C3, se localiza entre las coordenadas 27° 45' y 26° 45' de latitud y -113° 30' y -112° 30' de longitud. Ambos cuadrantes cubren el municipio de Mulegé, Baja California Sur, con una población total de 67,727 habitantes (según el censo de población 2020). En C2 y C3 existe una red de comunicaciones compuesta mayormente por brechas de

terracería; la fisiografía está compuesta por llanura desértica con dunas (más del 50 %) (Fig. 5b), donde predominan suelos claros, rocosos, enriquecidos con sales y secos, de tipo Regosol, Solonchak y Yermosol (Tabla 1). La vegetación que predomina en C2 es principalmente de desierto arenoso, halófila y matorral sarcocaula en la mayor proporción, mientras que en C3, la vegetación que predomina es de matorral sarcocaula y halófila (Fig. 5c).

7.1.3 Cuadrante 4 (C4)

El cuadrante 4 (de ahora en adelante C4) fue seleccionado por ser un área conformada por zonas de dunas y vegetación efímera, que comparado con los cuadrantes C2 y C3, posee características compartidas. Se localiza entre las coordenadas $31^{\circ} 00'$ y $30^{\circ} 00'$ de latitud y $-113^{\circ} 00'$ y $-112^{\circ} 00'$ de longitud. Abarca la población de los municipios de Altar, Pitiquito y Caborca, Sonora, con un total de habitantes de 107,736 entre los tres municipios, de acuerdo con el censo de población 2020. Posee una red de comunicaciones compuesta por terracería y brechas principalmente y su fisiografía se compone por bajadas con lomerío. El suelo es de tipo Regosol/calcárico-eútrico en más del 40 % de toda el área del cuadrante; la vegetación que predomina es de matorral desértico micrófilo y matorral sarcocaula (Fig. 5d).

7.1.4 Cuadrante 5 (C5)

El cuadrante 5 (de ahora en adelante C5) fue seleccionado debido a que es un área conformada por zonas de dunas y zonas con roca volcánica en una de las regiones más áridas de México. Se localiza entre las coordenadas $32^{\circ} 30'$ y $31^{\circ} 30'$ de latitud y $-114^{\circ} 15'$ y $-113^{\circ} 15'$ de longitud.

Abarca la población de los municipios de Puerto Peñasco y parte de San Luis Río Colorado, Sonora, con más de 100,000 habitantes, de acuerdo al último censo de población 2020. Posee una red de comunicaciones compuesta por brechas de terracería y caminos pavimentados; su fisiografía se compone por planicies y bajadas con lomerío. La superficie de la zona está formada por rocas de composición sedimentaria y vulcano-sedimentaria (Fig. 5e). Los suelos dominantes son de tipo Regosol, y en menor escala Litosol, Yermosol, Solonchack y Vertisol. La vegetación comprende matorrales xerófilos. En algunas áreas pequeñas ocurren tipos de

distribución restringida como chaparral, mezquitales y matorrales arborescentes (Búrquez y Castillo, 1993).

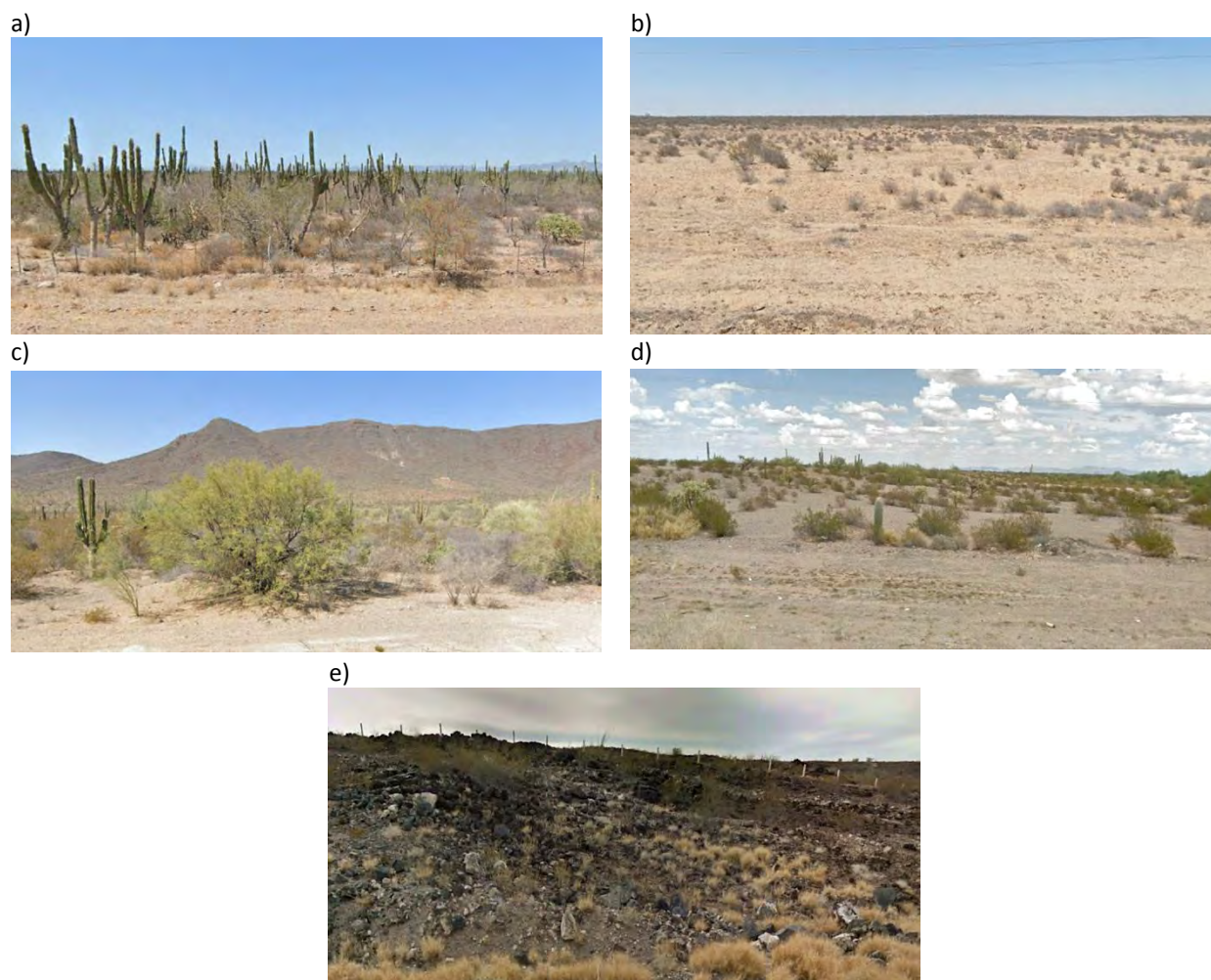


Figura 5. Fotografías del terreno en cada uno de los cuadrantes seleccionados. a) Cuadrante 1, La Paz, Baja California Sur. Carretera Federal México 1, La Paz-San Juan de la Costa; b) Cuadrante 2, Mulegé, Baja California Sur. Carretera Federal México 1, Santa Rosalía-Guerrero Negro; c) Cuadrante 3, Mulegé, Baja California Sur. Carretera Federal México 1, Carretera Transpeninsular; d) Cuadrante 4, Sonora, México. Carretera N° 37, Caborca, Sonora; e) Cuadrante 5, Puerto Peñasco, Sonora, México. Carretera Federal 2, San Luis Río Colorado-Sonoyta, Sonora. Fuente: Google Earth Pro (2020).

7.2 Ciclo intra-anual de variables

La figura 6 muestra el ciclo intra-anual de las variables de albedo, temperatura superficial, NDVI y precipitación para los cuadrantes C1–C5. A lo largo del año, el albedo mostró pocas variaciones en todos los cuadrantes, pero se observaron diferencias notables en la amplitud de

los valores de albedo entre cuadrantes (Fig. 6a). Los valores más bajos se observaron en el cuadrante medio oriental de la Península de Baja California (C3, ~23 %), y los valores más grandes en el noroeste de Sonora (C5, ~34 %) donde la baja cantidad de cobertura vegetal contribuye a la ocurrencia de altas fluctuaciones de temperatura diurnas (Bryant *et al.*, 1990).

C1, en el sur de la Península de Baja California, y C4 en el oeste de Sonora, mostraron valores similares de albedo (~25 %) mientras que C2 en el centro de la Península de Baja California mostró ~30 % de albedo. Cabe destacar que las diferencias de albedo entre los cuadrantes fueron consistentes con las diferencias encontradas en la temperatura (Fig. 6b), NDVI (Fig. 6c) y precipitación (Fig. 6f), lo cual fue un indicador de que los cuadrantes seleccionados capturan muy bien los gradientes latitudinales observados en el Desierto Sonorense.

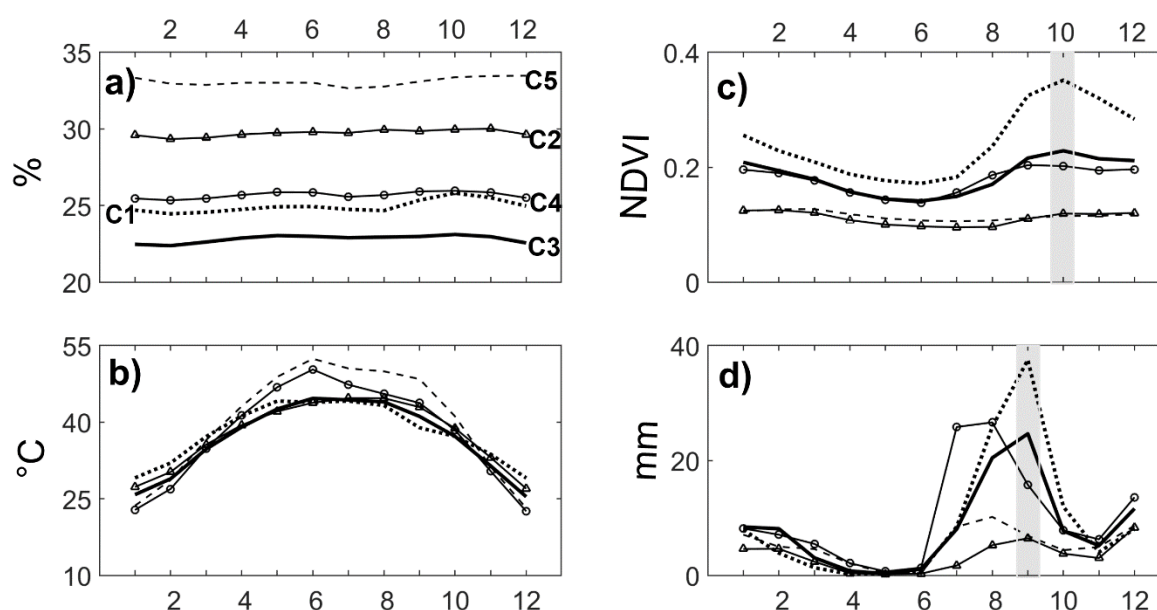


Figura 6. Ciclo intra-anual de variables. a) Albedo; (b) temperatura superficial; (c) NDVI; (d) precipitación. Las barras grises en c, d corresponden a los picos mensuales de NDVI y precipitación para la mayoría de las áreas.

En el caso de la temperatura superficial (Fig. 6b), C5 mostró la mayor amplitud (29.2 °C), mientras que C1 mostró la más baja (15.1 °C). La amplitud de temperatura en los cuadrantes restantes fue de 17.7 °C, 19.2 °C y 27.7 °C para C2, C3 y C4 respectivamente. A lo largo del año, la mayor amplitud de temperaturas superficiales entre los cuadrantes se produce en septiembre

(9.5 °C), seguida de junio (8.6 °C), mientras que la menor amplitud se observa en marzo (2.2 °C) seguido de noviembre (3.3 °C).

El NDVI (Fig. 6c) y las series de precipitación (Fig. 6d) mostraron un comportamiento bianual, con una estación de verano húmeda (julio-septiembre), y un invierno frío (noviembre-marzo).

Las series de precipitación (Fig. 6d) distinguieron dos sequías anuales, una en primavera (abril-junio) y otra en otoño (octubre). Las figuras 6c y 6d indicaron correspondencia entre las series de precipitación y NDVI, con la primera desfasando el valor máximo anual de NDVI en un mes respecto a la precipitación, y mostrando los valores mínimos de NDVI durante el periodo cálido y seco de abril-junio en todos los cuadrantes. Los cuadrantes C2 y C5, presentaron tanto los valores más bajos de NDVI a lo largo del año, como las amplitudes más bajas (0.09 y 0.03 en C2; 0.11 y 0.02 en C5), en congruencia con los registros más bajos de precipitación en estos cuadrantes (41.1 mm y 63.1 mm). Los mayores valores de NDVI (0.35) y la mayor amplitud (0.18) se dan en C1, principalmente en octubre, tras el paso de los ciclones tropicales (Farfán *et al.*, 2015).

Finalmente, C3 y C4 mostraron un ciclo intra-anual de NDVI muy similar, con C4 presentando valores más bajos de NDVI de octubre-enero (Fig. 6c), valores más grandes de albedo (Fig. 6a), temperaturas superficiales más bajas (Fig. 6b), así como más precipitación (Fig. 6d) en comparación con C3.

7.3 Modelo de regresión no lineal entre albedo y temperatura

Las figuras 7–17 muestran los resultados obtenidos de la estimación del modelo de regresión no lineal entre albedo y temperatura superficial en los cuadrantes C1 a C5, así como los cambios que experimenta la vegetación en el ciclo anual.

7.3.1 C1

En la figura 6 se muestran los cambios en la relación albedo–temperatura a lo largo de los meses para C1. Se aprecia que durante la temporada de invierno, en los meses de noviembre a

febrero (Fig. 7a, b, k, l), la correlación entre albedo y temperatura superficial fue positiva. En abril (Fig. 7d), la amplitud de la mitad inferior de los valores de albedo mostró una correlación positiva con la temperatura superficial mientras que la amplitud de la mitad superior mostró una correlación negativa. Aunque en este último caso la dispersión fue mayor, este comportamiento implica que abril fue un mes de transición entre la relación albedo–temperatura superficial. Fue creciente del lado izquierdo y decreciente del lado derecho. En verano, debido a la disminución paulatina de las precipitaciones que se presentan de enero a junio en la región (ver por ejemplo el gráfico de climatología diaria de la estación 3013 en Fig. 3), dio lugar a la relación inversa albedo–temperatura, siendo más notoria en junio (Fig. 7f).

El punto de pendiente cero de la línea de regresión se desplazó hacia la izquierda de enero a junio, en concordancia con el aumento de la temperatura superficial y la disminución del albedo. Estos resultados indicaron que el mecanismo de radiación en la regulación de la temperatura superficial predominó de mayo a junio. Con la llegada de las lluvias en julio, la vigorosidad de la vegetación aumentó un poco, lo que trajo una ligera disminución de la temperatura superficial y al aumento del albedo. En octubre (Fig. 7j), cuando aparece una segunda transición desde una relación inversa (en la que el factor de radiación domina) a una directa (donde el factor de evapotranspiración domina), a medida que el tiempo avanza, fue hasta enero cuando la relación albedo–temperatura se tornó más evidente y la correlación entre estas características fue máxima ($R = 0.61$). Estos resultados indican que el mecanismo de evapotranspiración predomina de noviembre a enero, y la disminución de la temperatura, al aumentar el albedo en los puntos de pendiente cero de la línea de regresión, resultó como parte de la respuesta de la vegetación.

En la figura 8, se muestra el comportamiento que presentó el NDVI para C1 a lo largo del año. Fue posible detectar aquellos meses donde la vegetación expresó estrés hídrico de máxima intensidad. Esto sucedió al final del periodo de sequía en junio (ver escala de colores para una mejor identificación), principalmente en el noroeste del área que abarca C1 (ver mes de junio en Fig. 8), cuando los valores de NDVI cayeron hasta un mínimo de <0.15 . Es interesante notar que en el lado medio-oriental de C1, algunos pixeles mostraron valores de NDVI de ≥ 0.20 durante

todo el año. El NDVI presentó valores máximos en el mes de octubre, cuando se estableció una segunda transición, de relación inversa (en la cual domina el factor de radiación) a directa (en la cual domina el factor de evapotranspiración) (Ver Fig. 7j).

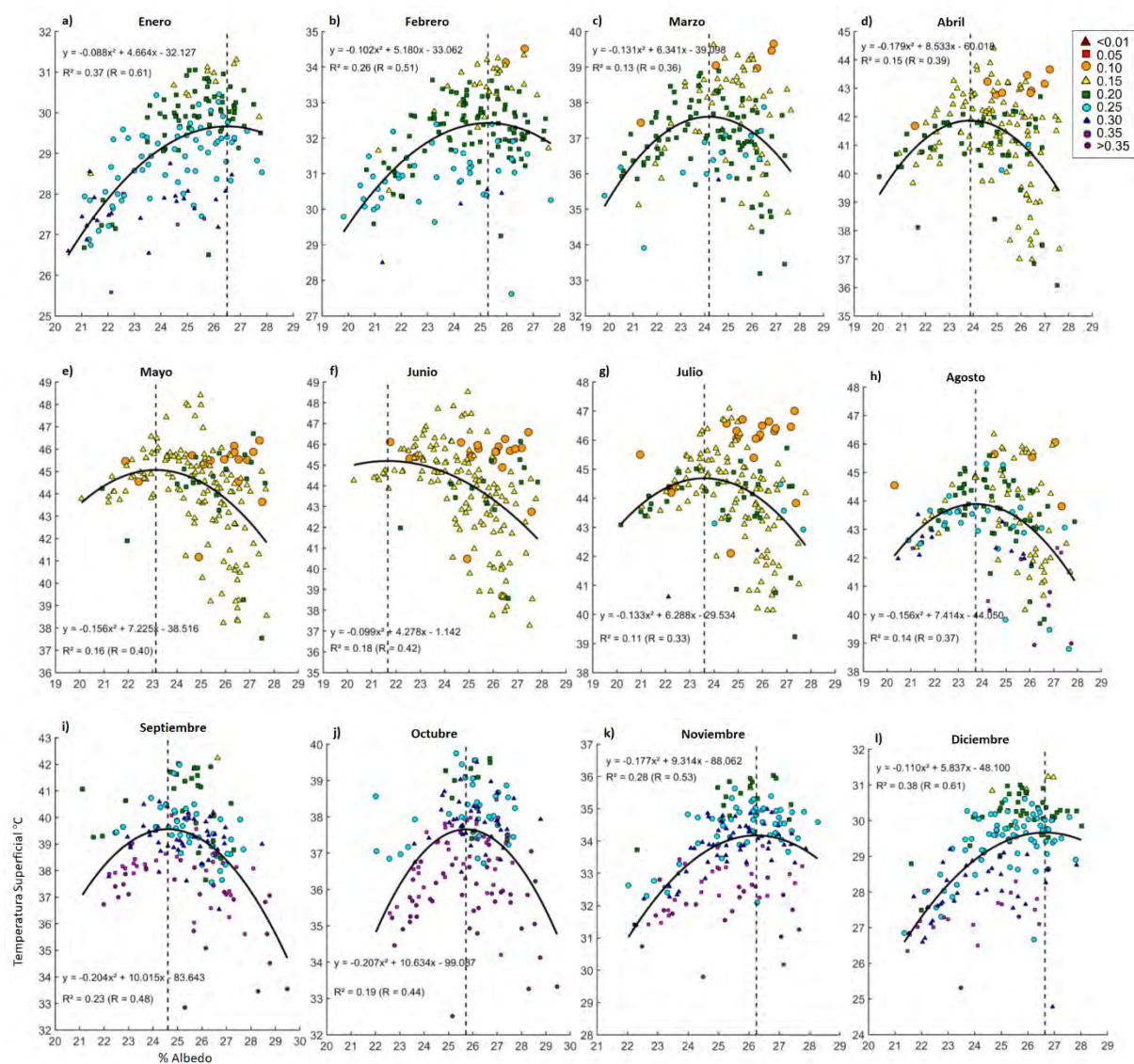


Figura 7. Relación mensual entre albedo y temperatura superficial en cuadrante 1 (C1). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.

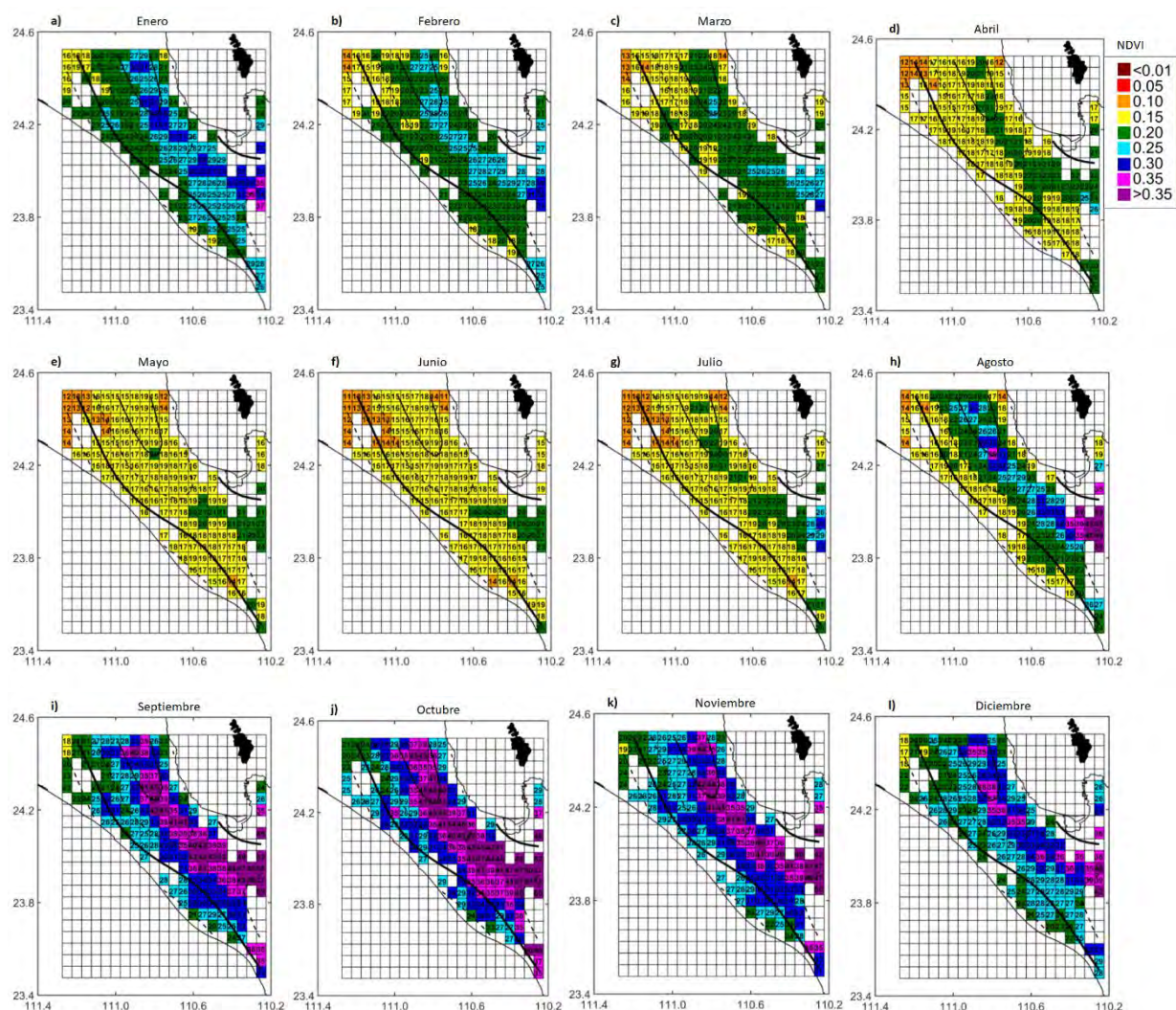


Figura 8. Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 1 (C1) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.

7.3.2 C2

En C2, la relación creciente entre el albedo y la temperatura de la superficie predominó a lo largo del año (Fig. 9). No se observó cambio en la pendiente de la línea de regresión en el ciclo anual, situación que indica que la disposición de fitomasa en toda el área de C2, a pesar de ser baja, fue suficiente para suprimir el mecanismo de radiación. Según estos resultados, la relación directa entre albedo y temperatura superficial evidencia que el mecanismo de evapotranspiración domina el ciclo anual. En este territorio, la prevalencia de condiciones

extremadamente secas se observó en todos los meses. La relación albedo–temperatura fue mayor en noviembre ($R = 0.66$) (Fig. 9k).

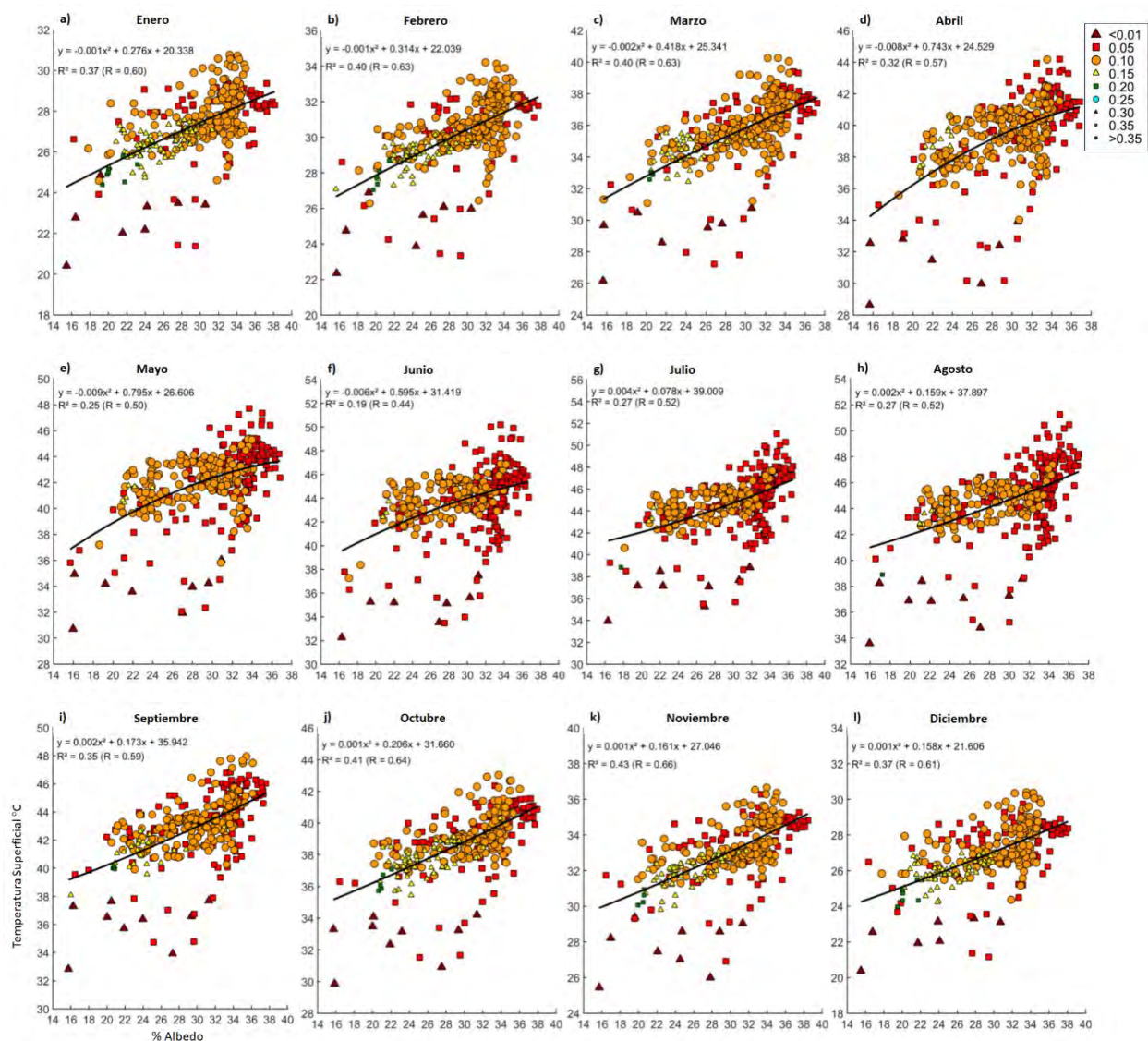


Figura 9. Relación mensual albedo–temperatura superficial en cuadrante 2 (C2). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.

En este cuadrante se encontró un gradiente de valores de NDVI claramente definido entre el noreste y el sur (Fig. 10). La deshidratación de las plantas alcanzó un pico en junio (Fig. 10f), cuando las condiciones fueron suficientemente secas y un gran número de píxeles presentaron

valores mínimos de NDVI (de <0.10). Las lluvias del verano, y el descenso de las temperaturas condujeron a un aumento del gradiente del NDVI.

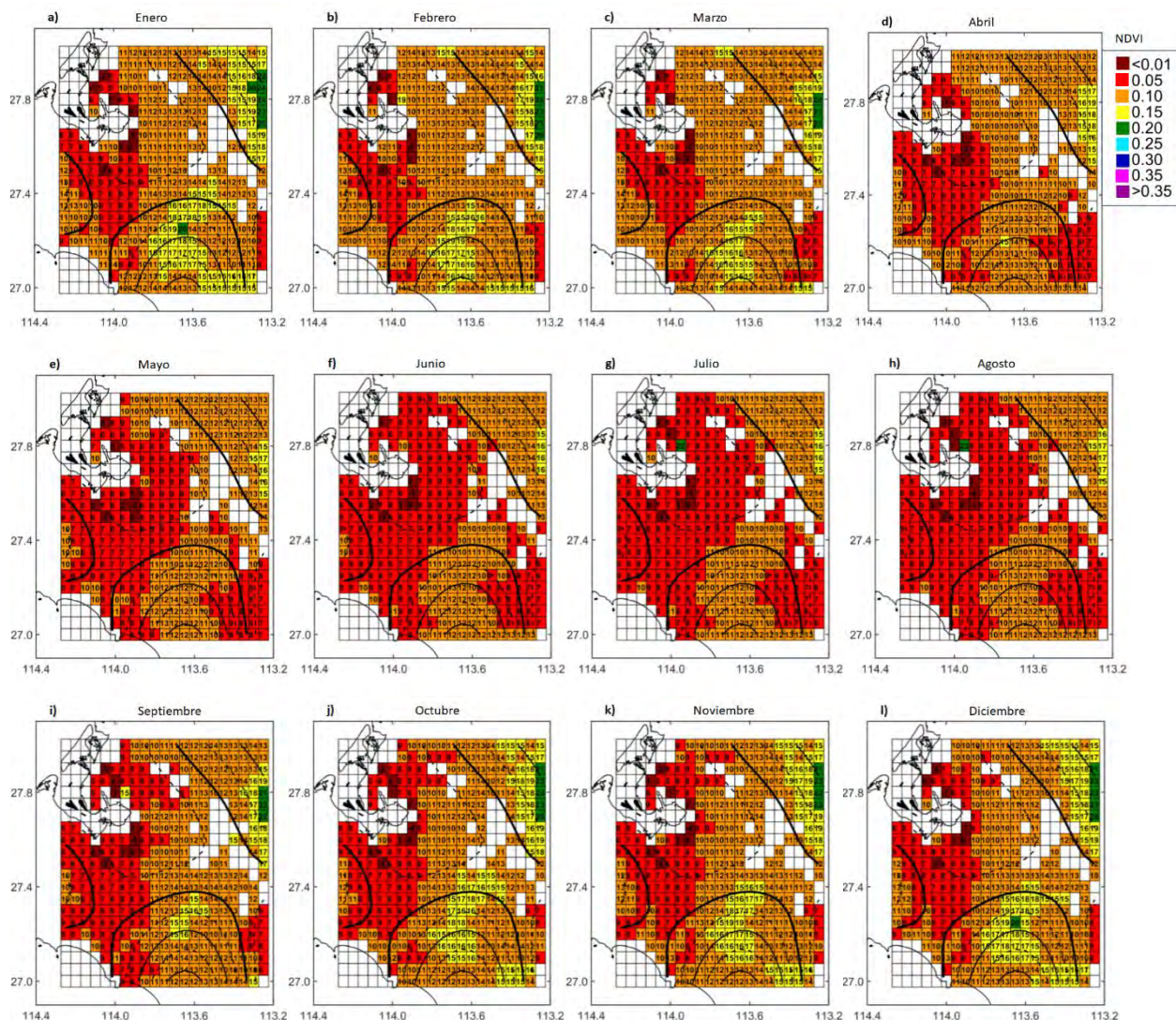


Figura 10. Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 2 (C2) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.

7.3.3 C3

En C3, la relación entre albedo y temperatura superficial mostró un comportamiento diferente en el ciclo anual en comparación con C2, a pesar de su proximidad. Un ejemplo de ello, fueron las condiciones de mayor humedad observadas en C3 durante las lluvias de verano (julio-octubre) que dieron soporte para que la vegetación expresara valores de NDVI cada vez más

altos (Fig. 12g-j), a pesar de que en estos casos las líneas de regresión no mostraron puntos de pendiente cero. Además, los puntos de albedo–temperatura se organizaron de tal manera que se observó un gradiente de NDVI a lo largo de todo el ciclo anual (Fig. 11). Este patrón fue mayormente acentuado en los meses de enero, abril, junio y noviembre (Fig. 11a, d, f, k), con mayores valores de NDVI que correspondieron a valores mínimos tanto de albedo como de temperatura superficial, y viceversa. Esta estructura tuvo coherencia respecto al gradiente de elevación del territorio, donde los valores más altos de NDVI se encontraron en las zonas de mayor elevación y los valores más bajos, en la llanura costera (Fig. 12). La relación creciente entre albedo y temperatura superficial en C3 fue indicativo de que el mecanismo de evapotranspiración predomina a lo largo del año, aunque el mecanismo de radiación operó para valores umbrales de NDVI de <0.15 en enero-febrero (Fig. 11a, b). En estos meses, el punto de pendiente cero de la línea de regresión se desplazó hacia la izquierda en consonancia con un aumento de la temperatura superficial y una disminución del albedo. Después de las lluvias de verano, el NDVI mostró valores con constante incremento entre los meses de julio y noviembre, lo que elevó la correlación entre el albedo y la temperatura superficial. El punto de pendiente cero de la línea de regresión se desplazó hacia la derecha entre noviembre y diciembre (Fig. 11k, l), en concordancia con el predominio del factor de evapotranspiración. En diciembre, la correlación entre el albedo y la temperatura superficial alcanza un máximo ($R = 0.83$). Después, se observa un descenso constante del NDVI entre enero y junio (Fig. 12a, f), lo que evidenció un realce de las condiciones desérticas para valores umbrales <0.15 . La mayor sequedad de estos meses fue indicativo de que el verdor de la vegetación fue insuficiente para suprimir el mecanismo de radiación. Aunque la correlación albedo–temperatura descendió ligeramente en febrero ($R = 0.80$), la línea de regresión mostró un gran descenso en abril ($R = 0.64$), al final de la temporada de precipitaciones invernales. Después, los meses secos de mayo y junio redujeron los valores de NDVI al mínimo, mientras que la línea de regresión mostró un cambio de pendiente en junio, pasando de una relación albedo–temperatura decreciente (radiación) a una creciente (evapotranspiración) ($R = 0.29$). En junio, el valor umbral de NDVI fue <0.15 .

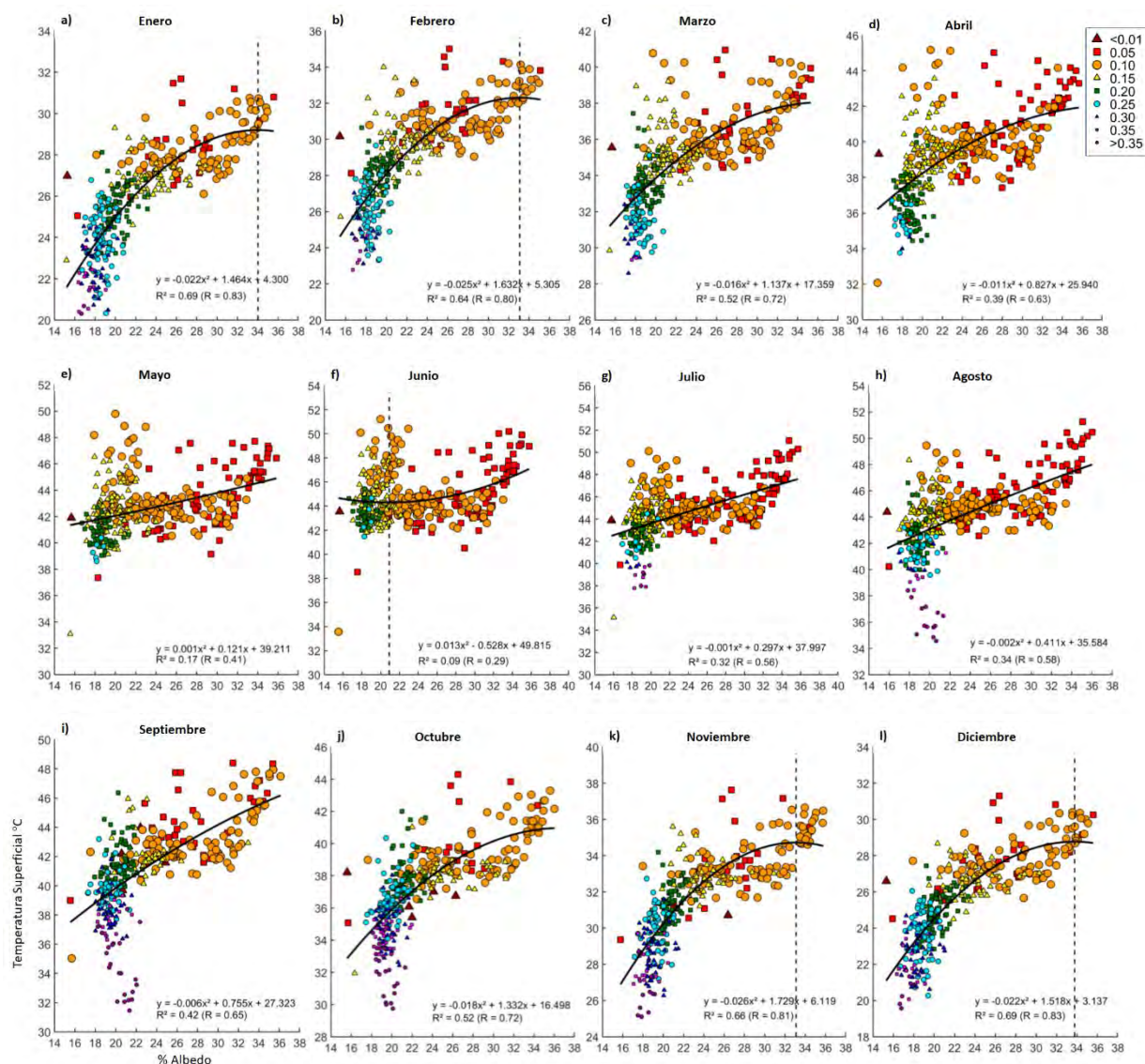


Figura 11. Relación mensual albedo–temperatura superficial en cuadrante 3 (C3). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.

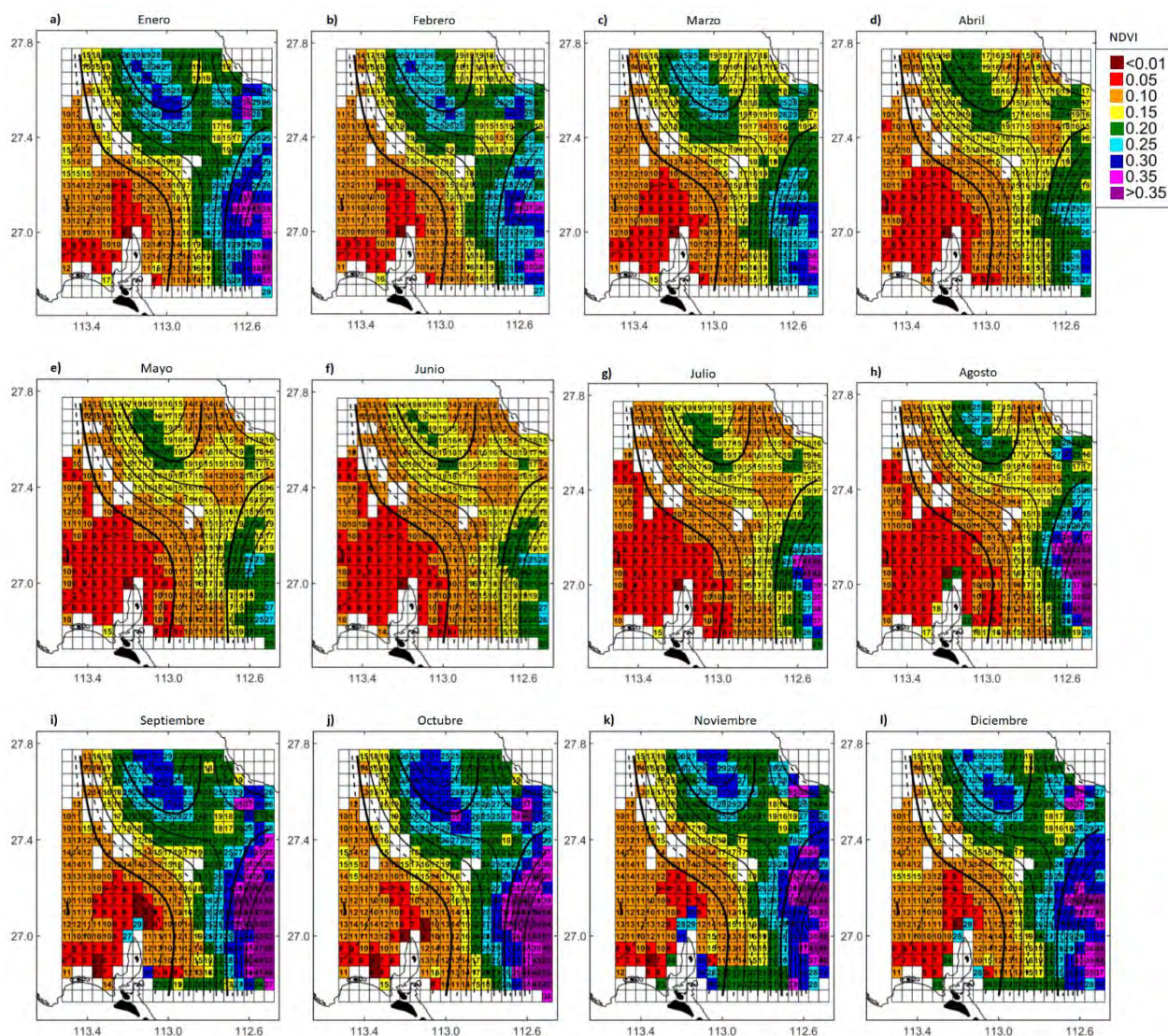


Figura 12. Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 3 (C3) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.

7.3.4 C4

En C4, las líneas de regresión en el ciclo anual mostraron un cambio de pendiente de relación albedo-temperatura que va de ser decreciente a creciente de abril a junio (Fig. 13). Este comportamiento sugiere que el vigor de la vegetación conduce a una transición de los mecanismos de regulación de la temperatura superficial de radiación a evapotranspiración. En estos meses, el punto de pendiente cero de la línea de regresión se desplazó hacia la derecha

coincidiendo con el aumento de albedo y temperatura superficial. En el ciclo anual, para los meses de enero a marzo, el gradiente de los valores de NDVI disminuye (Fig. 14a-c), aunque la vegetación tuvo la capacidad suficiente para suprimir el factor regulador de la temperatura por radiación. No obstante, en el mes de junio, previo a las lluvias de verano, el gradiente de los valores de NDVI alcanzó un mínimo, con un valor umbral de <0.15 en la mayor parte del territorio de C4, lo que indica que la vegetación padeció los niveles de deshidratación severa en este mes (Fig. 13f), y el mecanismo de radiación operó para valores de albedo inferiores al 23 %. El pulso de lluvias de septiembre condujo a una transición de dominancia del factor de radiación al de evapotranspiración ($R = 0.74$) cuando los valores de NDVI manifestaron el máximo gradiente, y el aumento de la humedad del suelo propició el incremento de almacenamiento de fitomasa en la mayor parte de la región.

Al analizar el ciclo anual de NDVI, fue posible apreciar cómo se expresó la vegetación a finales de invierno y principios de verano, mostrando una condición de desecación severa, con valores de NDVI incluso de 0.05 en los meses de mayo-julio (Fig. 14e-g). En los meses de agosto y septiembre, donde se contó con aporte de lluvias en la región fue posible observar la expresión máxima de la vegetación, con valores NDVI >0.30 ; de esta manera se destaca la importancia de la presencia de las lluvias a finales del verano-principios de invierno.

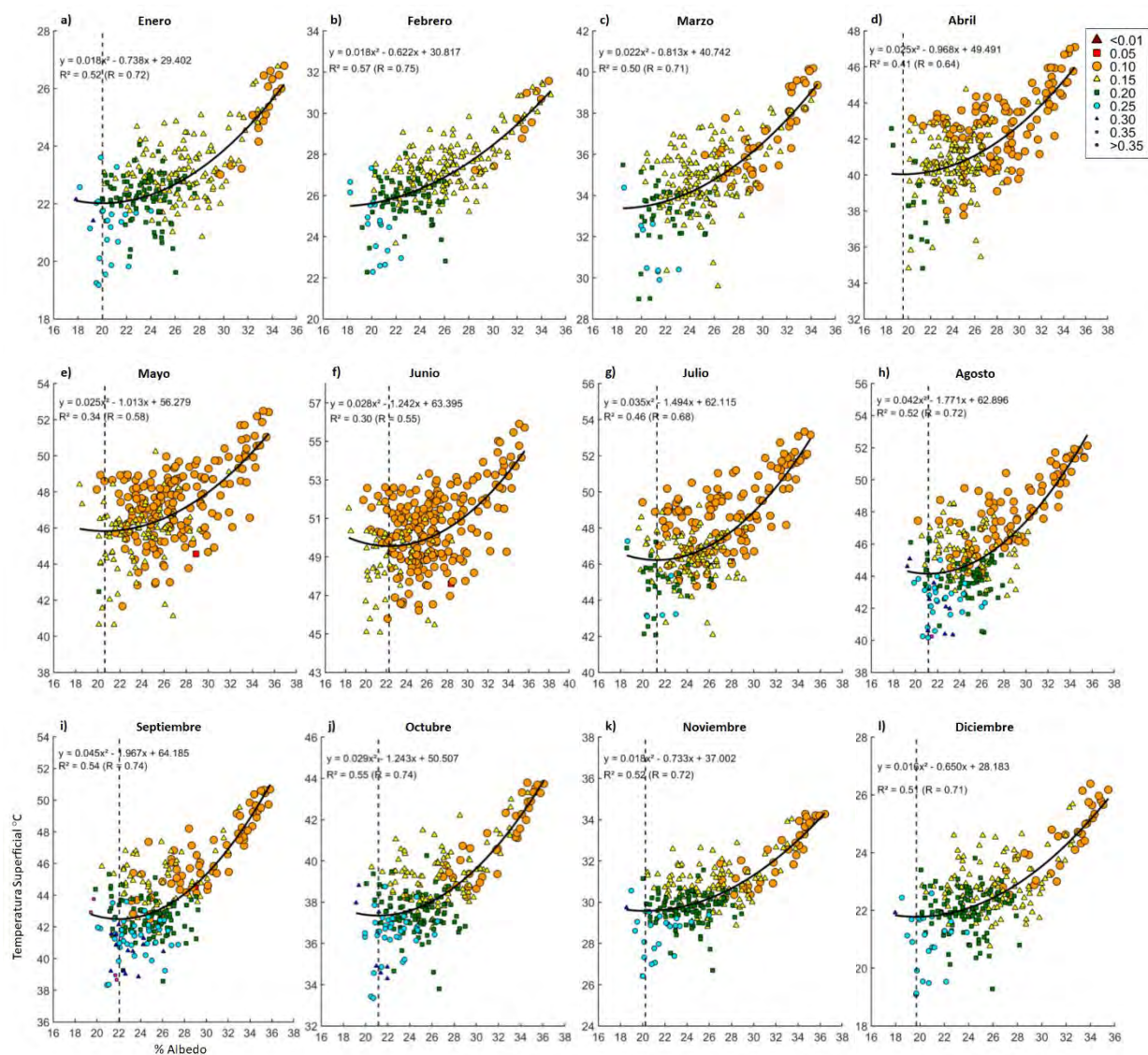


Figura 13. Relación mensual albedo–temperatura superficial en cuadrante 4 (C4). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.

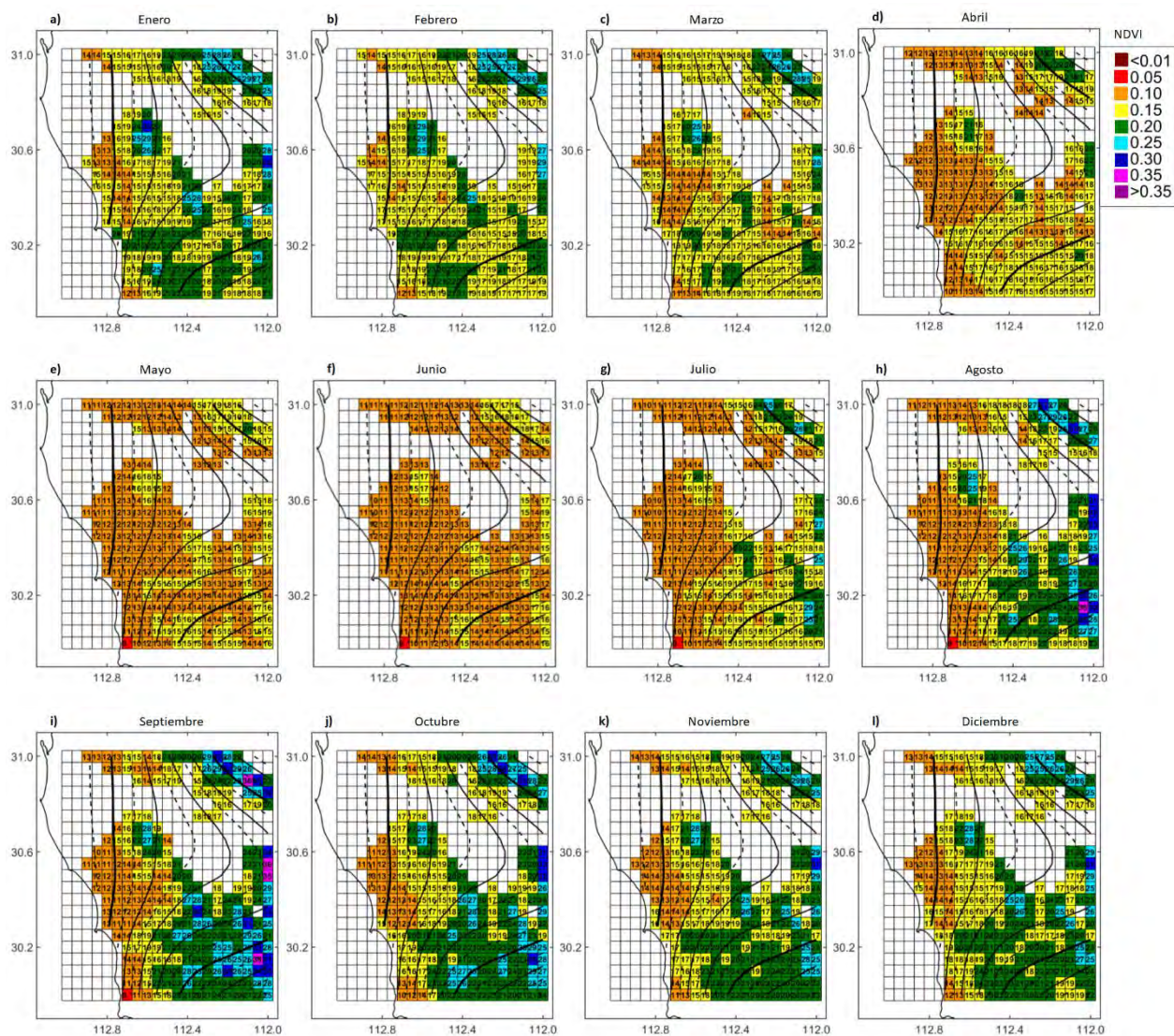


Figura 14. Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 4 (C4) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.

7.3.5 C5

El C5 mostró los valores más altos de albedo y temperatura superficial en verano, lo que resultó consistente con las condiciones más secas propias del Desierto Sonorense, con pocas precipitaciones desigualmente distribuidas, poca humedad, suelos con bajo contenido orgánico y bajos niveles de producción primaria. Por ello, el gradiente de NDVI en C5 se redujo a un mínimo en junio (Fig. 15f) donde el punto de la pendiente de cambio de la línea de regresión mostró un valor umbral de NDVI < 0.10 . Los valores decrecientes del NDVI continuaron en julio,

particularmente en el territorio hiperárido del oeste, pero en este mes no se distingue ningún cambio de punto de pendiente en la relación albedo–temperatura. En este caso, los valores de albedo superiores al 40 % estuvieron relacionados con suelos arenosos y secos. Por su parte, durante los meses de agosto-diciembre (Fig. 15h-l), predominó el mecanismo de evapotranspiración, gracias a que se presentaron valores de NDVI <0.10 . Los valores de NDVI en descenso en los meses de enero a marzo (Fig. 16a-c), representaron un proceso de desecación de las plantas a medida que el punto de pendiente cero de la línea de regresión se desplazaba hacia la izquierda. En estas condiciones el mecanismo de radiación operó durante un corto período.

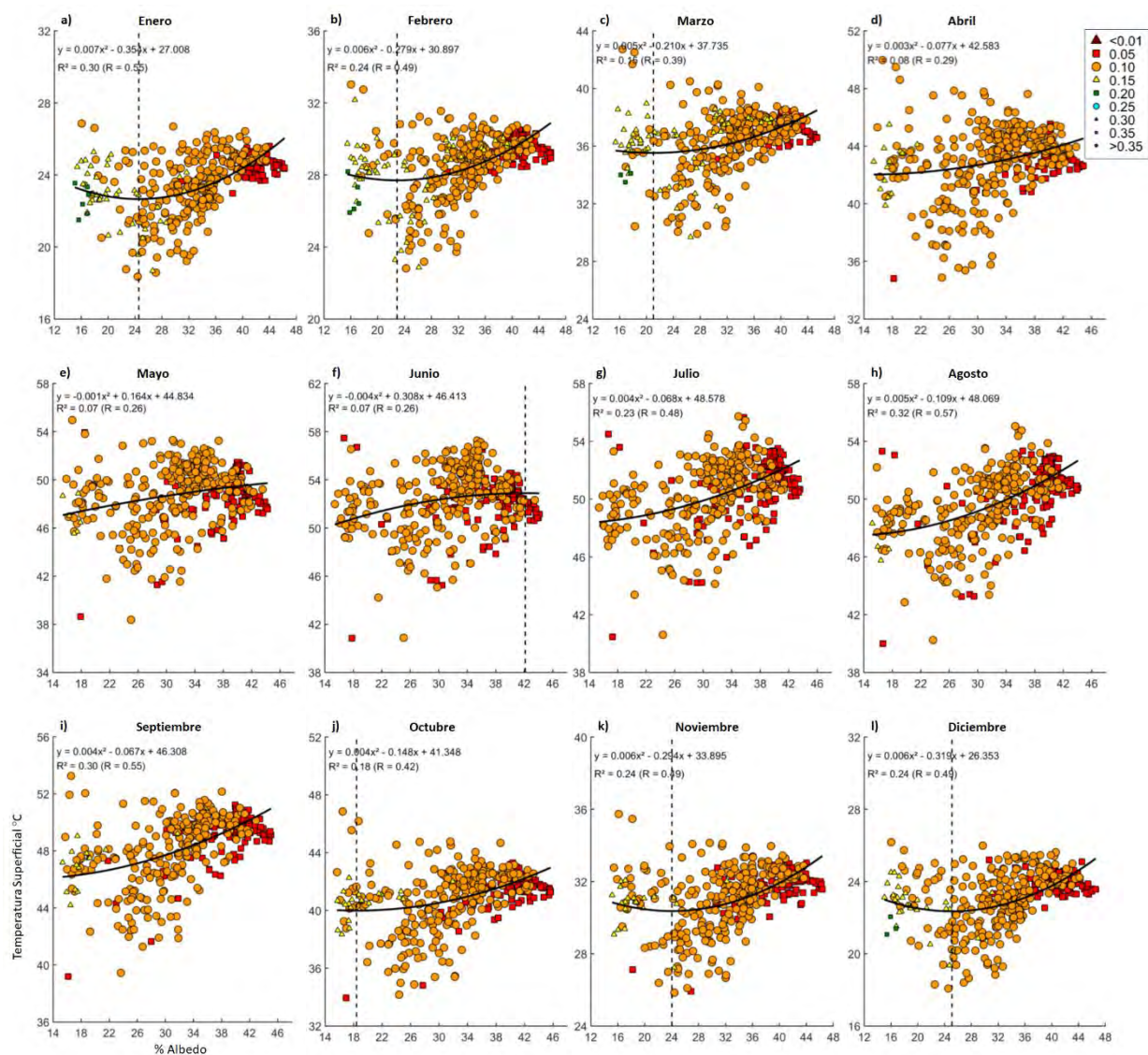


Figura 15. Relación mensual albedo–temperatura superficial en cuadrante 5 (C5). Los puntos a color corresponden a los valores de NDVI superpuestos según el color de la escala del recuadro. La línea discontinua corta la curva de regresión en el punto de pendiente cero.

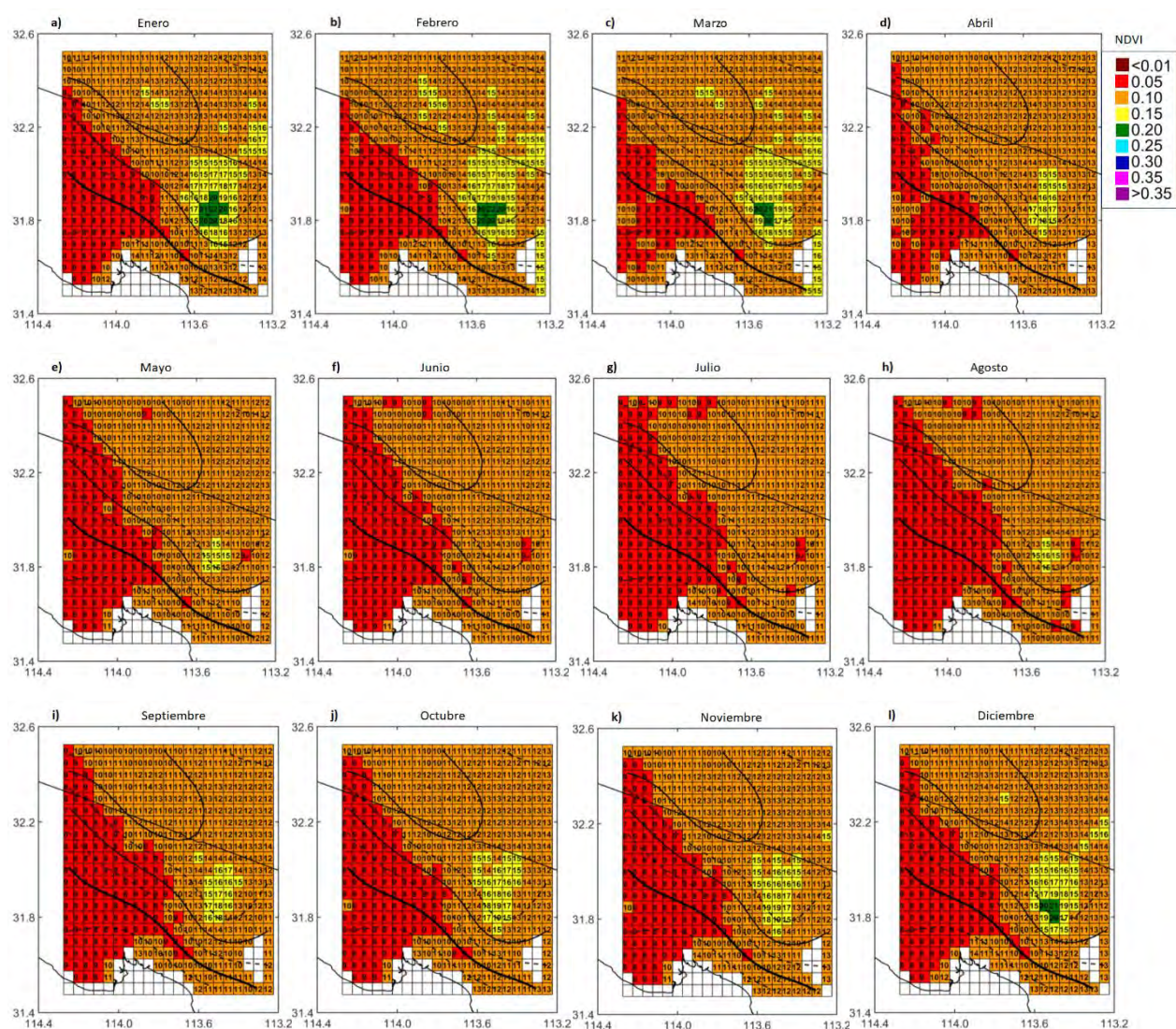


Figura 16. Cambios que experimentan los valores de NDVI en el cuadrante 5 (C5) para cada mes del año. Cada mapa muestra los valores de NDVI multiplicados por 100. Se muestran las elevaciones de terreno cada 25 m (las líneas discontinuas indican 25, 75, 125 m); líneas solidas delgadas: 50, 100 m; líneas solidas gruesas: 100.

Particularmente esta región es la más árida, donde los valores de NDVI fueron muy bajos (< 0.15), en comparación con los encontrados en el resto de los cuadrantes de estudio. Mediante el análisis del comportamiento mensual de NDVI fue posible detectar cómo a lo largo del ciclo anual existen ciertas zonas dentro del mismo cuadrante en donde se tiene expresión de la vegetación con valores NDVI < 0.15 , durante los meses en donde se sabe que existe aporte de lluvias de invierno (ver estación 26096 en Fig. 3), que a medida que se acercó el verano, regresaron a valores mínimos. Tal fue el caso de los meses de agosto-diciembre (Fig. 16), donde

varios pixeles mostraron valores de NDVI elevados aproximadamente en las coordenadas 31.85° N/ 113.5° O y en la zona del Pinacate, un sitio del Patrimonio Mundial de la UNESCO (DOF, 1993).

7.4 Gradientes identificados

Como se observó en las figuras del comportamiento de NDVI para los cuadrantes, fue posible detectar gradientes o zonas que compartían valores NDVI similares (Fig. 17); ante este hecho, con la finalidad de conocer si tales zonas mostraban diferencias estadísticamente significativas en las medias, se realizó un análisis de varianza para las variables de albedo, temperatura superficial y NDVI. A continuación en la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos y la interpretación de los mismos.

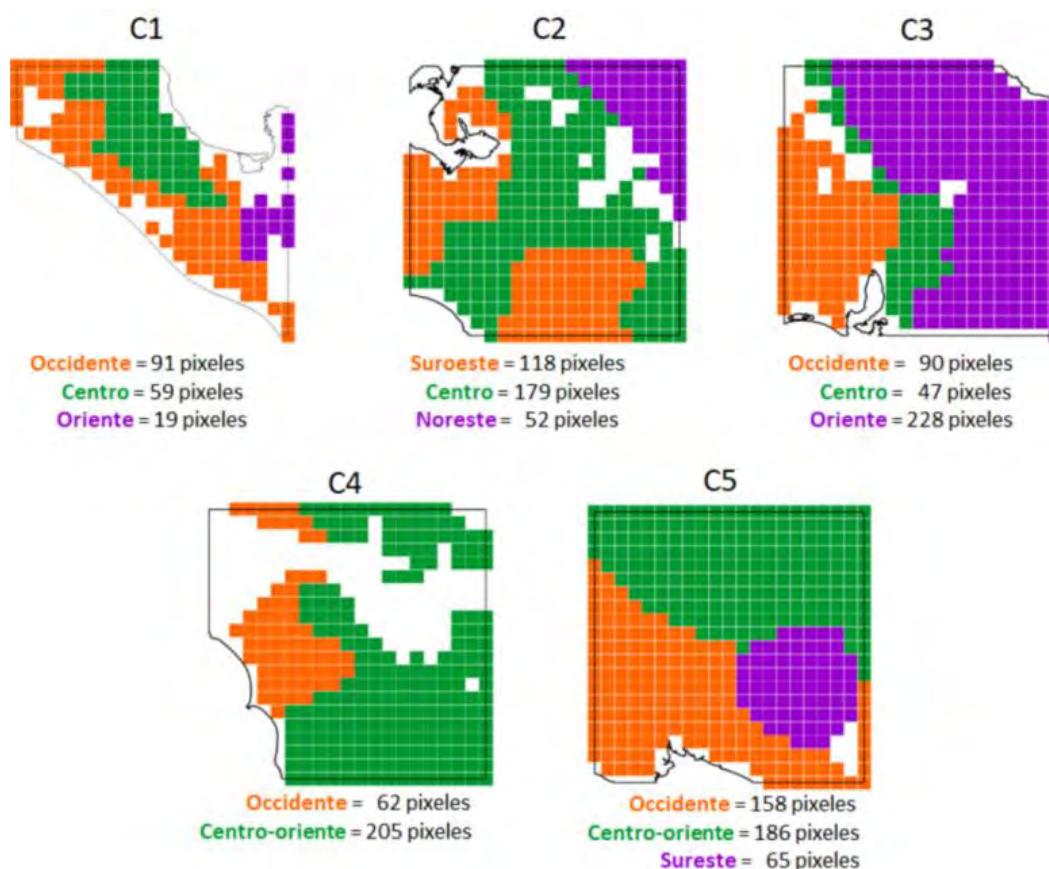


Figura 17. Gradientes identificados al interior de los cuadrantes de estudio.

Tabla 2. Resultados de análisis de varianza (ANOVA) de las variables albedo, temperatura superficial y NDVI en zonas localizadas al interior de los cuadrantes de estudio.

Variable	Cuadrante	Valor F	Valor F tabular	Hipótesis aceptada	Interpretación
albedo	1	11,150.27	> 3.00	H1	Las tres zonas encontradas en el cuadrante 1, 2, 3 y 5 mostraron diferencias estadísticamente significativas
	2	27,882.61	> 3.00	H1	
	3	90,281.61	> 3.00	H1	
	4	42,150.77	> 3.84	H1	
	5	87,440.96	> 3.00	H1	
temperatura superficial	1	86.16	> 3.00	H1	La temperatura en las tres zonas encontradas en el cuadrante 1, 2, 3 y 5 presentó diferencias estadísticamente significativas
	2	652.87	> 3.00	H1	
	3	1,166.54	> 3.00	H1	
	4	776.61	> 3.84	H1	
	5	111.59	> 3.00	H1	
NDVI	1	1,266.35	> 3.00	H1	Las tres zonas encontradas en el cuadrante 1, 2, 3 y 5 mostraron diferencias estadísticamente significativas
	2	4,699.73	> 3.00	H1	
	3	20,550.95	> 3.00	H1	
	4	8,790.44	> 3.84	H1	
	5	9,675.23	> 3.00	H1	

Con un nivel de significancia del 5%

Donde: H0: Zona1=Zona2=Zona3 H1: Zona1≠Zona2≠Zona3

7.5 Modelo de regresión entre albedo y temperatura, por tipo de vegetación y tipo de suelo

En polígonos de vegetación, con significancia estadística ($R \geq 0.50$, $\alpha < 0.05$), el tipo de vegetación de matorral sarcocrasicaule en C1, así como de matorral desértico en C3 y C4, presentaron los cambios más relevantes en la relación albedo–temperatura a lo largo de los meses (Fig. 18). El resto de los polígonos mantuvieron una relación creciente entre albedo y temperatura durante todos los meses, dominando el mecanismo de evapotranspiración. El matorral sarcocrasicaule mostró una relación decreciente al final de la temporada seca en C1, que fue más evidente en el mes de junio (Figura 18a), lo que indicó una dominancia del factor de radiación en la modulación de la temperatura superficial; en diciembre el mecanismo de modulación cambió, teniendo como resultado una relación albedo–temperatura superficial creciente, con un valor $R = 0.69$ (Figura 18b). Por su parte, el matorral desértico en C3, mostró en la temporada de verano correlaciones altas, con la característica de que la línea de regresión mostró un cambio representado por una relación decreciente para valores de albedo $< 24\%$ y creciente, para valores de albedo $> 28\%$. Este cambio fue más notorio en el mes de mayo (Figura 18c), donde se manifestó el mecanismo de radiación en algunos puntos del área que cubre el polígono de matorral desértico, y otros en los que por el contrario, domina el mecanismo de evapotranspiración. Este resultado indicó que, particularmente en este mes, la

vegetación sufre el proceso de desecación en ciertas áreas cuyos valores de albedo son $< 24 \%$, mientras que al presentarse valores $< 25 \%$, el matorral desértico se recupera, llevando a cabo el proceso de evapotranspiración. Analizando las condiciones secas del mes de mayo, dio soporte para considerar este mes como de transición, donde se manifestaron ambos mecanismos de modulación. En el mes de noviembre (Figura 18d), cuando inició la época de invierno, la relación albedo–temperatura fue creciente. Un comportamiento similar al observado en C3 en el mes de mayo se observó en C4 bajo el mismo tipo de vegetación, pero en agosto (Figura 18e) y octubre (Figura 18f), aunque el valor de la correlación fue menor en ambos casos que el observado en C3. En los meses de invierno la relación albedo–temperatura fue creciente, dominando el mecanismo de evapotranspiración.

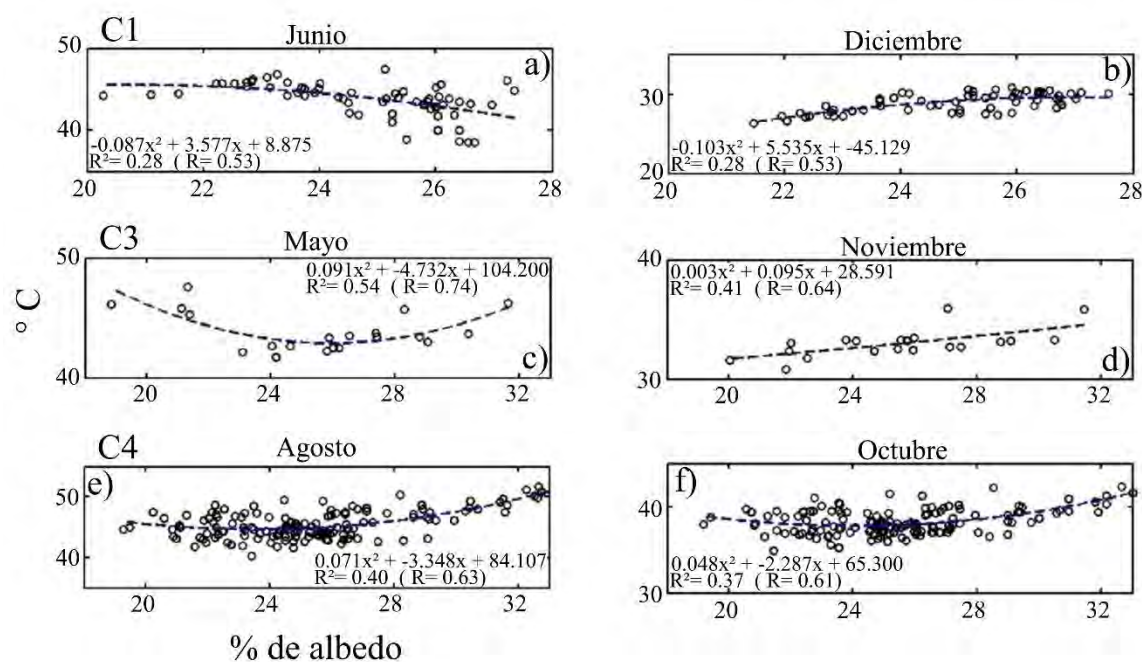


Figura 18. Relaciones entre albedo y temperatura en áreas de matorral sarcocaulé y matorral desértico en C1, C3 y C4.

Respecto a los polígonos de suelo, con relaciones albedo–temperatura superficial estadísticamente significativas ($\alpha < 0.05$), los suelos de tipo Regosol calcárico y Regosol éutrico (en C1), Yermosol háplico (en C2 y C3), y Vertisol crómico (en C3), fueron los que mostraron cambios en la pendiente de la línea de regresión a lo largo de los meses del año. La relación de los polígonos restantes se mantuvo con relaciones crecientes, indicando que la modulación de la temperatura superficial estuvo dada por el mecanismo de evapotranspiración.

El suelo Regosol calcárico en C1 mostró durante el mes de enero una relación creciente evidente ($R = 0.90$) (Figura 19a); mientras que al final de la época seca, en el mes de junio, la relación cambió y pasó a ser decreciente (Figura 19b). Esto representó un caso típico en el que el factor de evapotranspiración dominó la modulación de la temperatura durante invierno, mientras que el factor de radiación dominó al final de la época seca, cuando las plantas están mayormente deshidratadas. El tipo de suelo Regosol éútrico en el mismo cuadrante, mostró que en el mes de enero la relación entre albedo y temperatura fue creciente (Figura 19c); mientras que en octubre, se tuvo un cambio en la relación, pasando de ser creciente para valores $\leq 25\%$ de albedo y decreciente para valores $> 25\%$ de albedo (Figura 19d).

Al tener presencia de suelos de tipo Yermosol háplico, la correlación entre albedo y temperatura fue mayor en diciembre y enero ($R = 0.80$), manteniendo una relación creciente; durante los meses de verano existieron cambios pocos perceptibles de transición. En C3, bajo condiciones de suelo tipo Vertisol crómico, al inicio del verano (mayo-junio) se observó una relación decreciente entre albedo y temperatura (Figura 19e), misma que fue cambiando en los siguientes meses a creciente (septiembre-febrero) (Figura 19f).

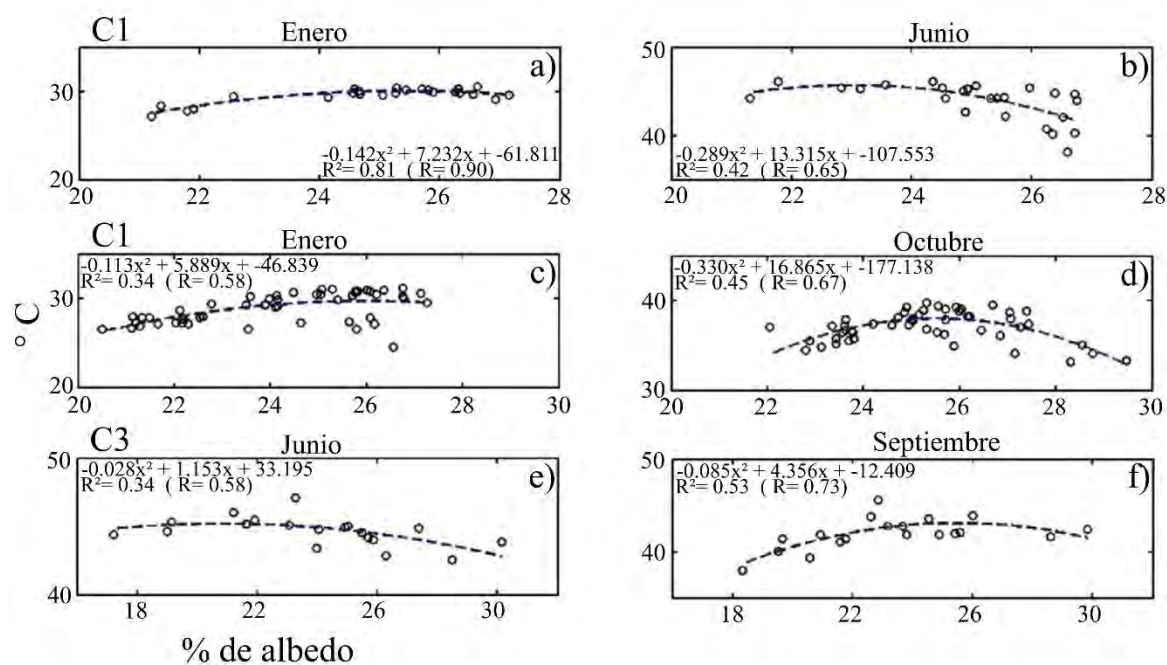


Figura 19. Relaciones entre albedo y temperatura en suelos tipo Regosol calcárico, Regosol éútrico y Vertisol crómico en C1 y C3.

8. DISCUSIÓN

La caracterización de los diferentes escenarios biológicos dio un panorama sobre cómo es la composición de cada cuadrante, evidenciando que, a pesar de pertenecer a una zona árida, el gradiente latitudinal muestra cualidades únicas según sea la posición geográfica. Se pasa de una zona favorecida por la influencia de ciclones tropicales, como es el caso de los cuadrantes ubicados en la península de Baja California (C1-C3), a zonas con marcada aridez, e inclusive áreas con presencia de rocas volcánicas, que permiten observar condiciones de temperatura extrema, como el caso de la región noroeste de Sonora (C4 y C5).

Los resultados obtenidos del análisis del ciclo intra-anual de las variables capturaron los gradientes latitudinales reportados por otros autores (Salinas-Zavala *et al.*, 2002; Tereshchenko *et al.*, 2012; Zolotokrylin *et al.*, 2016, Gaxiola-Morales y Brito-Castillo, 2019). Por ejemplo, las diferencias de los valores de albedo entre cada cuadrante tuvo consistencia con las condiciones de gradiente altitudinal del cuadrante; la literatura indica que el porcentaje de albedo varía de acuerdo a las características de los objetos o área donde se requiere conocer el valor de albedo, dichas características pueden ser presencia de vegetación, rugosidad del terreno, presencia de materia orgánica, humedad, posición geográfica entre otras.

La amplitud mostrada en el ciclo intra-anual en C5 para la temperatura fue un resultado consistente con las condiciones de aridez extrema observadas en esa zona; de igual manera, en C1, las condiciones de amplitud baja estuvieron relacionadas con el control térmico del agua de mar del Golfo de California y del Pacífico a ambos lados del cuadrante. Para los cuadrantes intermedios, fue posible observar claramente el gradiente térmico de norte a sur. Los periodos de sequía anual identificadas en las series de precipitación, fueron consistentes con lo reportado previamente por Zolotokrylin *et al.* (2016).

Los mayores valores de NDVI y la mayor amplitud en octubre en C1, se atribuyen al paso de los ciclones tropicales, que alcanzan su posición septentrional máxima en septiembre (Farfán *et al.*, 2015) y la llegada a la zona de tormentas organizadas, conocidas como Sistemas Convectivos de Mesoescala (Farfán *et al.*, 2020). Una reacción visible de estas importantes fuentes de humedad

es el descenso de las temperaturas superficiales que se apreciaron en septiembre en C1, y el gran aumento de NDVI en octubre tras el aumento de la humedad del suelo, tal y como reportaron Forzieri *et al.* (2011, 2014).

El análisis de regresión entre albedo y temperatura superficial en diferentes sectores del Desierto Sonorense mostró cambios muy significativos asociados a las diferencias locales en cada cuadrante seleccionado, en cada caso resultando estadísticamente significativos. Una clara comprensión de las relaciones albedo–temperatura es útil para dilucidar los valores umbrales del NDVI que sirven como mecanismo de cambio entre los factores de radiación y evapotranspiración en diferentes regiones del desierto y, en consecuencia, para proporcionar un indicador para monitorear las condiciones del desierto. En los cuadrantes C1-C5 se encontraron diferentes configuraciones en las relaciones albedo–temperatura.

En C1, la relación albedo–temperatura se mostró cambiante en el ciclo regular anual, revelando algunos meses considerados de transición, donde la modulación cambió del mecanismo de evapotranspiración al de radiación; estos cambios se atribuyen principalmente al ingreso de fuentes de humedad asociados al paso de los sistemas de latitudes medias y sus frentes extratropicales (Jáuregui, 1995). De acuerdo con Maderey (1975), la distribución de la humedad en la península de Baja California, se debe a la humedad de los vientos que invaden la región, proveniente principalmente del Oeste y de ciclones tropicales. La influencia de los vientos del Oeste tiene lugar en invierno, cuando las perturbaciones atmosféricas propias de las latitudes medias afectan a la región noroeste de la península.

El mes de abril condujo a la pérdida de turgencia en la vegetación, mientras que en octubre se experimentó un aumento de la humedad del suelo y reverdecimiento de la vegetación. En ambos meses, el punto de cambio de pendiente en la regresión pasa de una relación creciente (para valores de albedo de <23.9% en abril y de <25.8% en octubre) a una relación decreciente. El comienzo de la estación seca de principios de verano en C1 fue en abril hasta junio. A medida que el tiempo avanza, la modulación de la temperatura superficial, a cargo del factor de evapotranspiración, se vuelve menos eficaz, mientras que el predominio del factor de radiación

incrementa. El valor umbral del NDVI en junio fue <0.15 , cuando el factor de radiación está notoriamente establecido y el noroeste del cuadrante 1 experimenta una grave sequedad. En la mayor parte del territorio, los valores de NDVI de <0.20 fueron comunes, con excepción de una pequeña porción al sureste cuyos valores de NDVI fueron ≥ 0.20 . La causa de estos elevados valores de NDVI, podrían atribuirse al flujo de humedad en forma de niebla transportada hacia el interior por los vientos superficiales procedentes del Pacífico durante estos meses (Morales-Acuña *et al.*, 2019). En octubre, la mejora de las condiciones de humedad del suelo debida a las lluvias de julio-septiembre se traduce en un aumento de los valores de NDVI hasta >0.30 . El cambio en la fitomasa se produce en pequeñas áreas de vegetación escasa con parches circundantes de suelo desnudo que, según los altos valores de albedo, aparentemente se secan muy rápidamente a lo largo de un eje central noroeste-sudeste. En este caso, los valores altos de NDVI (>0.30) están relacionados con temperaturas superficiales más bajas en relación con valores de NDVI más bajos. Los valores de umbral del NDVI de 0.25 para temperaturas superiores a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ fueron indicativos de que la sequedad de las plantas en octubre-enero fue menos severa en comparación con la sequedad producida en abril-junio y, por tanto, disminuyeron las posibilidades de potenciar las condiciones desérticas.

En C2 se observó que domina la relación albedo–temperatura de la superficie durante todo el año y, por tanto, está relacionado con el factor de evapotranspiración. Aunque no se observa ningún mecanismo de cambio al factor de radiación en el ciclo anual, los valores bajos de NDVI de <0.10 son evidentes todo el año. Según las observaciones de precipitación, este cuadrante es el más seco en comparación con los demás. De acuerdo con Zolotokrylin *et al.* (2016) y Vanderplank y Ezcurra (2020), la presencia de brisas marinas frescas y húmedas con frecuentes nieblas mejoran las condiciones de aridez en esta zona. El escaso dosel tiene suelos que se secan rápidamente después de las lluvias, lo que induce un aumento de la temperatura con un mayor albedo. Las menores tasas de evapotranspiración durante el período de sequía en abril-junio se equilibra con un mayor flujo de calor sensible, aumentando así las temperaturas del aire; al mismo tiempo, la radiación solar entrante llega a la superficie de manera más eficiente, ya que la vegetación seca reduce su uso para llevar a cabo la transpiración y la fotosíntesis,

elevando así la temperatura superficial. Por tanto, los valores de NDVI de <0.10 en C2 son indicativos de condiciones extremadamente secas.

En C3 se observa el caso típico en el que el factor de evapotranspiración domina el ciclo anual. Las superficies con más vegetación hacia el noroeste de la zona están asociadas a una mayor evapotranspiración y, por tanto, son más frías que las zonas con menos vegetación hacia el sureste (Forzieri *et al.*, 2011). Cabe destacar que los grupos de valores de NDVI superpuestos a la relación emparejada albedo–temperatura superficial se organizaron de tal manera que los valores más bajos correspondieron tanto a valores mayores de albedo como a mayores temperaturas superficiales, y viceversa. Este gradiente de NDVI se mantiene incluso en junio, justo antes de la llegada de las lluvias, cuando las condiciones son extremadamente secas en la llanura costera y los valores umbral de NDVI <0.15 son evidentes. Las lluvias de julio dan lugar a un mayor reverdecimiento en las zonas más altas, mientras que la llanura costera sigue secándose y sólo reverdece tras el pulso de lluvias de agosto. Esta condición es indicador de que los retrasos en las lluvias y los periodos más largos de sequía impactan en la vegetación situada en las llanuras costeras. Por tanto, en C3, el valor umbral del NDVI de <0.15 es indicativo de un aumento de las condiciones desérticas en la zona.

El C4 es otro caso en el que el factor de evapotranspiración domina en todos los meses, aunque aquí a diferencia de C3, el punto de cambio de pendiente es un mínimo. En junio, cuando las condiciones son muy secas, los valores de NDVI caen al mínimo y el valor umbral de NDVI de <0.15 es evidente en toda la zona. Aunque este valor umbral es un poco mayor que los reportados en Tereshchenko *et al.* (2012) [0.08 ± 0.01], la diferencia podría explicarse por el período más corto de análisis y la menor resolución de los píxeles de la cuadrícula ($16 \text{ km} \times 16 \text{ km}$) que da lugar a valores más suavizados en Tereshchenko *et al.*, (2012).

En C5, el aumento de las relaciones entre el albedo y la temperatura superficial dominó el ciclo anual, pero fue más claro en los meses de julio-septiembre durante el periodo de lluvias. Este resultado concuerda con los hallazgos reportados por Jackson e Idso (1975), Balling (1988) y Bryant (1990), quienes encontraron que la disminución de la cobertura vegetal en el lado

mexicano de la frontera entre Estados Unidos y México del Desierto Sonorense corresponde tanto al aumento del albedo como de las temperaturas superficiales. Las temperaturas ligeramente más frías, consistentes con valores más altos de NDVI (de diciembre a abril) y valores más bajos de albedo en un área muy limitada del C5, fueron resultado de las lluvias de invierno. Este resultado fue indicador de que las lluvias de invierno fueron de mayor importancia biológica que las de verano para esta zona en particular. Habitualmente, las lluvias de finales de invierno y principios de primavera ayudan a mantener el desierto hasta que llegan las lluvias de verano (Salinas-Zavala *et al.*, 2002), sin embargo, en junio, cuando las condiciones son extremadamente secas, los valores umbrales de NDVI de <0.10 cubren un amplio territorio al oeste en el hiperárido Gran Desierto de Altar.

Los gradientes descritos en este trabajo en los cuadrantes seleccionados desde zonas costeras hasta las zonas de mayor elevaciones son consistentes con lo que se reportó anteriormente por González-Abraham *et al.*, (2010), quienes indican la existencia de un gradiente de norte a sur, debido a la presencia del clima en el noroeste y tropical del sur, con una amplia región de transición entre zonas, así como un gradiente de este a oeste, resultado de la combinación de la cadena montañosa y la influencia de masas de agua marina fría en el Pacífico y cálida en el Golfo de California.

La caracterización de la vegetación y suelo de los cuadrantes seleccionados indicó que comparten la característica de poseer suelos de tipo Regosol mezclados con variantes de otros tipos; por su parte la vegetación, a pesar de ser una zona árida, difieren en los tipos encontrados tanto en la zona peninsular, como la porción árida de Sonora. Como se apreció en el análisis de regresión no lineal entre albedo y temperatura superficial, considerando los tipos de vegetación y suelo, fue posible observar la relación creciente en los meses donde se tuvo presencia de humedad, así como una relación decreciente durante la temporada seca; esto indicó que al existir precipitación o fuentes de humedad, la vegetación se torna vigorosa y derivando en que la modulación de la temperatura superficial está a cargo del factor de evapotranspiración. Sin embargo, los resultados no son consistentes en todos los cuadrantes ni en todas las épocas, pero aun así, arrojan un poco de luz para futuros estudios de sequía en la región, pues los valores de albedo indicadores del cambio, pueden ayudar a entender mejor las

temporadas en que inicia el período seco que eventualmente se puede convertir en una sequía. De acuerdo a la Guía para la Interpretación de Cartografía Edafológica de INEGI (2014), las características de los tipos de suelo Regosol calcárico, Regosol éutrico, Yermosol háplico y Vertisol crómico, dan sustento a los tipos de relaciones encontradas, debido a que son suelos que permiten retener la suficiente cantidad de agua para que la vegetación establecida en ellos, pueda evapotranspirar en la temporada de invierno, pero que al incrementarse la temperatura en verano, disminuye la humedad en la capa superficial, llevando a la vegetación a un punto de estrés hídrico.

9. CONCLUSIONES

El albedo y las temperaturas superficiales se relacionan de forma diferente en el Desierto Sonorense y, dependiendo de la humedad del suelo y la respuesta de la vegetación, se pueden encontrar relaciones directas (es decir, los aumentos del albedo corresponden a temperaturas más altas) o inversas (donde los aumentos del albedo corresponden a temperaturas más bajas).

El mecanismo de cambio entre ambos comportamientos es el valor umbral de NDVI; este valor umbral representa el límite de la condición de la planta hacia una desecación severa, cuando la pendiente de cambio en la línea de regresión es de configuración creciente a decreciente. En esta situación, la acentuación de las condiciones desérticas es posible si las lluvias llegan tarde, o cuando las condiciones atmosféricas dan lugar a una sequía prolongada. Estas condiciones son favorables para el mecanismo de retroalimentación del albedo, que se revela sólo en circunstancias de vegetación muy reducida, lo que a su vez contribuye al proceso de desertificación. El análisis de las relaciones albedo–temperatura superficial–NDVI en todos los cuadrantes estudiados del Desierto Sonorense reveló que los valores umbral de <0.10 son típicos de las zonas más áridas de C2 y C5. Las zonas restantes, y con más humedad, de C1, C3 y C4 experimentan valores umbrales de <0.15 . Los cuadrantes C3 y C4 muestran ciclos de NDVI intra-anales muy similares, pero C4 recibe más precipitaciones que C3. En ambos casos, el gradiente de los valores de NDVI es evidente en la línea de regresión, aunque en C4 el valor umbral de NDVI es mínimo en junio, cuando el mecanismo de radiación opera para valores de albedo de $<23\%$; en el caso de C3, es un punto máximo, y es detectable entre noviembre y febrero, durante la temporada de invierno.

Por último, en C1, el ciclo anual entre abril y octubre revela una clara transición entre los factores de radiación y evapotranspiración cuando la amplitud de la mitad izquierda del albedo está positivamente correlacionada con las temperaturas superficiales y la amplitud de la mitad derecha muestra una correlación negativa. Las diferentes condiciones de humedad del suelo y el verdor de la vegetación entre ambos meses indican que el mecanismo de radiación en C1 predomina de mayo a junio, lo que significa que este periodo es más propenso a aumentar las condiciones desérticas.

Se concluye que el valor umbral de NDVI, basado en la relación albedo–temperatura, cambia de una zona a otra de acuerdo a las condiciones biológicas propias del entorno, la ocurrencia de fenómenos como periodos de sequía, así como patrones de precipitación. Valores umbrales de NDVI <0.10 fueron típicos de zonas más áridas (cuadrante 2 y 5); zonas más húmedas experimentaron valores umbrales de NDVI de <0.15 (cuadrantes 1, 3 y 4, respectivamente).

Los valores umbrales de NDVI encontrados fueron un poco mayor que los reportados en Tereshchenko *et al.* (2012) [0.08 ± 0.01], la diferencia podría atribuirse al período más corto de análisis y la menor resolución de los píxeles de la cuadrícula utilizados por los autores, lo cual propicia valores más suavizados.

Los resultados de esta investigación, además de ser útiles para el desarrollo de mejores prácticas de gestión y conservación de los recursos en el Desierto Sonorense, pueden ser de interés para los responsables de toma de decisiones aplicados al monitoreo de la sequía y modulación de la temperatura superficial, considerando la metodología utilizada como una herramienta alternativa y práctica, que puede ser aplicada en distintas zonas regiones geográficas.

10. LITERATURA CITADA

Agencia Informativa CONACyT (2017). Crean nuevo Monitor de Sequía Multivariado en México. Ciudad de México. Disponible en: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/16402-crean-nuevo-monitor-sequia-multivariado-mexico>

Balling, Jr. (1988). The climatic impact of a Sonoran vegetation discontinuity. *Climatic Change*, 13: 99–109. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00140163>

Bryant, N.A., Johnson, L.F., Brazel, A.J., Balling, R.C., Hutchinson, Ch.F. y Beck, L.R. (1990). Measuring the effect of overgrazing in the Sonoran Desert. *Climatic Change*, 17:243–264. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00138370>

Búrquez, M. y Castillo, S. (1993). *Sistema de áreas naturales protegidas del estado de Sonora (SANPES). Propuesta para decretar la Reserva de la Biosfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar, municipios de Puerto Peñasco, General Plutarco Elías Calles y San Luis Río Colorado, Sonora*. Vols. I y II. Centro de Ecología, Estación Noroeste, de la UNAM/CES.

Castillo, N. (2014). Sequías intensas que han azotado a México. UNAM con Ciencia. Universidad Autónoma de México. Disponible en: http://ciencia.unam.mx/leer/300/Sequias_intensas_que_han_azotado_Mexico

Charney, J.G. (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 101(193-202).

Cody, K., Hayes, M. y Philips, T. (1998). How to reduce drought risk. Ed. Western Drought Coordination Council, USA.

Del Toro-Guerrero, F.J. y Kretzschmar, T. (2020). Precipitation-temperature variability and drought episodes in northwest Baja California, México. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100653. doi:10.1016/j.ejrh.2019.100653

Didan, K. (2015). *MOD13C2 MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V006* [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13C2.006

Dimmitt, M., Wentworth, P. y Brewer, L. (2015). *A natural history of the Sonoran Desert*. 2nd edition. Tucson: Arizona-Sonora Desert Museum. University of California Press.

Dobos, E. (2003). Albedo. *Encyclopedia of Soil Science*. DOI: 10.1081/E-ESS 120014334

Douglas, M.W., Maddox, R.A., Howard, K. y Reyes, S. (1993). The Mexican Monsoon. *Journal of Climate* 6:1665-1677.

Esquivel, E. (2002). Lluvia y sequía en el norte de México. Un análisis de la precipitación histórica en Chihuahua. *Gaceta Ecológica*, núm. 65, pp. 24-42. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Evenari, M. (1999). The Desert environment. Criteria of delimitation. *Hot Deserts*. Chapter 1. Page: 1-19.

Ezcurra, E., Peters, E., Búrquez, A. y Mellink, E. (2002). Los Desiertos de Sonora y Baja California. Mittermeier, R.A, Goettsch-Mittermeier, C., Robles Gil, P., Pilgrim, J., Fonseca, G., Brooks, T.Y., Kosntant, W.R. (Eds). *Áreas Silvestres: Las últimas regiones vírgenes del mundo*. CEMEX/Agrupación Sierra Madre. México DF. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/368.pdf>

Farfán, L.M., Prieto, R., Martínez-Sánchez, J. y Padilla, R. (2015). Capítulo 2: ciclones tropicales y su influencia en México. En T. Cavazos (Ed) *Conviviendo con la naturaleza: El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México*. REDESClim, México, Ediciones ILCSA, pp. 47-76.

Farfán, L.M., Barret, B.S., Raga, G.B. y Delgado, J.J. (2020). Characteristics of mesoscale convection over northwestern Mexico, the Gulf of California, and Baja California Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 1-23. DOI: 10.1002/joc.6752.

Forzieri, G., Castelli, F. y Vivoni, E.R. (2011). Vegetation dynamics within the North American monsoon region. *J. Clim.*, 24, 1763-1783. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCL13847.1>.

Forzieri, G., Feyen, I., Cescatti, A. y Vivoni, E.R. (2014). Spatial and temporal variations in ecosystem response to monsoon precipitation variability in southwestern North America. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 119, 1999-2017. <http://dx.doi.org/10.1002/2014JG002710>.

Garcillán, P.P., González-Abraham, C.E. y Ezcurra, E. (2010). The cartographers of life: two centuries of mapping the natural history of Baja California. *Journal of the Southwest* 52(1): 1:40.

Gaxiola-Morales, M.G. y Brito-Castillo, L. (2019). Análisis de los factores de radiación-evapotranspiración en el Desierto Sonorense. *Rev. Biotecnia / XXI* (2): 137-144.

Goldstein M.I. y Dellasala, D.A. (2020). *Encyclopedia of the world's biomes*. Elsevier Inc., Vol.2, pp. 23-35. <https://doi.org/10.1016/B-978-0-12-409548-9.11803-2>

González-Abraham, C., Garcillán, P. y Ezcurra, E. (2010). Ecorregiones de la península de Baja California: Una síntesis. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (87), 69-82.

Grenade, de R. y Stevens, L.E. (2020). Desert oasis springs: ecohydrology, biocultural diversity, mythology, and societal implications. In Goldstein M.I., Dellasala, D.A. (Eds.), *Encyclopedia of*

the world's biomes. Elsevier Inc., Vol 2, pp. 36–46. <https://doi.org.10.1016/B-978-0-12-409548-9.11951-7>

Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P. y Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6). DOI:10.1029/2006gl029127

Hartman, W.K. (1989). *Desert heart. Chronicles of the Sonoran Desert*. Fisher Books, Tucson, Arizona.

Higgins, R.W., Douglas, A.V., Hahmann, A., Berbey, E.H., Gutzler, D., Shuttleworth, J., Stensrud, D., Amador, J., Carbone, R., Cortez, M., Douglas, M.W., Lobato, R., Meitin, J., Ropelewski, Ch., Schemm, J., Schubert, S. y Zhang, Ch. (2003). Progress in Pan American CLIVAR research: the North American monsoon system. *Atmósfera* 16(1): 29-65.

INECC. (2007). Reserva de la Biosfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/2/pinacate.html>

INEGI. (2013a). Regiones naturales y biogeográficas de México. INEGI, Dirección de capacitación. 19-22.

INEGI. (2013b). Carta de Uso de Suelo y Vegetación. Serie continua V. 1:250,000. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapas/>

INEGI. (2014). Guía para la Interpretación de Cartografía: Edafología. Escala 1:250,000. Serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 69 p.

INIFAP-CONABIO. (1995). Mapa edafológico. Escala 1:250,000 y 1:1,000,000. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias/Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Ivanova A. y Gámez, A.E. (2012). *Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático para Baja California Sur (PEACC-BCS)*. Baja California Sur, México: UABCS, CIBNOR, CICESE, CICIMAR, SEMARNAT, CONACyT, INE. Disponible en: <https://cambioclimatico.gob.mx/wp-content/uploads/2018/11/Documento-1-Plan-Estatal-de-Acci%C3%B3n-Baja-California-Sur-2012.pdf>

Jackson, R.D. e Idso, S.B. (1975). Surface albedo and desertification. *Science*, 189(4207):1012–1015. DOI: 10.1126/science.189.4207.1012.

Jáuregui, E. (1995). Rainfall fluctuations and tropical storm activity in Mexico. *Erkunde* (49): 39-48.

Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G. y Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. *Journal of Climate*, 23(3), 618–633. doi:10.1175/2009jcli2900.1

Keyantash, J. y Dracup, J. (2002). The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*. pp 1177-1180.

Kogan, F. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 621-636.

Lawrimore, J., Heim, R., Svoboda, M., Swail, V. y Englehart, P. (2002). Beginning a new era of drought monitoring across North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1191-1192.

MacMahon, J. y Wagner, F. (1985). The Mohave, Sonoran and Chihuahuan Deserts of the North America. In *Hot Deserts*. Chapter 5. Pages: 105-128.

Maderey, L. (1975). La humedad y la vegetación en la península de Baja California. *Investigaciones geográficas*, (6), 73-85.

Magaña, V. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. En: Martínez, J. y Fernández, A., (comps.). *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. pp. 17-27.

Marrero, M. (2011). Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales. Universidad de Granada. España. Tesina. Disponible en: <http://www.ugr.es/~andyk/Theses/TesinaMaria.pdf>

Martínez, J. (2017). ¿Qué sabemos de? Los desiertos y desertificación. Ed. Catarata. Madrid, España. ISBN: 978-84-00-10190-9

Martínez-Yrizar, A., Felger R.S. y Búrquez A. (2010). Los ecosistemas terrestres: un diverso capital natural. In Molina-Freaner, F.E., Van DeVender, T.R. (Eds.), *Diversidad Biológica de Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México, México City, pp. 129–156

Millano, J. y Paredes, F. (2016). Variabilidad de la Vegetación con el Índice de Diferencia Normalizada (NDVI) en Latinoamérica. *Novum Scientiarum*, 2(4), 33-44.

Morales-Acuña, E., Torres, C.R. y Linero-Cueto, J.R. (2019). Surface wind characteristics over Baja California Peninsula during summer. *Regional Studies In Marine Science*, 29: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100654>.

Mosemm. (2017). Monitor de Sequía Multivariado en México. Instituto de Ingeniería. UNAM. Disponible para consulta en: <http://www.ii.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyecto/Paginas/Monitordesequia.aspx>

NADM. (1999). North American Drought Monitor. National Centers For Environmental Information. Disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/>

Nanzad, L., Zhang, J., Tuvdendorj, B., Nabil, M., Zhang, S. y Bai, Y. (2019). NDVI anomaly for drought monitoring and its correlation with climate factors over Mongolia from 2000 to 2016. *Journal of Arid Environments*. DOI:10.1016/j.jaridenv.2019.01.019

National Park Services. (2019). Sonoran Desert Network Ecosystems. Sonoran Desert Inventory & Monitoring Network. Disponible en: <https://www.nps.gov/im/sodn/ecosystems.htm>

Otterman, J. (1974). Baring high-albedo soils by overgrazing: Hypothesized desertification mechanism. *Science*, 186(4163): 531-533.

Peters, A.J., Walter-Shea, E., Ji, L., Viña, A., Hayes, M. y Svoboda, M. (2002). Drought monitoring with NDVI-based Standardized Vegetation Index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 68. 71-75.

Ramírez, P. y Brenes, A. (2002). *Informe sobre las condiciones de sequía observadas el Istmo Centroamericano en el 2001*, Sistema de la Integración Centroamericana - Comité Regional Recursos Hidráulicos.

Ravelo, A., Sanz, R. y Douriet, J. (2014). Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca del Pacífico Norte, México. *AgriScientia*. 31 (1): 11-24. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v31.n1.9836>

Rzedowski, J. (2006). *Vegetación en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 1er Edición digital. Disponible en: http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf.

Salinas-Zavala, C., Martínez-Rincón, R. y Morales-Zárate, M. V. (2017). Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California. *Instituto de Geografía UNAM. Investigaciones Geográficas*. Número 94. DOI: [dx.doi.org/10.14350/rig.57214](https://doi.org/10.14350/rig.57214)

Schaaf, C. y Wang, Z. (2015). *MCD43C3 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Albedo Daily L3 Global 0.05Deg CMG V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. DOI: 10.5067/MODIS/MCD43C3.006

Seager, R., Tzanova, A. y Nakamura, J. (2009). Drought in the Southeastern United States: Causes, Variability over the Last Millennium, and the Potential for Future Hydroclimate Change. *Journal of Climate*, 22(19), 5021–5045. DOI:10.1175/2009jcli2683.1

Shreve, F., y Wiggins, I.L. (1964). *Vegetation and Flora of the Sonoran Desert*. Stanford University Press, 1740 pp.

Stahle, D.W., Cook, E.R., Burnette, D.J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J.N., Griffin, D., Cook, B.I., Acuña, R., Torbenson, M.C.A., Szejner, P. y Howard, I.M. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34–60. DOI:10.1016/j.quascirev.2016.06.018

Tereshchenko, I., Zolotokrylin, A., Brito-Castillo, L. y Octavio, C. (2012). Seasonal Variation of Surface Temperature-Modulating Factors in the Sonoran Desert in Northwestern Mexico. *American Meteorological Society*. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0160.1

UNESCO. (1979). Map of the world distribution of arid regions. MAB. Tech. Notes 7, UNESCO, Paris. Disponible en: https://catalogue.unccd.int/1060_1977_unesco_mab_technicalnotes_arid_lands_map.pdf

Vanderplank, S.E. y Ezcurra, E. (2020). Desert rarity, endemism, and uniqueness. In Goldstein M.I., Dellasala, D.A. (Eds.), *Encyclopedia of the world's biomes*. Elsevier Inc., Vol. 2, pp. 47–56. <https://doi.org.10.1016/B-978-0-12-409548-9.12110-4>.

Vega-Camarena J., Brito-Castillo, L., Farfán-Molina, L., Gochis, D. Pineda-Martínez. L. y Díaz, S. (2018). Ocean-atmosphere conditions related to severe and persistent droughts over the Mexican Altiplano. *International Journal of Climatology*. 38, 853-866. DOI: 10.1002/joc.5215.

Vivoni, E., Moreno, H., Mascaro, G., Rodríguez, J., Watts, C., Garatuza-Payan., J. y Scott, R. (2008). Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in the North American monsoon region. *Geophysical Research Letters*, 35, L22403, DOI: 10.1029/2008GL036001.

Wan, Z., Hook, S. y Hulley, G. (2015). *MOD11C3 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V006* [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. DOI: 10.5067/MODIS/MOD11C3.006

Zolotokrylin N.A., Titkova, T.B. y Brito-Castillo, L. (2016). Wet and dry patterns associated with ENSO events in the Sonoran Desert from 2000–2015. *Journal of Arid Environments*, 134:21-32. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jarienv.2016.06.014>. ISSN: 0140-1963