

Ing. Ramirez Torres
Jonathan Israel

Uso eficiente del agua en zonas vitivinícolas semiáridas

2023



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Uso eficiente del agua en zonas vitivinícolas
semiáridas

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado
de

Maestro en Ciencias en Hidrología Ambiental

Presenta:

Ing. Jonathan Israel Ramirez Torres

Dirigida por:

Dr. Samuel Villarreal Rodríguez

Querétaro, Qro. a enero de 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Uso eficiente del agua en zonas vitivinícolas
semiáridas

por

Jonathan Israel Ramírez Torres

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-300414



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en ciencias

USO EFICIENTE DEL AGUA EN ZONAS VITIVINÍCOLAS SEMIÁRIDAS

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Hidrología Ambiental

Presenta:

Ing. Jonathan Israel Ramirez Torres

Dirigido por:

Dr. Samuel Villarreal Rodríguez

SINODALES

Dr. Samuel Villarreal Rodríguez
Presidente

Firma

Dra. Nelly Lucero Ramírez Serrato
Secretaria

Firma

Dr. Enrique Gonzáles Sosa
Vocal

Firma

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos
Suplente

Firma

Dr. Josué de Jesús Trejo Alonso
Suplente

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de Fac.Ing

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado
UAQ

Centro Universitario Querétaro, Qro.
ENERO 2023.
México.

¡A todas aquellas personas que han influido en mi vida!

A Dios, por permitir llegar a este día.

IN MEMORIAN

De mi padre José Ramirez Duran

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia, amigos y profesores, por todo el apoyo brindado para la realización de esta meta.

A mis compañeros de maestría, por hacer más amena la estancia en el posgrado.

A todas aquellas personas, que, a través del tiempo, me transmitieron su conocimiento y experiencia forjando la persona que soy ahora.

Al Dr. Samuel Villareal Rodríguez por su disposición para dirigir la tesis y su apoyo para resolver todas las dudas en el proceso.

A la Dra. Nelly Lucero Ramírez Serrato por todo el apoyo en el uso de información geográfica y procesamiento de imágenes satelitales.

Al Dr. Enrique Gonzáles Sosa por la disposición mostrada en la investigación y sus comentarios.

Al Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos por aceptar ser sinodal y su apoyo proporcionado a lo largo de la maestría.

Al Dr. Josué de Jesús Trejo Alonso por su asesoría en el uso del software R Studio y por su enseñanza como docente.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindar las instalaciones, equipo necesario y apoyo para realizar mi posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por ser parte fundamental del sustento económico durante todo el tiempo del plan de estudio.

Resumen

Para comprender el impacto potencial de la variabilidad climática sobre los ciclos del carbono y del agua de la región vitivinícola semiárida de Querétaro para distintas coberturas superficiales (i.e., viñedos, vegetación natural), se analizó la dinámica del uso eficiente del agua (UEA) y su relación con cambios anuales y estacionales en la precipitación, la temperatura, y vapor de presión. El UEA se define como el cociente entre el carbono capturado (productividad primaria bruta – PPB) por la vegetación y el agua que regresa a la atmósfera (evapotranspiración – ET). La dinámica del UEA en regiones semiáridas es sumamente sensible a la variabilidad de dichos factores climáticos y de condiciones atmosféricas (i.e., presión de vapor). La PPB, la ET, y el UEA, se estimaron a partir de imágenes satelitales (i.e., Landsat y MODIS); la información climatológica se obtuvo a partir de estimaciones reticulares basadas en la interpolación de observaciones in-situ (i.e., DAYMET). La dinámica general anual del UEA presenta una tendencia positiva (2.9 a 3.3 g C / Kg H₂O), dada la adaptación de la zona a condiciones de mayor aridez. La variabilidad entre las distintas coberturas vegetales es distinta; un UEA mayor para viñedos en comparación con la vegetación natural para las estaciones de verano y primavera, mientras que fue igual en invierno. Los resultados indican la alta sensibilidad de la región para los ciclos del carbono y del agua ante un aumento de la temperatura y disminución de la precipitación.

Palabras clave: Uso eficiente del agua, Región semiárida vitivinícola, Productividad primaria bruta, Evapotranspiración, Cambio climático.

Summary

To understand the potential impact of climate variability on the carbon and water cycles of the semi-arid Querétaro wine region for different surface coverages (i.e., vineyards, natural vegetation), the dynamics of water use efficiency (WUE) and its relationship with annual and seasonal changes in precipitation, temperature, and pressure vapor were analyzed. The WUE is defined as the ratio between the carbon sequestered (gross primary productivity - GPP) by vegetation and the water returned to the atmosphere (evapotranspiration - ET). The dynamics of WUE in semi-arid regions is highly sensitive to the variability of these climatic factors and atmospheric conditions (i.e., vapor pressure). GPP, ET, and WUE were estimated from satellite images (i.e., Landsat and MODIS); climatological information was obtained from gridded estimates based on interpolation of in-situ observations (i.e., DAYMET). The overall annual dynamics of the WUE presents a positive trend (2.9 to 3.3 g C / Kg H₂O), given the adaptation of the area to more arid conditions. The variability between the different vegetation covers is different; a higher WUE for vineyards compared to natural vegetation for the summer and spring seasons, while it was the same in winter. The results indicate the high sensitivity of the region for carbon and water cycles to an increase in temperature and decrease in precipitation.

Keywords: Efficient water use, Semiarid wine region, Gross primary productivity, Evapotranspiration, Climate change.

Índice

	Página
Resumen.....	i
Índice.....	iii
Índice de cuadros	v
Índice de figuras	vi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Metas	4
1.3 Preguntas de investigación.....	5
1.4 Objetivo General.....	5
1.5 Objetivos Específicos	5
1.6 Hipótesis	6
Capítulo 2. Antecedentes	7
2.1 Aspectos generales del cambio climático	7
2.2 Uso eficiente del agua (UEA).....	11
2.2.1 Valores en Zonas Semiáridas	15
2.3. El cultivo y ciclo fenológico de la vid	16
2.3.1 El cultivo de la vid en Querétaro	18
2.4 Aspectos Básicos de Teledetección.....	19
2.4.1 Tipos de Resolución.....	20
Capítulo 3. Metodología.....	21
3.1 Área de estudio.....	21
3.2 Obtención de Datos.....	24
3.2.1 DAYMET	24
3.2.2 AppEEARS.....	25
3.2.3 Landsat con R Studio y Google Earth Engine	28
3.3 Cálculo del UEA e Índices espectrales	29
3.3.1 Cálculo del UEA	29
3.3.2 Cálculo de Índices espectrales.....	30
3.4 Índices Bioclimáticos.....	32

3.5 Base de Datos.....	34
3.6 Análisis estadístico de los datos	35
3.6.1 Análisis de Componentes Principales (ACP)	36
3.6.2 Análisis de Medias para muestras independientes	36
3.6.3 Árboles de decisión.....	38
3.6.4 Correlograma coeficiente de correlación de Pearson	38
3.6.5 Correlación Múltiple	39
Capítulo 4. Resultados	40
4.1 Características ambientales	40
4.1.1 Tendencia de precipitación y temperatura	40
4.1.2 Dinámica de las propiedades bioclimáticas.....	42
4.2 Dinámica en el uso eficiente del agua	46
4.3 Relación entre Precipitación y UEA.....	50
4.4 Correlación entre variables ambientales.....	55
4.4.1. Correlogramas	55
4.4.2 Árboles de Decisión	57
4.4.3 Correlación múltiple	59
Capítulo 5. Discusión.....	60
5.1 Relación entre la precipitación y la temperatura en uso eficiente del agua	60
5.2 Variación del Uso Eficiente del Agua	62
5.2.1 Tendencia del UEA.....	62
5.2.2 Tendencia estacional del UEA.....	63
5.3 Variación de la precipitación respecto al UEA.....	64
5.4 Uso Eficiente del Agua y su relación con variables ambientales	65
Capítulo 6. Conclusión	68
Referencias Bibliográficas	70

Índice de cuadros

CUADRO 1. DISTINTOS VALORES DEL UEA EN EL MUNDO.	15
CUADRO 2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA MUESTRA TOTAL DE VIÑEDOS Y PARCHE DE VEGETACIÓN NATURAL.	22
CUADRO 3. CONFIGURACIÓN DE NOMBRE PARA LAS IMÁGENES ET Y PPB.	30
CUADRO 4. OBSERVACIONES DE ÍNDICES ESPECTRALES.	32
CUADRO 5. IDENTIFICACIÓN DE ÍNDICES BIOCLIMÁTICOS	33
CUADRO 6. RESOLUCIÓN ESPACIAL DE VARIABLES	34
CUADRO 7. ACOPLAMIENTO ENTE VARIABLES Y ESTACIONES PARA UN AÑO DE ESTUDIO.	35
CUADRO 8. VALORES CARACTERÍSTICOS EN LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA	42
CUADRO 9. COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS ÍNDICES BIOCLIMÁTICOS.	43
CUADRO 10. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PARA LOS COMPONENTES PRINCIPALES 1,2,3 Y 4	43
CUADRO 11. P- VALUE PARA SERIES DE UEA.	50
CUADRO 12. VALOR PROMEDIO DEL UEA (g C / Kg H₂O).	50
CUADRO 13. LISTA DE COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN Y CORRELACIÓN	54
CUADRO 14. PORCENTAJE DE EFECTIVIDAD EN LOS ARBOLES DE DECISIÓN.	58
CUADRO 15. CORRELACIÓN MÚLTIPLE PARA CADA SITIO	59

Índice de figuras

FIGURA 1. RELACIÓN ENTRE EL FLUJO DE AGUA Y TRANSPORTE DE NUTRIENTES CON VEGETACIÓN.	12
FIGURA 2. ESTOMAS EN LA EPIDERMIS DE LA HOJA	13
FIGURA 3. CORTE TRANSVERSAL EN LA EPIDERMIS DE LA HOJA EN EL INTERCAMBIO DE FLUJO DE H₂O Y CO₂.	13
FIGURA 4. VALOR PROMEDIO DEL UEA DURANTE EL PERIODO 2000-2014.	16
FIGURA 5. CICLO FENOLÓGICO DE LA VID	17
FIGURA 6. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS VIÑEDOS EN LA ZONA SEMIÁRIDA DE QUERÉTARO.	21
FIGURA 7. VIÑEDOS SELECCIONADOS Y PARCHE DE VEGETACIÓN NATURAL	23
FIGURA 8. INTERFAZ DAYMET SINGLE PIXEL EXTRACTION TOOL. EJEMPLO VIÑEDO FREIXENET.	25
FIGURA 9. INTERFAZ APPEARS EXTRACCIÓN POR ÁREA.	26
FIGURA 10. CONFIGURACIÓN DE INTERFAZ APPEARS EXTRACCIÓN POR ÁREA.	27
FIGURA 11. DIAGRAMA DE APLICACIÓN ESTADÍSTICA DE HOMOGENEIDAD DE MEDIAS	37
FIGURA 12. COMPARACIONES POST-HOC.	37
FIGURA 13. RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PERIODO 1980-2021. A) VIÑEDO PUERTA DE LOBO, B) PARCHE NATURAL DE VEGETACIÓN Y C) VIÑEDO FREIXENET.	41
FIGURA 14. GRÁFICA ÍNDICE ESTACIONALIDAD DE LA TEMPERATURA.	44
FIGURA 15. GRÁFICA ÍNDICE RANGO DE TEMPERATURA ANUAL.	45
FIGURA 16. GRÁFICA ÍNDICE PRECIPITACIÓN ANUAL.	45
FIGURA 17. GRÁFICA ÍNDICE PRECIPITACIÓN DEL TRIMESTRE MÁS CÁLIDO.	46
FIGURA 18. GRÁFICA SEMANAL DE TODO EL SET UEA 2001- 2021	47
FIGURA 19. GRÁFICA UEA SET PRIMAVERA	48
FIGURA 20. GRÁFICA UEA SET VERANO	48
FIGURA 21. GRÁFICA UEA SET OTOÑO	49
FIGURA 22. GRÁFICA UEA SET INVIERNO	49
FIGURA 23. CONJUNTO DE GRÁFICAS EN LA RELACIÓN UEA Y PRECIPITACIÓN.	54
FIGURA 24. CORRELOGRAMAS DE PEARSON DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	56
FIGURA 25. ÁRBOLES DE DECISIÓN PARA LOS SITIOS DE ESTUDIO	58
FIGURA 26. RELACIÓN UEA VS PRECIPITACIÓN ANUAL	65

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

Desde las últimas décadas se ha establecido un consenso en las investigaciones referentes al aumento en el promedio mundial de la temperatura terrestre superficial, teniendo una repercusión directa en el calentamiento global y variaciones en el ciclo hidrológico. Estimándose un incremento en el rango de 0.3° a 0.7° C para el periodo 2016-2035 a escala global (IPCC, 2007, 2014). Aunado a lo anterior, existen registros de cambios en los patrones de precipitación en todo el mundo, ocasionando que zonas áridas y semiáridas se vuelvan aún más secas, afectando la productividad agrícola en dichas regiones (Dore, 2005). Potencialmente, dichas variaciones en los patrones de lluvia tendrán un impacto sobre la producción agrícola con respecto al incremento de la temperatura superficial. Lo anterior debido a la influencia de la precipitación en las propiedades funcionales y estructurales en los ecosistemas terrestres, siendo especialmente sensibles los sistemas áridos y semiáridos (Weltzin et al., 2003). Debido a que en estos ecosistemas la dinámica de los ciclos biogeoquímicos (i.e., carbón y agua, etc.) es más susceptible a la disponibilidad de agua (Cramer et al., 2001).

Referente a los cambios en los patrones de precipitación a nivel global, algunos modelos predicen incrementos en la precipitación media global a lo largo de este siglo. Sin embargo, este incremento no se refleja de manera general, ya que, el aumento es pronosticado principalmente para los trópicos y latitudes altas. Mientras que para latitudes subtropicales se prevé una disminución en la precipitación (Caretta et al., 2022). Alguna de las predicciones más relevantes a las variaciones en los patrones de precipitación pronostican una disminución en el número de eventos de lluvia, así como un aumento en la frecuencia de los eventos de precipitación extrema y periodos de sequía más largos (Easterling et al., 2000; IPCC, 2014). Estos cambios generan modificaciones a nivel ecosistema a

consecuencia de los cambios en los patrones de precipitación y variaciones en la temperatura, los cuales influyen en los procesos biogeoquímicos. En donde se destaca su impacto en la dinámica de la captura del carbono, evapotranspiración y balance energético superficial (D'Odorico et al., 2019; Wang & Dickinson, 2012; Weltzin et al., 2003).

En México, las zonas áridas y semiáridas constituyen 54.3 por ciento de la superficie total del país, encontrándose presente en mayor o menor porción en 25 estados (Guerrero García & Pereznegrón Pereznegrón, 2017). Dentro de estos se encuentra Querétaro, donde estudios en la cuenca del Rio Querétaro señalan que para el siglo XXI, habrá un aumento en la temperatura media (0.3 °C hasta 4.8 °C) y un decremento en la precipitación media anual del 1.8 al 22% en las proyecciones más adversas (Herrera-pantoja & Hiscock, 2015). Esto representa un impacto directo a procesos ecosistémicos como la captura de carbono y la evapotranspiración, los cuales se encuentran fuertemente influenciados por la precipitación y la temperatura (Herrera-pantoja & Hiscock, 2015).

Actualmente, uno de los sectores productivos mayormente afectado por el cambio climáticos en México es el agrícola (Anderson et al., 2020). Para el estado de Querétaro uno de los cultivos más vulnerables es la vid, debido a que sus requerimientos hídricos anuales oscilan entre 300 a 700 mm (Medrano et al., 2015), y la precipitación en la región donde se cultiva oscila entre 274 a 637 mm (CONAGUA, 2022). El impacto del cambio climático en la reducción de la producción de la vid puede tener consecuencias socioeconómicas importantes para la región, esto debido a distintos factores; 1) La producción de la vid en Querétaro para el 2021 se ubicó entre las más importantes del país (SIAP, 2022); 2) la actividad turística de la zona vitivinícola se ha posicionado como la segunda atracción en el estado desde 2017 (De Jesús- Contreras et al., 2019); 3) Querétaro es el principal productor de vino espumoso de México (Jesús-contreras & Thomé-ortiz, 2021).

Para poder diseñar acciones enfocadas a mejorar la gestión hídrica y la productividad agrícola en una región altamente vulnerable al cambio climático, es

necesario el entender de manera particular la relación presente entre la productividad primaria bruta del cultivo (PPB; carbono fijado por la vegetación) y su consumo de agua. Para esto, el concepto de uso eficiente del agua (UEA) relaciona directamente la cantidad de carbono fijado (PPB) y la evapotranspiración (ET: cantidad de agua que regresa a la atmósfera por medio de la evaporación superficial del suelo y la transpiración vegetal), esta relación se expresa como el cociente entre la PPB y la ET (Santiago Rodríguez et al., 2012). Desde otro enfoque, el UEA representa un vínculo importante en el ciclo del carbono y el hidrológico, al estimar el balance entre la ganancia de carbón e intercambio de agua durante la fotosíntesis (Xue et al., 2015). Por lo tanto, la dinámica del UEA es compleja; puesto que refleja la interacción dentro de sistemas naturales y agrícolas entre la vegetación y el aprovechamiento de distintos recursos, entre estos la radiación solar, temperatura, agua y nutrientes del suelo (M. Huang et al., 2015).

El monitoreo del UEA se puede realizar tanto por instrumentos o mediciones in situ, así como por sensores remotos; estos últimos permiten analizar procesos ecosistémicos a escalas espaciales mayores y a proveer de información en sitios o regiones que presentan escasas de mediciones in situ. La relevancia de este tipo de información recae en el potencial que presentan los sensores remotos para caracterizar y evaluar variaciones locales y regionales de los ciclos biogeoquímicos, propiedades climáticas y la relación entre estas (Laipelt et al., 2021; Tang et al., 2015). Por ejemplo, estimaciones del UEA basado en datos de percepción remota para ecosistemas naturales y agrícolas (i.e., pastizales, bosques, arroz y trigo), así como para caracterizar la dinámica del UEA a una escala regional y nacional (Kim et al., 2018; Tang et al., 2017; J. Zhao et al., 2019). Enfocado directamente al UEA para cultivos de vid, la relación presente de esta variable con índices relacionados a propiedades fenológicas de la vegetación (i.e., índices de vegetación, área foliar, etc.) brindan información valiosa para caracterizar la dinámica entre el ciclo del carbono y del agua, teniendo como potencial aplicación el manejo y control del riego en este tipo de cultivos (Kang et al., 2022).

Como se ha expuesto anteriormente, los cambios presentes y futuros en el decremento de la precipitación y el aumento de la temperatura requieren conocer su impacto en los ecosistemas al igual que para los sistemas agrícolas; especialmente en las regiones semiáridas (Gonzalez Medrano, 2012; Guerrero García & Pereznegrón Pereznegrón, 2017). Por ello, el presente trabajo analiza el UEA en los viñedos ubicados en la región semiárida del estado de Querétaro, en el periodo comprendido entre 2002 a 2021. Estudiando la relación presente entre el UEA con propiedades climáticas e índices espectrales (i.e., Vegetación y Agua), con la finalidad entender su comportamiento y comparar si existen diferencia con una porción de vegetación natural.

1.2 Metas

Las metas del presente trabajo son las siguientes:

- 1) Caracterizar las propiedades climáticas/ambientales de las dos zonas vitivinícolas de mayor extensión en el estado de Querétaro, al igual que una porción de vegetación natural presente geográficamente entre ambas zonas.
- 2) Establecer la influencia de la precipitación en el uso eficiente del agua tanto para las zonas vitivinícolas como para el remanente de vegetación natural.
- 3) Determinar si existen un mayor número de variables ambientales más allá de la precipitación y temperatura que tienen una influencia en el uso eficiente del agua para la zona vitivinícola y los remanentes de vegetación natural.

1.3 Preguntas de investigación

Las preguntas científicas que motivan este trabajo son:

1. ¿Existen diferencias ambientales al utilizar índices bioclimáticos entre dos zonas vitivinícolas y la vegetación natural en la región semiárida de Querétaro?
2. ¿Cómo influye la variabilidad interanual de la precipitación en el uso eficiente del agua para la zona?
3. ¿Qué factores ambientales tienen una influencia relevante en el uso eficiente del agua?

1.4 Objetivo General

Conocer la dinámica del uso eficiente del agua para una zona vitivinícola ubicada dentro de una región semiárida y determinar si se presentan diferencias con respecto a la vegetación natural de la zona.

1.5 Objetivos Específicos

1. Determinar si se presentan diferencias climáticas con respecto a aquellas variables que tienen una repercusión directa con los procesos ecosistémicos (e.g., predictores bioclimáticos) de las distintas zonas de estudio.
2. Definir tendencias del uso eficiente del agua a distintas escalas temporales (i.e., periodos anuales y estacionales) así como para las distintas etapas fenológicas de la vid.
3. Determinar si se presentan diferencias significativas entre el comportamiento del uso eficiente del agua para las zonas analizadas.

4. Determinar cuáles variables ambientales además de la precipitación y temperatura (i.e., presión de vapor y radiación de onda corta) tiene una influencia en el UEA.

1.6 Hipótesis

Las zonas vitivinícolas de estudio corresponden a los dos principales sitios vitivinícolas de la región, ambos se encuentran ubicados geográficamente dentro de la ecorregión conocida como elevaciones meridionales semiáridas (CONABIO et al., 2008) y se encuentran relativamente muy próximas entre estas. Por lo cual, no se esperan diferencias estadísticas en el uso eficiente del agua para las zonas vitivinícolas, pero si con respecto a la vegetación natural, esto debido a las diferencias en la composición de la vegetación y en el manejo de estas distintas coberturas superficiales.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Aspectos generales del cambio climático

El Panel intergubernamental del cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define al cambio climático como “variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos.” (IPCC, 2013). Uno de los orígenes del cambio climático es el aumento en la concentración en la atmosfera de gases de efecto invernadero (GEI) (i.e., vapor de agua y dióxido de carbono), lo que ocasiona afectaciones en el balance entre la energía solar entrante y la emisión de calor (Vijayavenkataraman et al., 2012). Dicho aumento en las concentraciones de dióxido de carbono, metano (31 y 151 por ciento, respectivamente), óxido nitroso, aumentado considerablemente desde 1750, ha ocasionado entre otros impactos, variaciones climáticas en la temperatura y precipitación (IPCC, 2001).

Investigaciones para América del Norte muestran un alto nivel de confiabilidad a cambios en la estructuras y funcionalidad de algunos ecosistemas terrestres, destacando modificaciones a la captura de carbono, cambios en la estructura y composición del ecosistema, así como una mayor frecuencia en eventos extremos como lo son las sequías e inundaciones (IPCC, 2022). El estudiar dichos fenómenos es de suma importancia para poder establecer y desarrollar políticas públicas para un correcto manejo de los ecosistemas y de los beneficios que de ellos se obtienen, sin comprometer el propio equilibrio en la dinámica de sus procesos (Caretta et al., 2022; Herrera-pantoja & Hiscock, 2015) .

2.1.1 Modificación de la temperatura y precipitación

El cambio en la temperatura terrestre ha registrado variaciones importantes, desde el año 1950 y se siguen estudiando en la actualidad. Estimándose cambios en el aumento promedio de la temperatura entre 0.4 °C a 1.1 °C y proyectando cambios tan alarmantes que llegan hasta 4 °C para el año 2100 en el peor de los escenarios, esto generaría la inhabilitación para muchas especies a lo largo del planeta (Caretta et al., 2022). Por otra parte, para comprender el impacto del cambio climático sobre la precipitación, es necesario analizar el ciclo hidrológico desde la frecuencia en el número de eventos de lluvia, precipitación media anual, y la tendencia de estas. Por ello es necesaria la integración de diversas fuentes de información recopiladas a distintas escalas espaciales y temporales, gracias a esto, se puede resumir de manera general algunos cambios importantes en el ciclo hidrológico (Caretta et al., 2022):

- 1) La tendencia en el aumento/decremento de la precipitación a escala regional no es uniforme, puesto que en ciertas regiones se presentan tendencias positivas en el monto anual/estacional de precipitación mientras que en algunas otras ocurre de manera inversa.
- 2) Para diversas regiones la frecuencia de eventos de lluvia de alta intensidad ha aumentado, a la par, también se presenta una disminución o aumento en los periodos de sequía para distintas regiones.
- 3) Aumento en los eventos de precipitación de mayor intensidad y una disminución en el número de eventos de lluvia, ocasionando periodos de sequía más prolongados.

2.1.2 Cambios en el ciclo hidrológico y su interacción con el ciclo del carbono

Los ciclos biogeoquímicos pueden entenderse como elementos químicos o compuestos íntimamente relacionados que tienden a circular en la biosfera y reciclarse a través de formas vivas y no vivas, al integrarse en el tiempo y el espacio (Madsen, 2011). Ejemplo de estos ciclos son: ciclo hidrológico, ciclo del carbono, ciclo del nitrógeno, ciclo del oxígeno, ciclo del fósforo, entre otros. Por la importancia de la emisión de carbono al cambio climático y el acoplamiento directo en el ciclo hidrológico, importantes para la agricultura, se expondrán las modificaciones al ciclo hidrológico y su interacción con el ciclo del carbono.

Los estudios del tema son tan variados y especializados que solo se hablara muy superficialmente y se enfocara principalmente al impacto en regiones con climas semiáridos. Los gases de efecto invernadero han ocasionado cambios tanto globales como regionales en la precipitación y la evaporación (Caretta et al., 2022). Investigaciones para diferentes cuencas en la meseta central mexicana indican un incremento en la evapotranspiración y aumento/decremento de la precipitación en diversas etapas estacionales (Deng et al., 2020; Herrera-pantoja & Hiscock, 2015). En esta región ecosistémica se ha identificado como un problema muy importante actual y a futuro de desertificación, impactando principalmente a los municipios de Corregidora, Querétaro, El Marqués y Colon en la actualidad, y se proyecta con confianza media y alta la ocurrencia de procesos de desertificación importante en los municipios de Cadereyta, Ezequiel Montes, Tequisquiapan y San Juan del Rio (Becerril-Piña et al., 2015). La desertificación se presenta en regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, y es definida como la degradación de la tierra resultado de diversos factores como las actividades humanas y variaciones climáticas (Noyola-medrano & Martínez-sías, 2017). La desertificación no es un problema aislado, en un principio, cuando el suelo se degrada es muy difícil su recuperación debido al sobre pastoreo presente en la zona, la expansión urbana (cambio de uso de suelo), compactación del suelo y cambios en el uso del agua (Huber-sannwald et al., 2006; Noyola-medrano & Martínez-sías, 2017).

La dinámica de la vegetación debido a la desertificación provoca modificaciones en las variables ambientales del lugar debido al cambio en las condiciones físicas y químicas del suelo. Por ejemplo, cambios en la estabilidad, profundidad, textura, fertilidad, y estructura de los suelos, entre otros (Huber-sannwald et al., 2006). Estos cambios provocan retroalimentaciones cíclicas, en funciones hidrológicas que son fundamentales en los ecosistemas de zonas semiáridas (precipitación y evapotranspiración), como en variables de temperatura, albedo, radiación y humedad del suelo, afectando no solo de manera puntual sino también a una escala espacial mayor (Noyola-medrano & Martínez-sías, 2017). Esta retroalimentación favorece cambios en la composición vegetal del ecosistema, como se ha reportado en el altiplano mexicano donde se presenta una transición entre pastizales semiáridos a vegetación de arbustos espinos perenes (Bernal, Ezequiel Montes, Querétaro). Dicho fenómeno repercute en la dinámica funcional del ecosistema, alterando los flujos de carbono y humedad en el suelo (Guevara-escobar et al., 2021):

1. En ecosistemas áridos y semiáridos la vegetación presente en la captura anual de carbono presenta baja magnitud, pero muestra una alta variabilidad interanual dada su marcada etapa de crecimiento.
2. La humedad disponible y distribución en el suelo, la adaptación del sistema de raíces, el nivel freático y el flujo de vapor son de vital importancia en estos ecosistemas para la captación y absorción de carbono y sus nutrientes.

Aunado a lo anterior, los modelos ecosistémicos referentes al ciclo del carbono señalan con un nivel de confianza alto, un aumento en el calentamiento global al concentrar mayor CO₂ antropógeno en la atmósfera, ya que los procesos de captura de carbono en distintos ecosistemas terrestres y marinos, no compensan a la emisión de CO₂ de origen antropogénico (Caretta et al., 2022).

El aumento en las concentraciones de CO₂ afecta la respuesta fisiológica de las plantas al disminuir la transpiración, puesto que el CO₂ presenta un efecto “fertilizante” sobre la vegetación y favorece la captura (D’Odorico et al., 2019). Lo

cual beneficia la retención de la humedad en el suelo y disminuye o ralentiza su retorno a la atmósfera ocasionado cambios en la temperatura superficial (Skinner et al., 2017). La constante adaptación entre la vegetación y el contenido de CO₂ ambiental es muy importante para el UEA en la región semiárida debido a la influencia directa en la regulación estomática, la biomasa y el aumento de la superficie foliar, como se menciona en la sección siguiente (Gentine et al., 2019).

2.2 Uso eficiente del agua (UEA)

El concepto de uso eficiente del agua (UEA) para la agricultura, puede interpretarse de diferentes maneras, ya sea, como nuevas tecnologías de riego, mejora agronómica, variabilidad genética, manejo de ecosistemas, entre otros (Medrano et al., 2015). Para esta investigación, como ya se mencionó anteriormente, se define como la relación entre la productividad primaria bruta (PPB) y la evapotranspiración (ET), señalado en investigaciones reciente como Uso Eficiente del Agua del Ecosistema (WUE_E), útil para diferenciarla con respecto a las investigaciones referentes al dosel (Gao et al., 2019) . Existe una relación directa en el acoplamiento del ciclo hidrológico y del carbono, ya que se presenta una retrolaminetación constante entre el continuo suelo-planta-atmosfera la cual puede ser estudiada a distintas escalas espaciales (i.e., organismo, parcela, ecosistema) (Knutti et al., 2017).

El UEA tiene una fuerte vínculo con en el contenido de agua en el continuo suelo-planta-atmosfera y la biomasa presente en la vegetación (Figura 1), donde se observa la relación en el agua disponible en el suelo y la demanda evaporativa (D'Odorico et al., 2019).

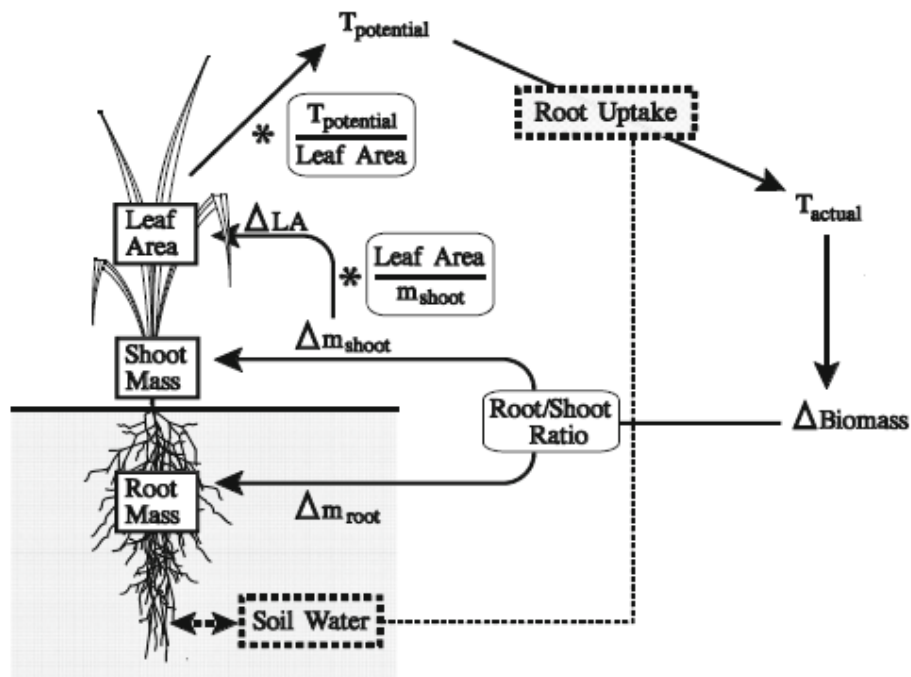


Figura 1. Relación entre el flujo de agua y transporte de nutrientes con vegetación (tomada de D'Odorico et al., 2019).

El contenido de agua en el continuo suelo- planta-atmosfera se modifica debido a los constantes cambios en la distribución, intensidad y variabilidad de la precipitación y modificaciones en la temperatura, y la absorción de humedad por parte de la vegetación, esto genera condiciones de rápido cambio en la humedad del suelo y en la evapotranspiración. Esto ocurre principalmente en regiones de climas transitorios como las semiáridas, debido a la casi constante alta demanda evaporativa de la atmosfera y el déficit hídrico del ecosistema (Seneviratne et al., 2010).

Para entender la dinámica tanto de la captura del carbono y la evapotranspiración en zonas semiáridas, es necesario entender los cambios fisiológicos en la vegetación referentes a la conductancia estomática. La conductancia estomática presenta modificación de la densidad, número, forma y apertura de los estomas conforme se presentan variaciones en la disponibilidad de agua, radiación y

temperatura (Gentine et al., 2019). La Figura 2 ,muestra la sección ampliada en la epidermis de una hoja modelo, que puede ser huizache (*Acacia farnesiana*) o alguna vegetación endémica, donde se esquematiza la apertura y cierre de los estomas, siguiendo con la Figura 3, con un corte transversal mostrando las vías de difusión del CO₂ y H₂O dentro y fuera de la hoja hacia las células mesófitas, necesarias para la fotosíntesis (Chapin et al., 2011).

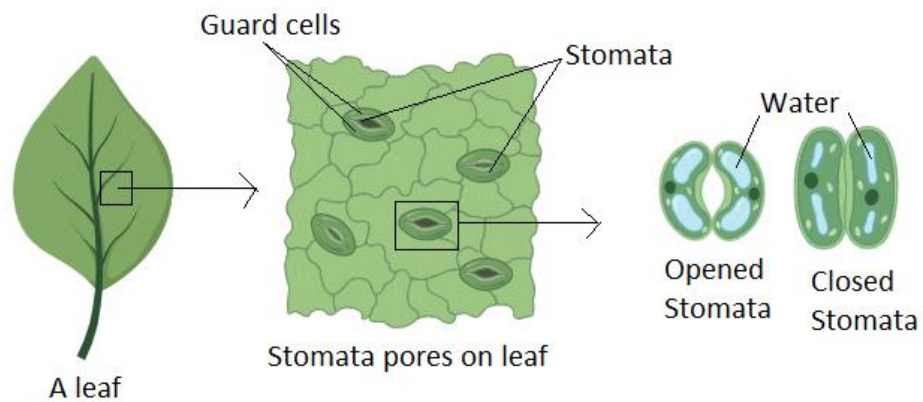


Figura 2. Estomas en la epidermis de la hoja (tomada de Chapin et al., 2011).

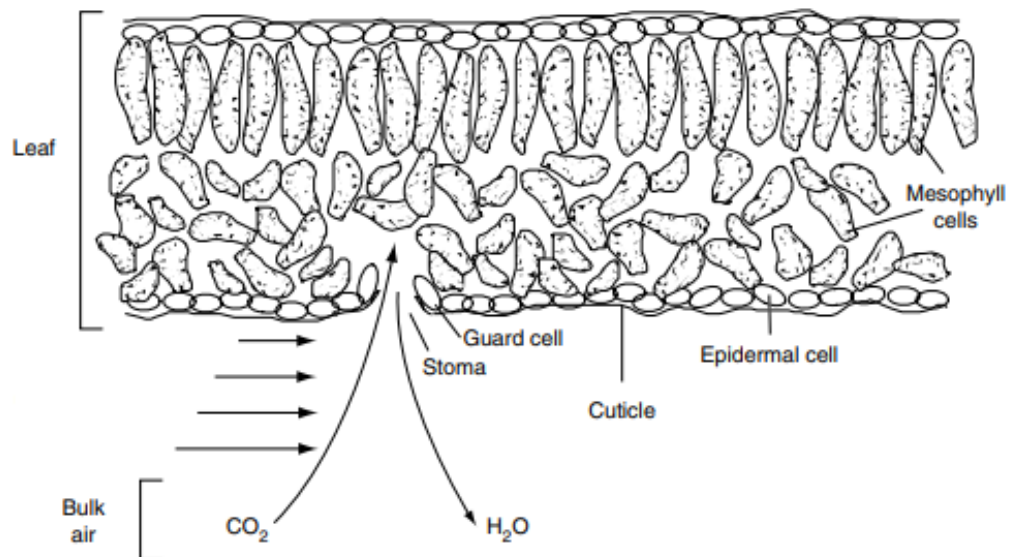


Figura 3. Corte transversal en la epidermis de la hoja en el intercambio de flujo de H₂O y CO₂ (tomada de Chapin et al., 2011).

El intercambio de las partículas de CO₂ y H₂O es un proceso crítico, ya que dictamina la biomasa presente en el sistema de raíces y biomasa superficial, retroalimentando condiciones cíclicas de demanda evaporativa atmosférica y nutrientes presentes en el suelo a través del continuo suelo-planta-atmosfera. En síntesis, el UEA, es un buen indicador del acoplamiento entre los ciclos hidrológicos y del carbono, siendo muy práctico para visualizar el impacto ecosistémico del cambio climático a través de diferentes escalas de tiempo. En el Cuadro 1, se observa diferentes valores del UEA, mostrando que su valor es distinto a diferentes escalas, tanto global como regional y para distintos tipos de vegetación en una misma zona.

Para el caso del UEA en zonas vitivinícolas, no se tiene un amplio registro de estudios. Alguno de estos se ha realizado en la región árida de china para cultivo de vid, con valores promedio de 0.52 g C por kilogramo de agua (Gao et al., 2019). Las investigaciones referentes al Uso Eficiente del Agua en la vid señalan el termino UEA como el cociente entre del rendimiento de producción de uva por volumen de riego suministrado y la relación entre la transpiración vegetal y rendimiento (Medrano et al., 2015). Por ello se decidió enfatizar en valores del UEA en regiones semiáridas. En el caso de México, se presenta la región Californiana mediterránea, la cual se encuentra en la localidad Valle de Guadalupe, Ensenada, Baja California donde la vegetación dominante es matorral esclerófilo con valor promedio en 5 años de estudio (2008-2013) de 2.46 g C/ Kg H₂O (Aguirre Gutierrez, 2014).

Cuadro 1. Distintos valores del UEA en el mundo.

Referencia	WUE g C/ Kg H ₂ O	Periodo	Ubicación	Tipo de Vegetación
(Xue et al., 2015)	1.695	2000- 2013	Global	Promedio Mundial
(L. Huang et al., 2017)	1.70	2000- 2014	Global	Promedio Mundial
(Ahmadi et al., 2019)	1.95	2000- 2014	USA Contiguo	Promedio
(Zou et al., 2020)	2.56	2000- 2014	Asia Central	Promedio
(J. Zhao et al., 2019)	3.25			Bosques
	2.0	2000-	Sur Oeste de	Matorrales
	1.76	2017	China	Tierras de Cultivo
	1.04			Pastizales
(Aguirre Gutierrez, 2014)	2.46	2008- 2013	Valle de Guadalupe BC	Matorral Esclerófilo

2.2.1 Valores en Zonas Semiáridas

Las investigaciones referentes al valor del UEA a nivel mundial, muestran una gran variabilidad, Figura 4 (L. Huang et al., 2017). En el caso de regiones semiáridas como las zonas de matorrales en el centro de Australia y el sur de Sudamérica, sabanas en norte de África se presentan grandes variaciones interanuales encontrando dos valores máximos observados de 2.72 y 2.6 g C /kg H₂O entre el periodo 2000 a 2013 (Xue et al., 2015). Los rangos medios para regiones áridas y semiáridas oscilan entre 1.6 y 2.4 g C /kg H₂O en el periodo de 2000 a 2014 (L.

Huang et al., 2017). No se encontró registro de valores en la región semiárida de México, pero sí en la región Californiana Mediterránea con valor promedio 2.46 g C /kg H₂O.

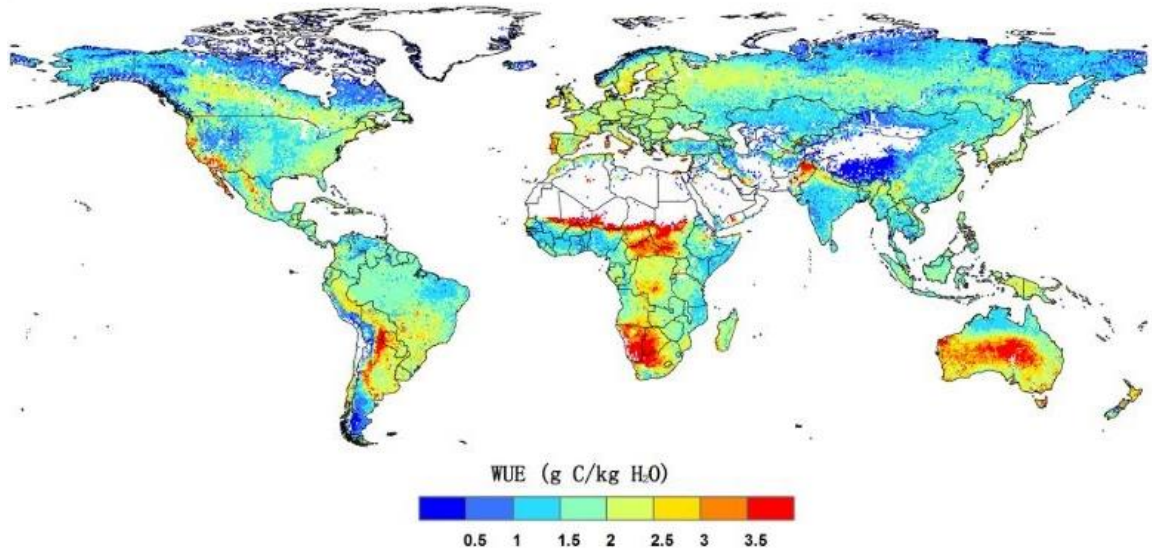


Figura 4. Valor promedio del UEA durante el periodo 2000-2014 (tomada de (L. Huang et al., 2017)).

2.3. El cultivo y ciclo fenológico de la vid

La vid es un arbusto, sarmentoso y trepador considerado una planta leñosa perenne de clima templado que sigue un ciclo vegetativo anual cuyas principales zonas de producción se encuentran entre los 20° y 50° Norte y Sur (Hidalgo Fernande-Cano & Hidalgo Togores, 2011). La fenología, definida como “subdisciplina de la ecología encargada del estudio de la temporalidad de los eventos biológicos cíclicos como resultado de factores bióticos y abióticos que determina el tiempo más adecuado para el crecimiento y la reproducción de las plantas” (Schaik et al., 1993), sigue un ciclo con una estrecha relación con las condiciones prevalecientes del medio ambiente como se muestra resumido en la Figura 5, adaptado de (Reyna Trujillo, 1987).

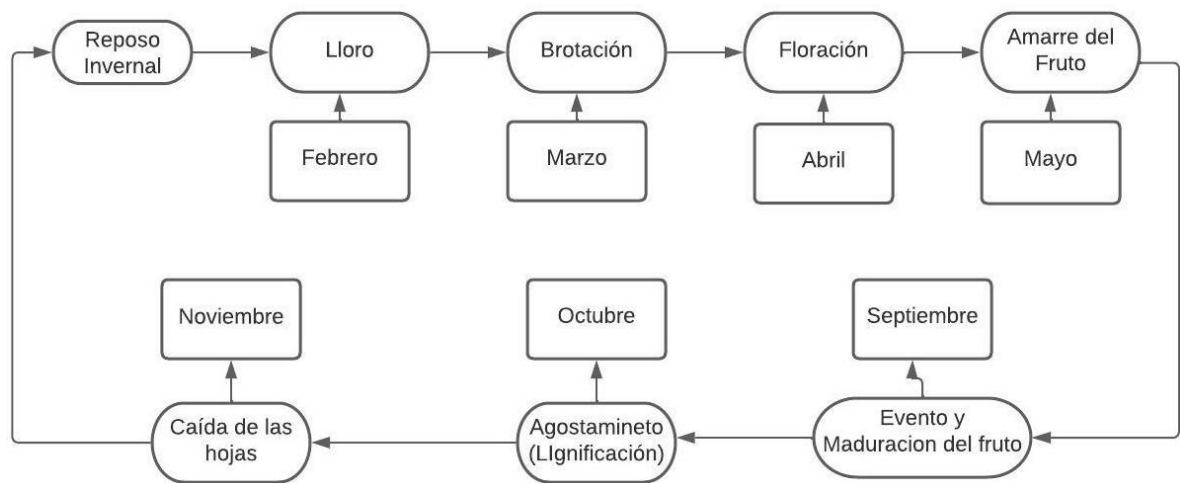


Figura 5. Ciclo Fenológico de la Vid (adaptado de Reyna Trujillo, 1987).

El conocer este ciclo ayuda a entender los requerimientos y tolerancias para cada etapa del ciclo vegetativo referente a factores ambientales como la temperatura y precipitación, así como el momento estacional meteorológico. En el hemisferio norte los brotes empiezan su crecimiento principalmente en marzo (principios de primavera) y terminando en octubre o noviembre (otoño) (Reyna Trujillo, 1987). La vid cuenta con parámetros climáticos muy definidos principalmente por la temperatura, la radiación y la precipitación, con influencia preponderante a condiciones mesoclimáticas y microclimáticas. Además, que la temperatura media anual no debe ser inferior a 9°C, manteniendo un óptimo entre 11° y 18 °C (Hidalgo Fernande-Cano & Hidalgo Togores, 2011). La disponibilidad de agua en sus diferentes secciones del continuo suelo-planta-atmosfera se ha identificado como el recurso más relevante para la sostenibilidad de la vid, debido a su impacto en su desarrollo y composición, repercutiendo en última instancia en la calidad del vino (Miras-Avalos & Araujo, 2021). El ciclo de este recurso, como se ha mencionado anteriormente, ha sido modificado, afectando los requerimientos hídricos en las diferentes etapas fenológicas ya sea por insuficiencia o exceso, ocasionando modificaciones en la extensión radicular, cambios metabólicos, reducción en el tamaño de las bayas, enfermedades fúngicas, cambios en la interacción planta-insecto, entre otras (Deloire et al., 2004; Miras-Avalos & Araujo,

2021; Roby et al., 2004). Los cambios de temperatura son también importantes, ya que muchas etapas del crecimiento se rigen por este factor, por ejemplo, la vid empieza a brotar con temperatura superior a 10 °C y mayor a 20 °C para la floración, además la interacción con las altas temperaturas y radiación solar en verano ejercen requiere de la humedad adecuada (Hidalgo Fernande-Cano & Hidalgo Togores, 2011). El conjunto de las respuestas de la vid a los cambios de precipitación y temperatura están relacionadas con alteraciones fisiológicas y moleculares como el cierre estomático y reducción de la tasa fotosintéticas por lo que un análisis de estas conductas, es un buen indicador ecosistémico de cambio (Miras-Avalos & Araujo, 2021; Savoi et al., 2016)

2.3.1 El cultivo de la vid en Querétaro

La viticultura en México tiene sus orígenes desde la época colonia, evolucionando hasta llegar a tener su mayor auge en los años ochenta en los estados de Aguascalientes, Sonora y Zacatecas. Sin embargo, en la actualidad hay 3 zonas dentro del país con la mayor producción: Baja California (Valle de Guadalupe, Valle de ojos negros, Valle Santo Tomás y Valle San Vicente), Coahuila (Valle de Parras) y Querétaro (Valle de San Juan del Rio) (García-Rodea et al., 2022). En el estado de Querétaro se tiene registro de 7 municipios que conforman la zona vitivinícola del estado desde 1987, los cuales son: San Juan del Rio, Tequisquiapan, Ezequiel Montes, Pedro Escobedo, Cadereyta, Colón y Bernal, lo que en su mayoría se concentra dentro del valle de San Juan del Rio (Reyna Trujillo, 1987). Se ha demostrado la importancia de este sector para el estado, debido a su valor social y económico a nivel nacional derivado del enoturismo y producción (García-Rodea et al., 2022). Por ejemplo, el enoturismo, turismo enfocado en actividades con la vid, consolidado como la segunda derrama de recursos para el estado, en términos turísticos desde 2018 (De Jesús- Contreras et al., 2019). En términos de producción de uva, es uno de los principales productores en los últimos 10 años (SIAP, 2022). Derivando de la producción de uva, se posiciona como el

principal productor de vino espumoso y el segundo de vino del país (De Jesús-Contreras et al., 2019; Novo et al., 2018).

El clima presente en el valle de San Juan del Rio, con base en la clasificación de Köppen, cuenta mayormente con semiárido templado (BS1hw) y semiárido semicálido (BS1Kw), en menor porción templado subhúmedo (Cwo) proporcionando temperatura media entre 12 y 19°C (Hernández Venegas, 2020). Además, cuenta con lluvias predominantes en verano y bajas en invierno con precipitación media anual entre 450 y 680 mm (Hernández Venegas, 2020). La región cuenta con diversa variedad de suelos como feozem, leptosol, luvisol, planosol y vertisol ubicados en un valle de pendiente ligera y bajos lomeríos contando con elevaciones mayores a los 2,600 msnm (Velázquez Aguirre & Ordaz Ayala, 1994) .

2.4 Aspectos Básicos de Teledetección

La teledetección se puede definir como “El proceso de instrumentación, técnica y método para observar la superficie de la Tierra a distancia e interpretar las imágenes o valores numéricos obtenidos para adquirir información significativa de determinados objetos terrestres” (Bakker et al., 2004). Aunque cada vez se amplía las técnicas y aportes de esta ciencia, volviendo menos adecuada cualquier definición. Es difícil catalogar las tecnologías de teledetección por la adquisición de datos debido a la proliferación de sensores en los últimos tiempos, para esta investigación, se emplea lo que se conoce como plataformas satelitales multisensoriales y multiespectrales debido a su capacidad de observación en la mayoría del planeta, periodos relativamente cortos y acceso libre, por ejemplo, Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) y Landsat. Particularmente para los cultivos de vid, la agricultura de precisión se ha posicionado como la principal herramienta en el seguimiento, gestión y control de la variabilidad espacio-temporal siendo los vehículos aéreos no tripulados el presente y futuro en agricultura parcelarias, pero poco utilizado en estudios ecosistemicos,

debido a su poco acervo histórico y falta de datos en parcelas que no cuentan con estas tecnologías, importante para conocer la evolución ecosistémica en diferentes regiones (Sassu et al., 2021). Existen conceptos básicos necesarios para entender las referencias en términos de teledetección, sea por vehículos aéreos no tripulados o satélites, por ello en el siguiente apartado se habla de los tipos de resolución.

2.4.1 Tipos de Resolución

Existen cuatro tipos diferentes de resolución, importantes para caracterizar los datos recabados por cualquier sensor, los cuales son: radiométrica, espacial, espectral y temporal (Bakker et al., 2004).

- La resolución radiométrica es la cantidad de información en cada pixel, refiriéndose a los niveles de energía registrada a través del número de bits.
- La resolución espacial se puede definir como el área que refiere la superficie analizada mediante el tamaño del pixel en una imagen digital, la cual varía dependiendo de la resolución del sensor.
- La resolución espectral es la capacidad en que las longitudes de onda espectrales son discernidas a través de un sensor entre ondas estrechas y finas a las que se denomina bandas.
- La resolución temporal hace referencia al momento de adquisición de la imagen, al regresar a la misma área de observación al completar su órbita.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la ecorregión elevaciones semiáridas meridionales específicamente en la región vitivinícola de Querétaro (CONABIO et al., 2008), Figura 6. Esta región cuenta con aproximadamente 25 viñedos (cuadro 2) (Vionda, 2020).

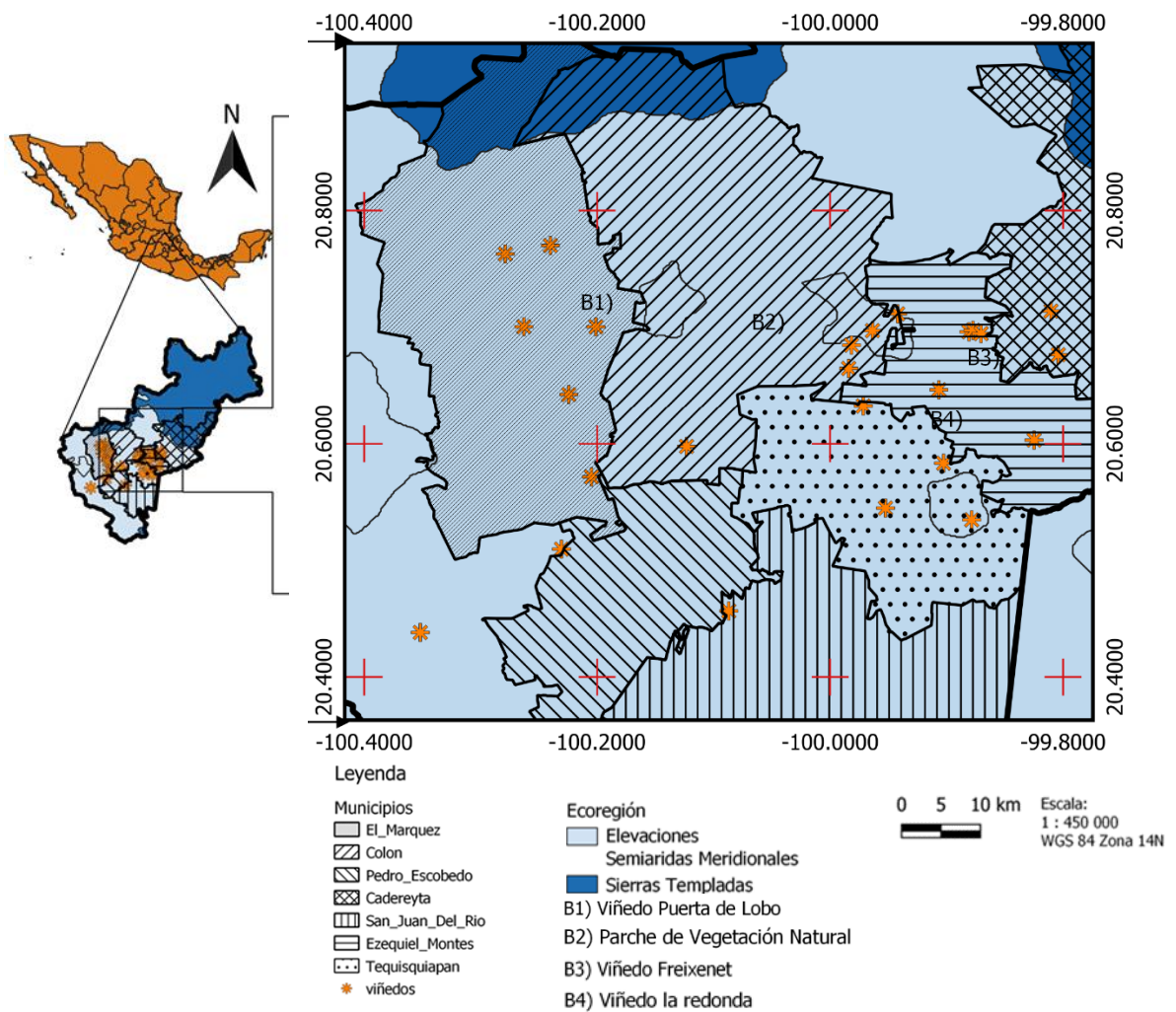


Figura 6. Mapa de distribución de los Viñedos en la Zona Semiárida de Querétaro.

Cuadro 2. Características Principales de la muestra total de Viñedos y parche de vegetación natural.

ID	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud	Hectárea
1	Viñedo Freixenet	Ezequiel Montes	20.6973668	-99.8775417	120.05
2	Viñedo La Redonda	Ezequiel Montes	20.6464062	-99.9067337	77.2
3	Viñedo Puerta Del Lobo	El Marqués	20.7004067	-100.201157	21.93
4	Viñedo Los Rosales	Tequisquiapan	20.5834408	-99.9027299	15.1
5	Vinícola Paso De Serra	Colon	20.6846332	-99.98172	11.67
6	Viñedo Viña Del Cielo	Cadereyta	20.7138794	-99.8105349	11.1
7	Vinícola Tierra de Peña	Colon	20.7115184	-99.9421487	9.15
8	Vinaltura	Colon	20.6646995	-99.9841473	8.1
9	Hacienda Atongo	El Marqués	20.7700444	-100.240184	5.22
10	Hacienda Amazcala	El Marqués	20.7004486	-100.262975	3.69
11	Viñedo Tierra De Alonso	Colón	20.5978532	-100.12337	3.56
12	María y Bernardo Viñedo	El Marqués	20.5717335	-100.204897	3.48
13	Viñedo Azteca	Ezequiel Montes	20.6945661	-99.8705645	3.39
14	Vinos Del Marqués	El Marqués	20.7628623	-100.278915	3.26
15	Cava 57	San Juan Del Rio	20.4568006	-100.087059	3.12
16	Viñedo Del Polo	Tequisquiapan	20.6423043	-100.224406	2.73
17	Viñedos La Terquedad	Huimilpan	20.5097917	-100.230652	2.51
18	Hacienda Tovaes	Cadereyta	20.6764093	-99.8043432	2.14
19	Bodega Norte B	Tequisquiapan	20.5449858	-99.952591	1.68
20	Vitivinícola San Juanito	Tequisquiapan	20.6325367	-99.9716421	1.44
21	Vinícola Casa Vegil	Huimilpan	20.4383496	-100.35184	0.55
22	Viñedos Donato	Ezequiel Montes	20.6971251	-99.9637365	0.55
23	Bodega De Cote	Ezequiel Montes	20.696088	-99.880898	0.25
24	Bodegas Vaivén	Ezequiel Montes	20.6032944	-99.825054	0.23
25	Vinícola San Patricio	Tequisquiapan	20.5349289	-99.8786183	0.11
26	Zona de Vegetación	Colón	20.691542	-100.068238	39.64

Nota: El área de las ubicaciones es un cálculo aproximado a través de Google Earth.

De los 25 viñedos presentes en la zona, se eligieron los tres de de mayores dimensiones, los cuales corresponden a Viñedo Freixenet, Viñedo La Redonda y Viñedo Puerta Del Lobo (Figura 6, sitios B1, B3 y B4). Además de su extensión, estos viñedos presentan una distancia considerable y diferencias respecto a su elevación, lo cual de pauta a analizar si se presentan diferencias ambientales entre los sitios. Así mismo, se seleccionó un sitio ubicado entre cada uno de los 3 viñedos, el cual corresponde a un parche de vegetación natural y se empleó como sitio de control para los viñedos (Figura 6 y Figura 7). El sitio de control llamado *parche de vegetación natural* (pvg) alberga principalmente vegetación endémica de la zona predominantemente mezquite (*Prosopis laevigata*) y huizaches (*Acacia farnesiana*), además de la “gobernadora” (*Larrea divaricata*) (Gonzalez Medrano, 2012).

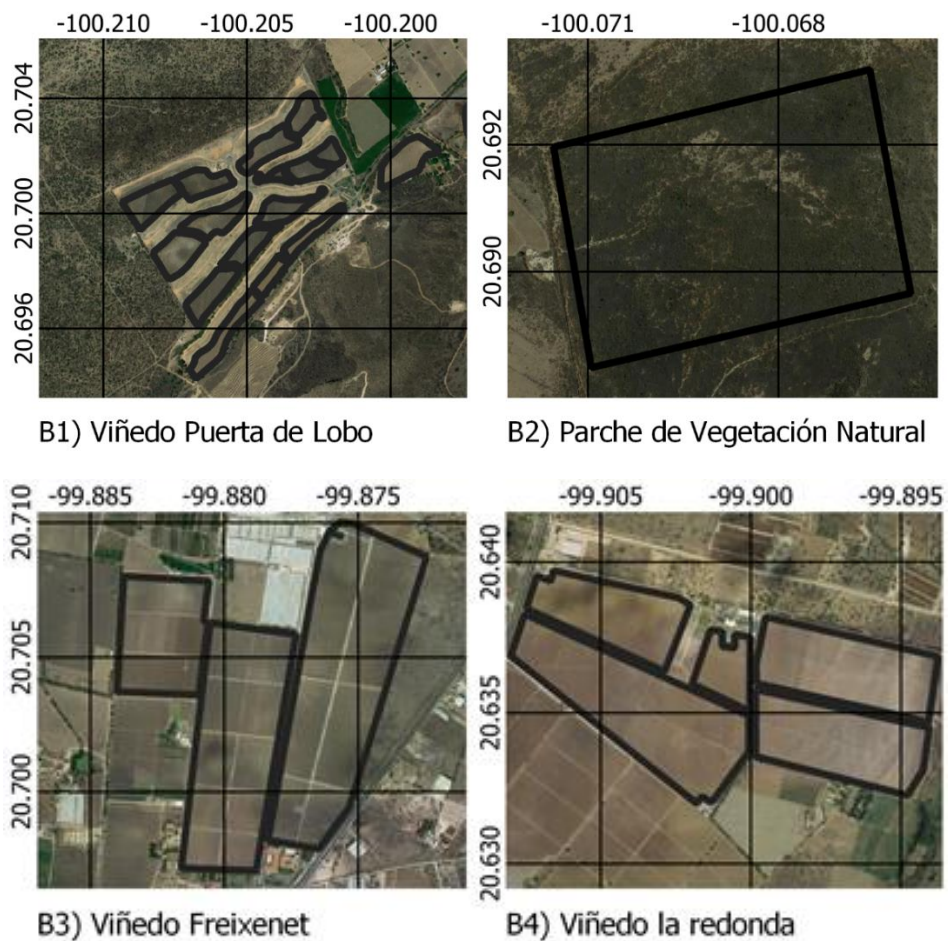


Figura 7. Viñedos seleccionados y Parche de Vegetación Natural

3.2 Obtención de Datos

Las variables se eligieron con base en las investigaciones de Gentine et al., 2019, Xue et al., 2015, Chapin et al., 2011, en donde se identificaron variables de forzamiento a la precipitación, temperatura (máxima y mínima), presión de vapor, contenido de humedad en el suelo y en la vegetación, además de la radiación solar, como factores importantes en el comportamiento del UEA. Cada una de las variables antes mencionadas se obtienen de manera directa o indirecta por medio de sensores remotos o interpolaciones espaciales, correspondiendo a Daymet, Landsat y Modis.

3.2.1 DAYMET

Daymet, “Daily Surface Weather and Climatological Summaries”, es una plataforma sustentada por el apoyo de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), del EEUU, que comparte información a través del Sistema de Datos e Información de Ciencias de la Tierra (ESDIS, por sus siglas en inglés). Consiste en un conjunto de algoritmos y softwares que interpolan y extrapolan observaciones meteorológicas y climatológicas diarias con técnicas de modelización estadística. El resultado cuenta con estimaciones cuadrículadas de 1 Km (resolución espacial) de parámetros climáticos diarios sobre América del norte continental desde 1980. Las variables de salida son: temperatura mínima y máxima, precipitación, presión de vapor de agua, radiación de onda corta y equivalente de agua de nieve (Thornton et al., 1997). El acceso a los datos Daymet se pueden consultar a través de la página de internet <https://daymet.ornl.gov/> con solo registrar datos personales y seleccionar la herramienta de obtención más adecuada, que para este estudio es “Single Pixel Extraction Tool”.

En la herramienta de extracción de un solo pixel se inicia la configuración de datos al ingresar las coordenadas del punto requerido en grados decimales, después, se seleccionan las variables deseadas y se concluye con el periodo de tiempo deseado. El programa despliega el punto referido con ayuda de Google Maps, para finalmente confirmar la instrucción de descarga o visualización de los datos correspondientes, Figura 8.

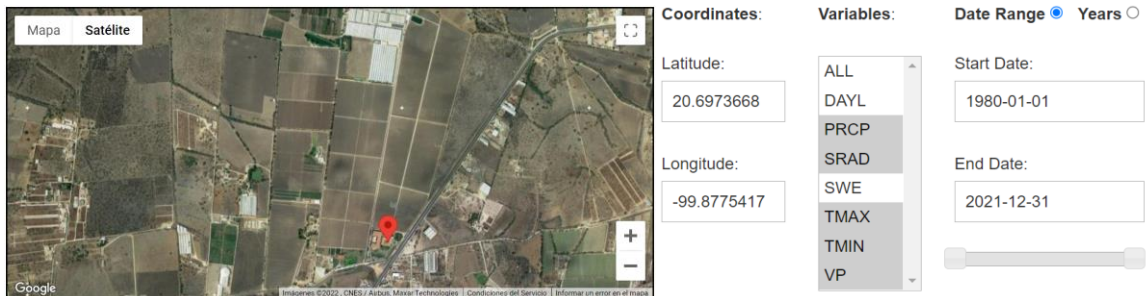


Figura 8. Interfaz DAYMET Single Pixel Extraction Tool. Ejemplo Viñedo Freixenet.

Para esta investigación se seleccionaron las variables precipitación (PRCP), radiación de onda corta (SRAD), temperatura máxima (TMAX), temperatura mínima (TMIN) y presión de vapor (VP) para el rango de fecha comprendido del año 2001 al 2021 de 3 viñedos (Freixent, Puerta de Lobo y la Redonda) y para el parche de vegetación natural. El resultado de la descarga es un archivo delimitado por comas, con información de latitud, longitud, coordenadas y título de la escena (nombre designado al área de la resolución temporal) con número de columnas igual a las variables seleccionadas, y filas, correspondientes a los días propios al rango de fecha seleccionado.

3.2.2 AppEARS

AppEARS es el acrónimo de las palabras en inglés “Application for Extracting and Exploring Analysys Ready Samples” que se traduce como aplicación para la extracción y exploración de muestras listas para el análisis. Al igual que DAYMET,

es un recurso sustentado por la NASA y el sistema ESDIS para acceder a diversos datos geospaciales mediante parámetros espaciales, temporales a diversas capas de resolución. Se puede acceder a la aplicación en el siguiente enlace <https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/> y establecer una cuenta registrando datos personales. Una vez registrado en la plataforma se tiene dos opciones de extracción, delimitando un área o un punto específico de coordenada. En este caso, se utilizó la delimitación de área, Figura 9. Donde se observan 3 tipos de entrada; nueva solicitud, copia de solicitud previa o archivo programado en JSON.

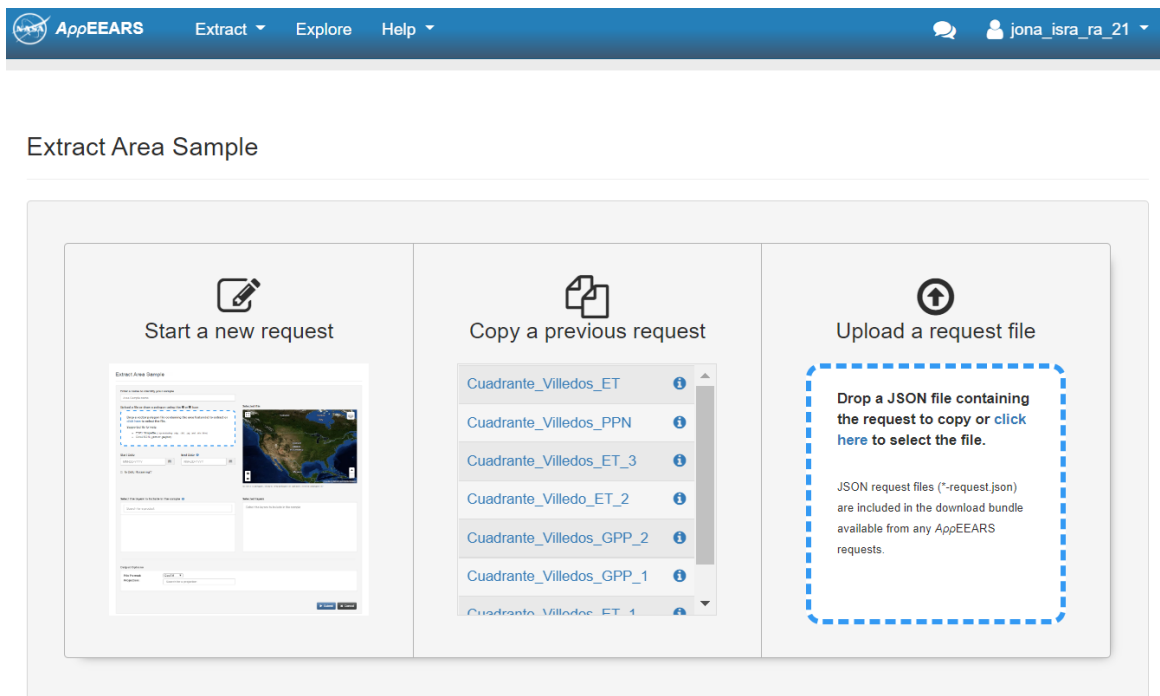




Figura 9. Interfaz AppEEARS extracción por área.

Una vez seleccionada la opción, se despliega una nueva interfaz, iniciando con el nombre del proyecto, seguido por la ubicación geográfica de la zona de estudio (ya sea entrada manual o un polígono previo en formato shape), las fechas de adquisición y producto satelital de la base de datos de AppEEARS, finalmente, se eligen las bandas o capas de interés y el formato del archivo de salida, Figura 10. Los datos obtenidos en esta plataforma son las variables Evapotranspiración (ET) y

Productividad Primaria Bruta (PPB) necesarios para el cálculo del uso eficiente de agua (UEA).

Extract Area Sample

Enter a name to identify your sample

Upload a file or draw a polygon using the  or  icon

Drop a vector polygon file containing the area feature(s) to extract or [click here](#) to select the file.

Supported file formats:

- Shapefile (*zip including .shp, .dbf, .prj, and .shx files*)
- GeoJSON (*.json or .geojson*)

Start Date

End Date

Is Date Recurring?

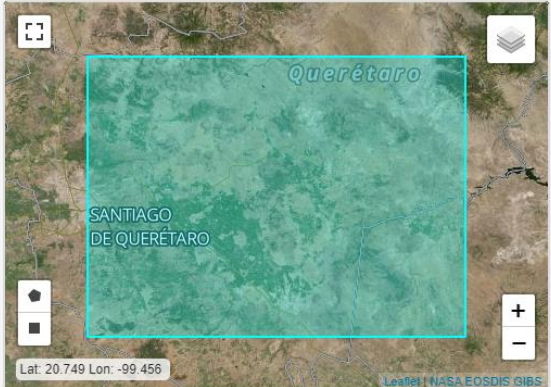
Select the layers to include in the sample

Aqua MODIS Net Evapotranspiration Gap-Filled (ET & LE)

MYD16A2GF.061, 500m, 8 day, (2002-01-01 to Present)

ET_QC_500m

Selected file (User-Drawn-Polygon)



To clear a polygon, draw a new polygon or upload a vector polygon file.

Selected layers

ET_500m 500m, 8 day

Output Options

File Format:

Projection:

Datum: WGS84
EPSG: 4326
PROJ.4: +proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs

NOTE: Be aware that any reprojection of data from its source projection to a different projection will inherently change the data from its original format. All reprojections use [GDAL's gdalwarp](#) function in combination with the PROJ.4 string listed above. For additional information, see the [AppEEARS help documentation](#).

Figura 10. Configuración de Interfaz AppEEARS extracción por área.

Para la descarga de información de ET y PPB, se inició dando nombre al identificador, enseguida el rango de fecha correspondientes desde 2001 hasta el 2021. Después, se eligieron los productos MYD16A2GF v061 (Running et al., 2021) para ET y MYD17A2HGF v061 (Running & Zhao, 2021) para PPB, del satélite “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer” MODIS/Aqua el cual cuenta con resolución espacial de 500 metros y temporal de 8 días, que incluye datos faltantes y mejoras en los algoritmos de procesamiento. Resaltar que la ubicación geográfica se realizó a través de un polígono cuadrado con vértice inferior izquierdo Lat: 20.320, Lon: -100.386 y vértice superior derecho Lat: 20.887, Lon:-99.622. No por los polígonos previamente establecidos de las zonas de estudio, esto para optimizar la descarga de las imágenes en formato shape, de las cuales se extraen los polígonos deseados como se señala en la sección 3.3.1 Cálculo del UEA.

3.2.3 Landsat con R Studio y Google Earth Engine

Landsat es un conjunto de nueve Misiones satelitales que cuenta con observaciones terrestres desde 1972 aportando información imprescindible para el entendimiento de procesos biofísicos y la evolución estacional e interanual de las condiciones de la superficie planetaria en cualquier ubicación (Williams et al., 2006). Del acervo de imágenes espectrales Landsat, se utilizó para el periodo 2002 a 2013 los productos Landsat 7 (USGS, 2022a) y Landsat 8 (USGS, 2022b) del 2014 al 2021, empleando solo las bandas espectrales rojo, verde, infrarrojo cercano y de onda corta. La resolución de las bandas es de 30 metros y 16 días. Existen diferentes plataformas para descargar esta información, por ejemplo, EarthExplore de USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), Landsat Viewer (<https://eos.com/landviewer/>), entre otros. Pero debido a la capacidad de almacenamiento y procesamiento necesarios para el conjunto de datos se optó por trabajar con información en la nube a través de Google Earth Engine (GEE). GEE es una plataforma computacional elaborada por Google en el año 2010 que permite

análisis computacionales de “Big Data” de manera eficaz en términos geoespaciales y sobre todo es una plataforma de libre acceso con un catálogo de datos muy extenso, incluyendo los lanzamientos Landsat 7 y 8 (Zhao et al., 2021). Tiene un entorno de programación amigable y varios algoritmos de ajuste de datos, siendo capaz de crear vínculos con diversos lenguajes de programación a través de JSON, importante para nutrir procesos de investigación con otros software como lo es R Studio, en términos estadísticos (Zhao et al., 2021). En esta investigación se realizó el acoplamiento entre GEE y R Studio para aprovechar al mismo tiempo el potencial de ambos y crear diversos índices espectrales como se muestra en la sección 3.3.2 Cálculo de Índices espectrales.

3.3 Cálculo del UEA e Índices espectrales

Para este apartado, se calculan cuatro variables del total de set de datos empleados para la investigación, los cuales son: Uso eficiente del Agua (UEA), contenido de humedad en el suelo, contenido de agua y estado de salud de la vegetación, estas tres últimas variables calculadas indirectamente a través de índices espectrales.

3.3.1 Cálculo del UEA

El cálculo del Uso Eficiente del Agua (UEA), se realiza con forme a la ecuación 1 (Santiago Rodriguez et al., 2012), adaptada a las condiciones de la imagen obtenida en la sección 3.2.2 AppEARS para las variables Evapotranspiración (ET) y Productividad Primaria Bruta (PPB), las cuales cuentan con características en el nombre de identificación propias de cada sensor, Cuadro 3 (Justice et al., 2002).

A continuación, se presenta la ecuación 1:

$$(UEA_i)_x = \frac{Prom. Pixel\{Recorte_x(PPB)\} * 0.0001}{Prom. Pixel\{Recorte_x(ET)\} * 0.1} \frac{g C}{mm} \text{ ó } \frac{g C}{Kg/H_2O} \quad (Ecu. 1)$$

Donde UEA es Uso Eficiente del Agua; i es el número de semana dentro del periodo 2002-2021; x es la extensión en coordenadas geográficas del viñedo o parche natural; Prom.Pixel es el promedio del valor numérico del pixel en la extensión x; Recorte_x es el recorte ráster por extensión x de la imagen fuente, y, por último, factores de escala 0.1 y 0.0001 para cada banda.

Para las 2 bandas seleccionadas se obtuvieron 909 imágenes iniciando el día juliano 81 del año 2002 hasta el 353 del 2021 sin datos faltantes, resaltar que, son valores de pixel sumados cada ocho días, en días fijos múltiplos en todos los años.

Cuadro 3. Configuración de Nombre para las Imágenes ET y PPB.

Num.	Configuración de Nombre (ID)				
	Imag	ID. Satélite	Capa	Res. Espa	Fech. Adq
1	MYD16A2GF.061	ET	500 m	20020081	Aid001
1	MYD17A2HG.061	GPP	500 m	20020081	Aid001

Num. Image es el número de imagen; Res.Espa es la resolución espacial; Fech. Adq es la fecha de adquisición.

Se creó un algoritmo para el procesamiento de toda la serie de tiempo en el lenguaje de programación R Studio ® utilizando los paquetes “raster”, “rgdal”, “maptools”, “Sf” y “readxl” y la compilación en un computador con procesador Intel Core™ i5-4710 CPU @ 2.50 GHz.

3.3.2 Cálculo de Índices espectrales

Las variables obtenidas en el cálculo de los índices espectrales son: contenido de humedad del suelo, a través del índice de Agua de Diferencia Normalizada, NDWI (B. Gao, 1996), contenido de humedad de la vegetación, con el índice de humedad de Diferencia Normaliza NDMI (Carrasco et al., 2019), por último, verdor

de la vegetación, por medio del índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) (Rouse et al., 1974). Estos índices se obtienen a través de diversas combinaciones de bandas espectrales: rojo, verde, infrarrojo cercano y de onda corta de los satélites Landsat 7 y 8 a través de un script en R Studio. Este script cuenta con un acceso retomo a Google Earth Engine con ayuda de los paquetes “rgee”, “googledrive”, “mapedit”, “geojsonio” y “sf” con base en diversos catálogo de script (Aybar, 2022). Para todas las bandas espectrales mencionadas se realizan filtros de nubosidad y porcentaje de área efectiva como se menciona a continuación.

- GEE a través del paquete rgee en R Studio permite ingresar un polígono, al cual, se le extraen los píxeles de área correspondiente sin necesidad de identificar la imagen fuente. Para nuestra investigación todos los viñedos y el parche de vegetación se encuentra en el identificador Landsat WRS2_descending Path:27 y Row:46.
- En el caso de Landsat 7 y 8 se cuenta con la banda “QA_Pixel” generada por el algoritmo CFMASK capaz de detectar píxeles con influencia de nubes y su sombra (Foga et al., 2017).
- Una vez detectados los píxeles que contienen nubes o su sombra, para cada banda, se eliminan del total que contiene el polígono ingresado.
- En diversas ocasiones los satélites cuentan con nulos o pocos datos en los polígonos ingresados. Además de fallas sistemáticas, como el bandeo de Landsat 7 (Wei et al., 2017) y recortes de píxeles por problemas de nubosidad, por lo que se decide, para todas los sitios de estudio, que el porcentaje de píxeles sea mayor al 50 % para ser utilizadas en los índices espectrales.

Después de los filtros aplicados, se procede al cálculo de los índices espectrales NDWI (B. Gao, 1996), NDMI (Carrasco et al., 2019) y NDVI (Rouse et al., 1974) adaptado para los satélites Landsat empleados, es decir, multiplicar cada banda por corrección de escala ($2.75e-05$) y sumar por compensación (-0.2) (USGS, 2022a, 2022b) para aplicar las ecuaciones 2 a 4 respectivamente.

$$NDWI = \frac{\text{Verde} - \text{Infrarojo Cercano}}{\text{Verde} + \text{Infrarojo Cercano}} \quad (\text{Ecu. 2})$$

$$NDMI = \frac{\text{Infrarojo Cercano} - \text{Onda Corta}}{\text{Infrarojo Cercano} + \text{Onda Corta}} \quad (\text{Ecu. 3})$$

$$NDVI = \frac{\text{Infrarojo Cercano} - \text{Rojo}}{\text{Infrarojo Cercano} + \text{Rojo}} \quad (\text{Ecu. 4})$$

El número total de observaciones para cada sitio, después de filtros, se muestra en el Cuadro 4, donde podemos notar diferencia, lo que complica la comparación en fechas debido a datos no sincronizados.

Cuadro 4. Observaciones de Índices Espectrales

Sensor	Total Posible	Número de imágenes después de filtros.							
		Pue.Lobo		Parch.Veg		Freixenet		La Redonda	
Land.7	269	162	61%	152	56%	153	57%	168	63%
Land.8	182	133	73%	126	69%	128	70%	137	75%
Ambos	451	295	66%	278	62%	281	63%	305	68%

Pue.Lobo: Puerta de Lobo; Parch.Veg: Parche de Vegetación Natural.

3.4 Índices Bioclimáticos

Los índices bioclimáticos, también llamados predictores bioclimáticos, resaltan las condiciones climáticas que tienen influencia en las condiciones ecofisiológicas de las especies vegetales, útiles para determinar condiciones climáticas cambiantes, es decir, diversos valores de energía entrante al ecosistema (Reddy et al., 2015). Las variables implicadas para su cálculo son: precipitación y temperatura en condiciones anuales, medias estacionales e interanuales necesarias para evaluar 20 índices (O'Donnell & A. Ignizio, 2012), Cuadro 5. El cálculo de cada uno de ellos fue en estricto apego a los señalamientos de la referencia.

Cuadro 5. Identificación de índices Bioclimáticos

ID	Descripción del Índice Bioclimático
Bio 1	Temperatura media anual
Bio 2	Rango diurno medio anual
Bio 3	Isotermalidad
Bio 4	Estacionalidad de la temperatura (Desviación Estándar)
Bio 4a	Estacionalidad de la temperatura (Coeficiente de Variación)
Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio 7	Rango de temperatura anual
Bio 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio 9	Temperatura media del cuatrimestre más seco
Bio 10	Temperatura media del trimestre más cálido
Bio 11	Temperatura media del cuatrimestre más frío
Bio 12	Precipitación anual
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo
Bio 14	Precipitación del mes más seco
Bio 15	Estacionalidad de las precipitaciones (Coeficiente de Variación)
Bio 16	Precipitación del cuatrimestre más húmedo
Bio 17	Precipitación del cuatrimestre más seco
Bio 18	Precipitación del trimestre más cálido
Bio 19	Precipitación del cuatrimestre más frío

Los datos de temperatura y precipitación fueron adquiridos como se menciona en la sección 3.2.1 DAYMET en un periodo de 1980 a 2021 para tres de los cuatro sitios de estudio, no tomando en cuenta el viñedo La redonda esto por la cercanía de 7.2 Km al viñedo Freixenet. La información fue procesada mediante el software Microsoft Excel 2016.

3.5 Base de Datos

Debido a que las variables analizadas cuentan con fechas de adquisición distintas (Cuadro 6) se realiza un acoplamiento entre las diversas resoluciones temporales; diaria (Temperatura Máxima, Temperatura Mínima, Precipitación, Presión de Vapor y Radiación de Onda Corta), semanal (Uso Eficiente del agua, Productividad Primaria Bruta y Evapotranspiración) y quincenal (Índices NDWI, NDMI y NDVI). Se realizaron dos bases de datos, la primera para observaciones semanales, y, la segunda, para observaciones quincenales:

- Para la base de datos semanal, se suma la precipitación diaria y se promedian las variables de temperatura, presión de vapor y radiación, acoplando los nuevos valores a la fecha de adquisición semanal.
- En el set quincenal, para todo el conjunto de variables, se toma como referencia la observación impar del registro de los datos semanales, es decir, los días 1,17, ..., 337,353. Los nuevos datos se calculan según las características de cada variable, sumatoria (Precipitación, UEA, ET y GPP), acoplamiento (Índices espectrales) y promedio (resto de variables).
- El acoplamiento entre datos diarios y semanales es preciso, pero entre semanales y quincenales puede tener un desfase entre 1 y 5 días.

Cuadro 6. Resolución espacial de variables

Variable con resolución espacial	Fecha de Adquisición
Diaria	Todos los días
Semanal	Día 1,9,17, ..., 353, 361 de cada año
Quincenal	Variable, cada 16 días después de la primera fecha de adquisición e influye años bisiestos

Una vez acoplada la información, se añade una variable cuantitativa concerniente a las estaciones climatológicas, Cuadro 7, útiles para diferenciar las condiciones climáticas prevaletientes al ecosistema.

Cuadro 7. Acoplamiento ente variables y estaciones para un año de estudio.

Estación del año	Día del año		Periodo del ciclo Fenológico	Número total de observaciones (C/ 8 Días)
	Inicio	Fin		
Primavera	81	169	Brotación	12
			Floración	
			Amarre del Fruto	
Verano	177	265	Maduración del Fruto	12
Otoño	273	353	Lignificación	11
Invierno	361	73	Reposo Lloro	11

3.6 Análisis estadístico de los datos

Existen diferentes análisis estadísticos dependiendo del resultado esperado y las características de los datos. En esta investigación se emplea los siguientes métodos: Análisis de Componentes Principales, ANOVA, Kruskal-Wallis, Tukey, Holm, Arboles de decisión, Correlograma de Pearson y Correlación Múltiple. Cada uno de ellos se describen brevemente y su aplicación en el presente trabajo.

3.6.1 Análisis de Componentes Principales (ACP)

Se entiende como análisis de componentes principales al algoritmo matemático que reduce la cantidad de datos de un conjunto de dimensión múltiple a otra con menor dimensión conservando la mayor variación del conjunto de datos identificando su dirección, lo que se denomina componentes principales. Estos nuevos conjuntos son combinaciones lineales de las variables originales (Ringnér, 2008). El ACP se utilizó para disminuir la dimensión de la matriz resultante de los 20 índices bioclimáticos con los 42 años de estudio en los sitios analizados a través de la paquetería “stats” y la función “prcomp” del software R Studio. Aunque la interpretación de los datos se puede realizar de manera gráfica solo se toma en cuenta la proporción de varianza acumulada mayor al 70 %, correspondiendo a únicamente los cuatro primeros componentes.

3.6.2 Análisis de Medias para muestras independientes

Debido a la importancia de conocer si existe diferencias significativas de medias para los grupos de datos referentes al UEA para cada sitio y periodo fenológico, incorporadas en las estaciones climatológicas, se realizaron un conjunto jerárquico de análisis estadístico Figura 11, (tomada de Del Callejo Canal et al., 2021). Considerando que las muestras son independientes, se inicia con la aplicación de ANOVA de un factor, es decir, la hipótesis nula representa que las medias de todos los grupos es la misma y la hipótesis alternativa, que por lo menos alguna es distinta. Posteriormente se realiza prueba de normalidad y homogeneidad de varianza que llevaría a la aplicación de la prueba ANOVA, WELCH o KRUSKAL-WALLIS. Dichos análisis se realizaron mediante R Studio, con las funciones “aov” para ANOVA, “by_normalidad”, “leveneTest, Bartlett.test y flinger.test” para prueba de homogeneidad y “kruskal.test y oneway.test” para prueba de medias. Después se realiza comparaciones post-hoc, para identificar diferencia entre los grupos, a través del análisis de varianza, encontrando los grupos con similitudes y disimilitudes

conforme la Figura 12. Se aplica en R Studio las funciones “TukeyHSD, oneway_posthoc_games_howell y pairwise.wilcos.test_holm”

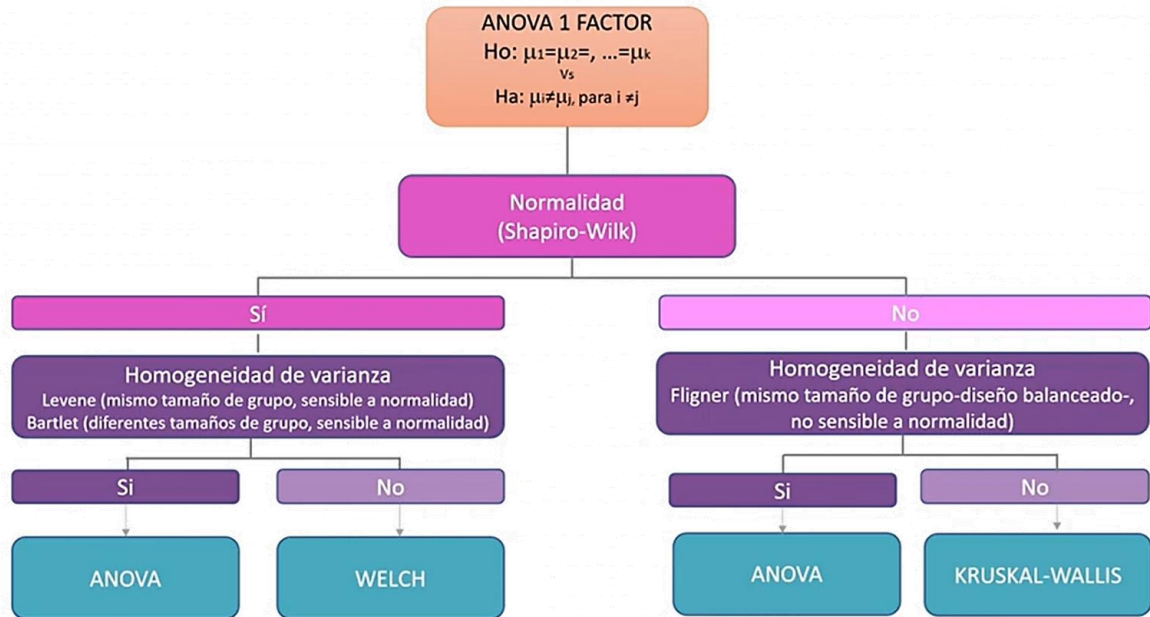


Figura 11. Diagrama de aplicación estadística de homogeneidad de medias (extraída de (Del Callejo Canal et al., 2021) con base en (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

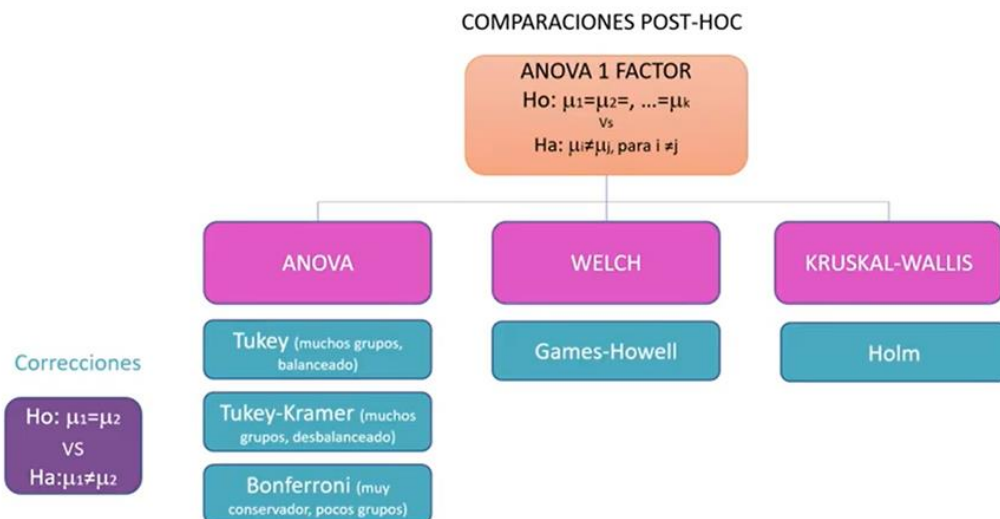


Figura 12. Comparaciones Post-Hoc (extraída de (Del Callejo Canal et al., 2022) con base en (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008)).

3.6.3 Árboles de decisión

El análisis de árboles de regresión divide los datos en dos grupos, optimizando el uso de variables predictoras para clasificar mejor la respuesta (i.e., UEA). Este proceso se repite en cada grupo hasta que se pueda hacer una partición significativa de la varianza restante. La ventaja de este método es que la estructura de árbol permite una interpretación jerárquica de la importancia de las variables independientes como se hace para otras aplicaciones ecológicas o ambientales (Villareal et al., 2016). Dadas las ventajas antes mencionadas, se decide aplicar este método estadístico a través del software R Studio. La aplicación se realiza a la base de datos quincenal con base en los paquetes “rpart” y “rpartplot”, esto con la intención de identificar las variables más importantes del sistema, ya que, permite relaciones no lineales entre la variable dependiente y las variables predictoras. Debido a la naturaleza del método, se crearon dos grupos con el 50 % de los datos de manera aleatoria, esto para crear un grupo de entrenamiento y otro de prueba, seleccionando el UEA como variable dependiente y el resto como predictoras. Una vez obtenido los resultados, es importante considerar los errores aceptados que para nuestro caso son: para el tamaño del árbol, es decir, la profundidad, debe contener un error menor al 30 % en la elección de ramas y una efectividad global (número de aciertos entre número de predicción) mayor a 85 %.

3.6.4 Correlograma coeficiente de correlación de Pearson

Los correlogramas, y particularmente el correlograma de coeficiente de correlación de Pearson, es utilizado en el análisis de series de tiempo en diferentes campos del conocimiento para una mejor visualización del comportamiento de correlaciones múltiples (Wallis & Matalas, 1971). Aunque el correlograma se puede representar de diversas maneras, se elige crear una matriz triangular superior de mapeado de colores donde se puede distinguir el valor del coeficiente R^2 mediante figuras cuadradas que se expanden o contraen en un área designada representando

valores de 1 al cubrir toda el área hasta 0 donde es área es nula. Además de la designación del color, el azul corresponde a una correlación positiva, y roja a una correlación negativa. Esta matriz se genera con ayuda del software R Studio mediante las librerías “corrplot” y “ggplot2”.

3.6.5 Correlación Múltiple

El método de correlación múltiple, es una técnica estadística con la finalidad de relacionar una serie de variables predictoras y una variable de criterio o independiente con el objetivo de entender la existencia de variabilidad lineal de diversos conjuntos de datos interpretando estadísticamente la correlación de variables que se creen de utilidad predictora (Gatsonis & Sampson, 1989). Se utiliza la base de datos quincenal contando con el UEA como variable independiente y el resto como variables predictoras a través de la función “lm” dentro del software R Studio obteniendo sola la tabla resumen para cada sitio de análisis.

Capítulo 4. Resultados

El enfoque principal de este estudio se centra en identificar diferencias ambientales entre los distintos sitios vitivinícolas de Querétaro, mediante las características de los índices bioclimáticos, uso eficiente del agua, y el análisis en el contraste de estas variables en los distintos viñedos respecto a un remanente de vegetación natural identificando las variables significativas. En esta sección se presentan los resultados referentes al análisis de las diferencias ambientales (i.e., bioclimáticas), uso eficiente del agua, y correlación entre variables ambientales seleccionadas (i.e. temperatura precipitación).

4.1 Características ambientales

4.1.1 Tendencia de precipitación y temperatura

Con base en los índices Bioclimáticos, Bio1 (Temperatura Media Anual) y Bio12 (Precipitación Anual), para el periodo 1980 a 2021, se obtuvieron los datos del promedio anual y la sumatoria anual respectivamente para los sitios Viñedo Puerta de Lobo, Parche Natural de Vegetación y Viñedo Freixenet, dejando fuera a el viñedo La Redonda debido su cercanía geográfica con respecto al viñedo Freixenet. La precipitación promedio de la serie para el sitio Viñedo Puerta de Lobo, Parche Natural de Vegetación y viñedo Freixenet, fue de 433 mm, 449 mm, 428mm, y un rango entre 138 mm a 771 mm, 164 mm a 628 mm, 224 mm a 655 mm, respectivamente. La pendiente de la precipitación durante el periodo de tiempo analizado fue negativa para el sitio Puerta de Lobo (- 0.83), mientras que para los sitios Parche Natural de Vegetación, Viñedo Freixenet, la pendiente fue de 0.41 y 1.68 respectivamente (Cuadro 8 y Figura 13). La temperatura para cada uno de los sitios muestra una tendencia positiva, presentando una pendiente de 0.036, 0.032, 0.027 para los sitios de estudio (Cuadro 8 y Figura 13).

Relación Precipitación y Temperatura Anual

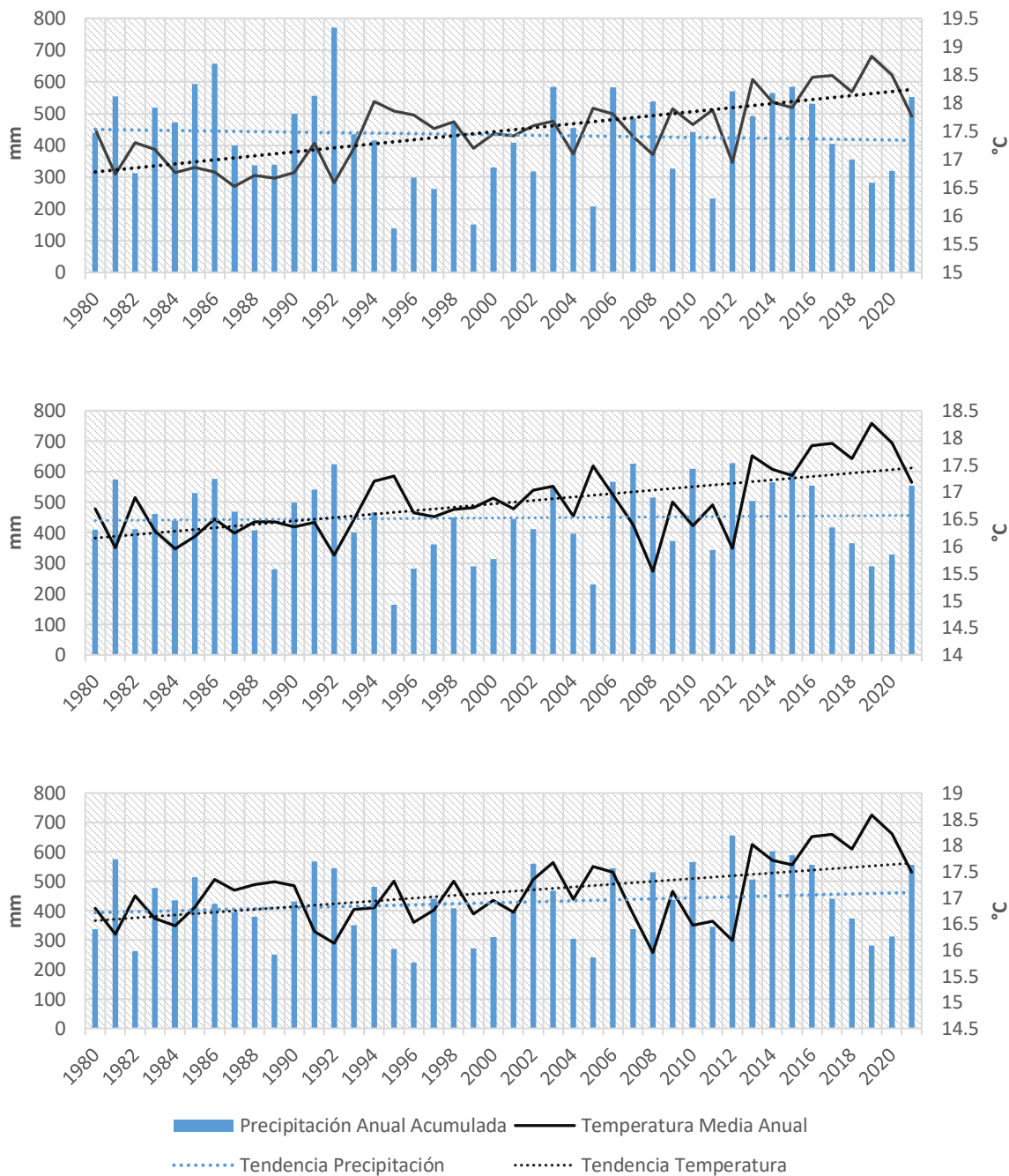


Figura 13. Relación entre precipitación y temperatura periodo 1980-2021. A) Viñedo Puerta de Lobo, B) Parche Natural de Vegetación y C) Viñedo Freixenet.

Cuadro 8. Valores característicos en la relación precipitación y temperatura

Resumen de datos					
Precipitación					
Sitio	Val.Min	Val.Max	Prom.Serie	Ecu.Lin.Ten	R ²
Pue. Lobo	138.06	771.18	433.185	-0.8274x + 450.97	0.0053
Parc. Veg	164.49	628.38	448.651	0.4096x + 439.84	0.0018
Freixenet	223.8	655.13	427.754	1.6797x + 391.64	0.031
Temperatura					
Sitio	Val.Min	Val.Max	Prom.Serie	Ecu.Lin.Ten	R ²
Pue.Lob	16.52	18.82	17.51	0.0356x +16.745	0.5471
Parc.Veg	15.54	18.27	16.79	0.0315x +16.121	0.3871
Freixenet	15.95	18.57	17.11	0.0268x +16.534	0.2751

Val:Valor; Min:Minimo; Max:Maximo; Prom:Promedio; Ten:Tendencia; R²: Coeficiente de determinación .

4.1.2 Dinámica de las propiedades bioclimáticas

Para cada uno de los sitios se seleccionaron aquellos índices bioclimáticos que en su conjunto agruparon un porcentaje mayor al 70% de la variabilidad total del conjunto total de índices bioclimáticos (Cuadro 9). Posteriormente, con base en el coeficiente de determinación se identificaron los principales factores bioclimáticos relacionados con cada uno de los componentes principales de cada sitio. En todos los sitios de estudio los índices bioclimáticos más importantes fueron Estacionalidad de la Temperatura, Rango de Temperatura Anual, Precipitación Anual y Precipitación del Trimestre más cálido. Los resultados de la investigación muestran tres matrices (una para cada sitio estudiado), pero debido a su extensión solo se describen. Cuentan con tamaño de 20 columnas, una para cada índice bioclimático, y, 42 filas, concernientes al año de estudio que va desde 1980 a 2021. Se procedió a realizar un análisis de componentes principales, ACP, para cada una de las matrices, eligiendo aquellos componentes que representen un porcentaje mayor al

72 % de la varianza total para todos los casos, Cuadro 9. A través del coeficiente de determinación se eligió los cuatro índices más representativos de los componentes seleccionados, Cuadro 10, los cuales son; Estacionalidad de la Temperatura (Bio 4), Rango de Temperatura Anual (Bio 7), Precipitación Anual (Bio 12) y Precipitación del Trimestre Más Cálido (Bio 18).

Cuadro 9. Componentes principales de los Índices Bioclimáticos

Sitios analizados				
Viñedo Puerta de Lobo (B1)				
	Comp 1	Comp 2	Comp 3	Comp 4
Proporción de varianza	0.266	0.2490	0.1082	0.09865
Proporción acumulada	0.266	0.5149	0.6231	0.72175
Parche de Vegetación Natural (B2)				
	Comp 1	Comp 2	Comp 3	Comp 4
Proporción de varianza	0.2867	0.2127	0.1255	0.09969
Proporción acumulada	0.2867	0.4994	0.6249	0.72457
Viñedo Freixenet (B3)				
	Comp 1	Comp 2	Comp 3	Comp 4
Proporción de varianza	0.3217	0.1822	0.1447	0.09475
Proporción acumulada	0.3217	0.5039	0.6486	0.74337

Comp i: Componente Principal i

Cuadro 10. Coeficiente de determinación para los componentes principales 1,2,3 y 4

Sitio Var	Puerta de Lobo				Vegetación Natural				Freixenet			
	Bio 4	Bio 7	Bio 12	Bio 18	Bio 4	Bio 7	Bio 12	Bio 18	Bio 4	Bio 7	Bio 12	Bio 18
Comp 1	0.15	0.15	0.01	0.01	0.10	0.11	0.05	0.07	0.13	0.14	0.02	0.02
Comp 2	0.01	0.02	0.13	0.07	0.08	0.05	0.09	0.05	0.03	0.02	0.15	0.10
Comp 3	0.01	0.01	0.12	0.04	0.01	0.03	0.06	0.05	0.01	0.01	0.11	0.10
Comp 4	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.05

Comp i: Componente Principal i; Var: Variable referente a los índices.

Los índices Estacionalidad de la temperatura (Bio 4), Figura 14, y Rango de Temperatura Anual (Bio 7), Figura 15, responden a la variación de energía ecosistémica; Precipitación Anual (Bio 12), Figura 16, y Precipitación del Trimestre Más Cálido (Bio 18), Figura 17, a la disponibilidad de agua necesarias para las

distintas etapas crecimiento fenológico, particularmente la etapa de desarrollo de Amarre de Fruto (Hidalgo Fernande-Cano & Hidalgo Togores, 2011).

Posteriormente, los resultados referentes al test ANOVA indico que no hay diferencias estadísticas entre los índices Estacionalidad de la Temperatura, Rango de Temperatura Anual, Precipitación Anual y Precipitación del Trimestre más cálido, entre los sitios.

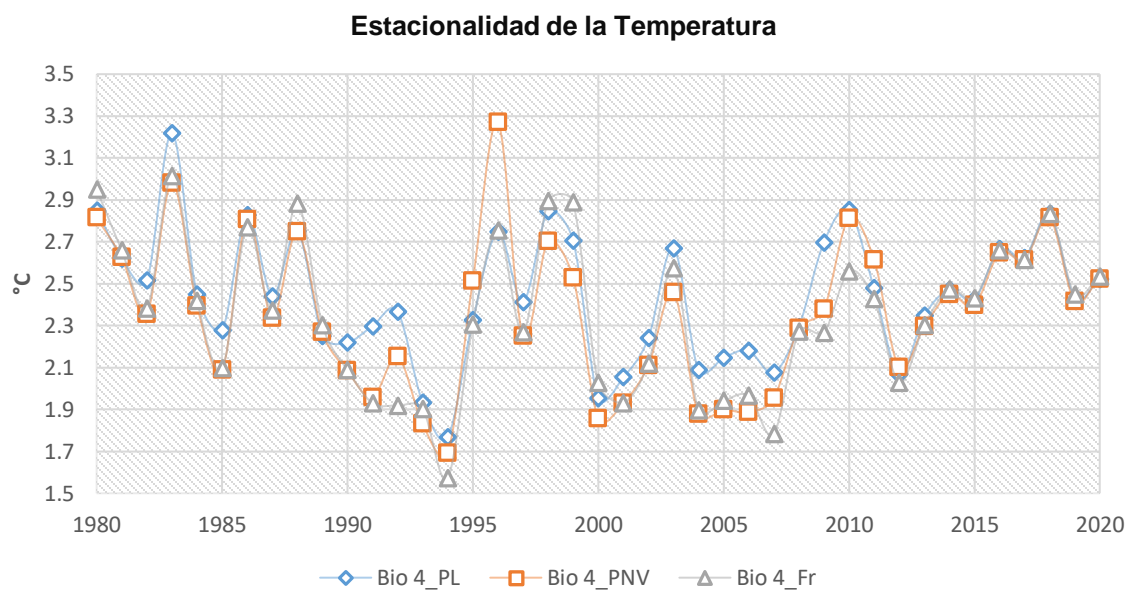


Figura 14. Gráfica Índice Estacionalidad de la Temperatura.

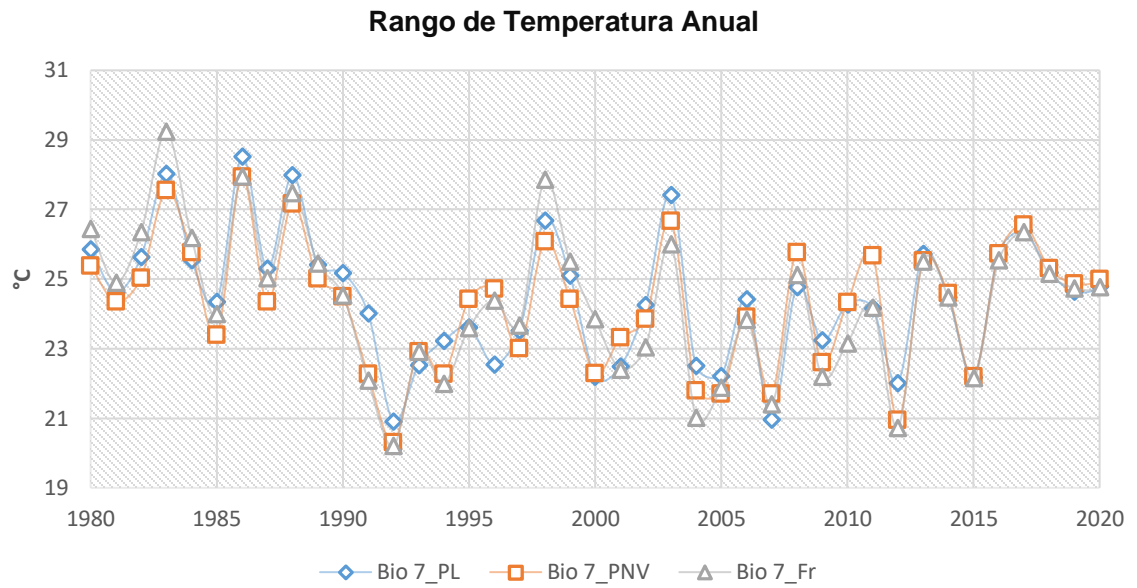


Figura 15. Gráfica Índice Rango de Temperatura Anual.

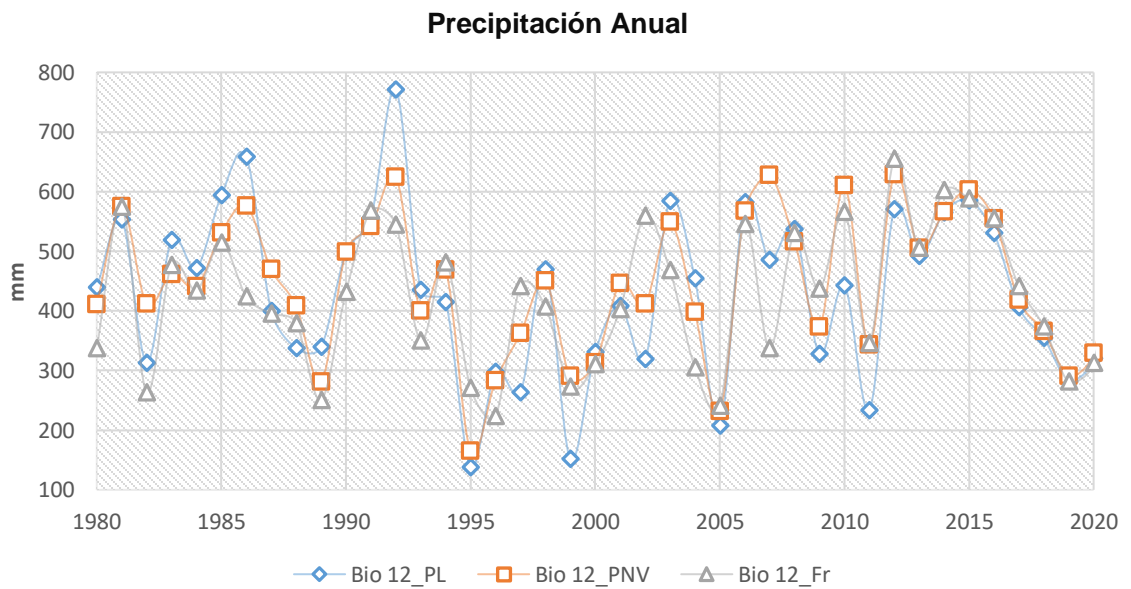


Figura 16. Gráfica índice Precipitación Anual.

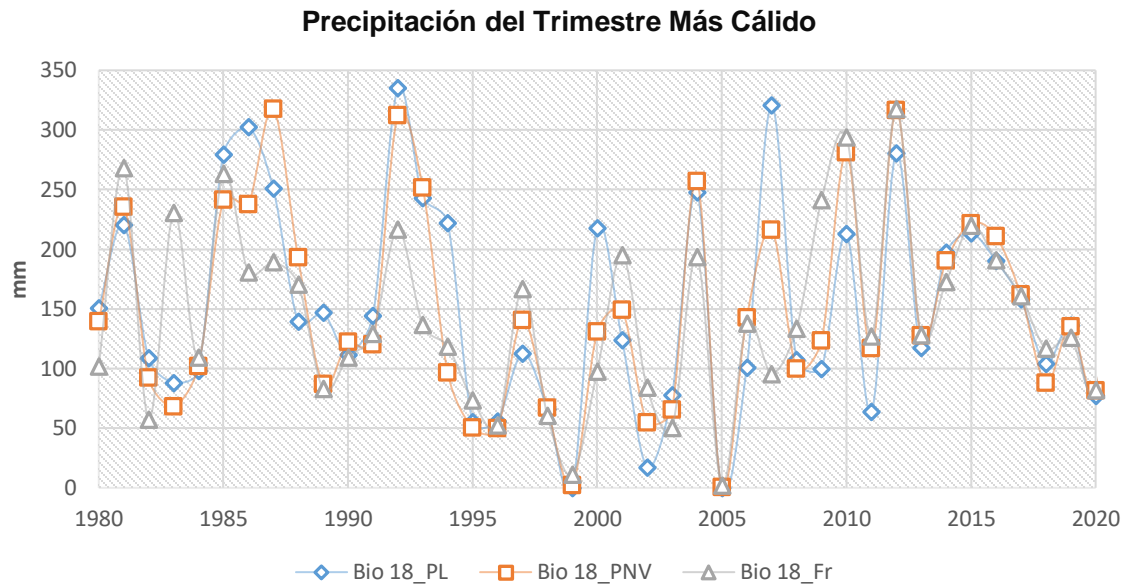


Figura 17. Gráfica Índice Precipitación del Trimestre Más Cálido.

4.2 Dinámica en el uso eficiente del agua

El uso eficiente del agua para los cuatro sitios se analizó conforme a las estaciones anuales (i.e., Invierno, Primavera, Verano, Otoño) y el total de datos, comprendiendo el periodo de tiempo de estudio (2001 – 2021; Figura 18-22). Los resultados referentes a las diferencias estadísticas con base en los análisis de varianza de medias de una vía por ANOVA y Kruskal-Wallis, indican que para al menos un sitio de estudio la media es distinta al resto en cada estación anual, por lo que, es necesario realizar pruebas Post-Hoc, siendo este el mismo caso para el total de los datos. Se realizaron dos pruebas Post-Hoc, Holm y Tukey, según sea el caso. Para la prueba Holm los resultados indican su aplicación en dos conjuntos, estación de verano y el total de datos; en la estación Verano, mostrando diferencias entre los sitios B3-B4, B4-B2 y B2-B1; además para el total de datos, diferencia entre B3-B4, B3-B1, B4-B2, B4-B1 y B2-B1 Cuadro 11. Respecto a la prueba Tukey, se aplicó en tres estaciones anuales (primavera, otoño e invierno) para primavera; se muestra diferencia entre B3-B4, B3-B2, B4-B2, B4-B1 y B2-B1; en otoño

discrepancia entre B3-B4 y B3-B1; por último, invierno, valor diferenciados entre B4-B2 Cuadro 11. El resumen de las pruebas estadísticas se presenta en el **Cuadro 11**, donde se corroboran la diferencia de medias para los diferentes sitios de estudio, añadiendo el valor medio de cada sitio en las diferentes estaciones y conjunto de datos Cuadro 12 .

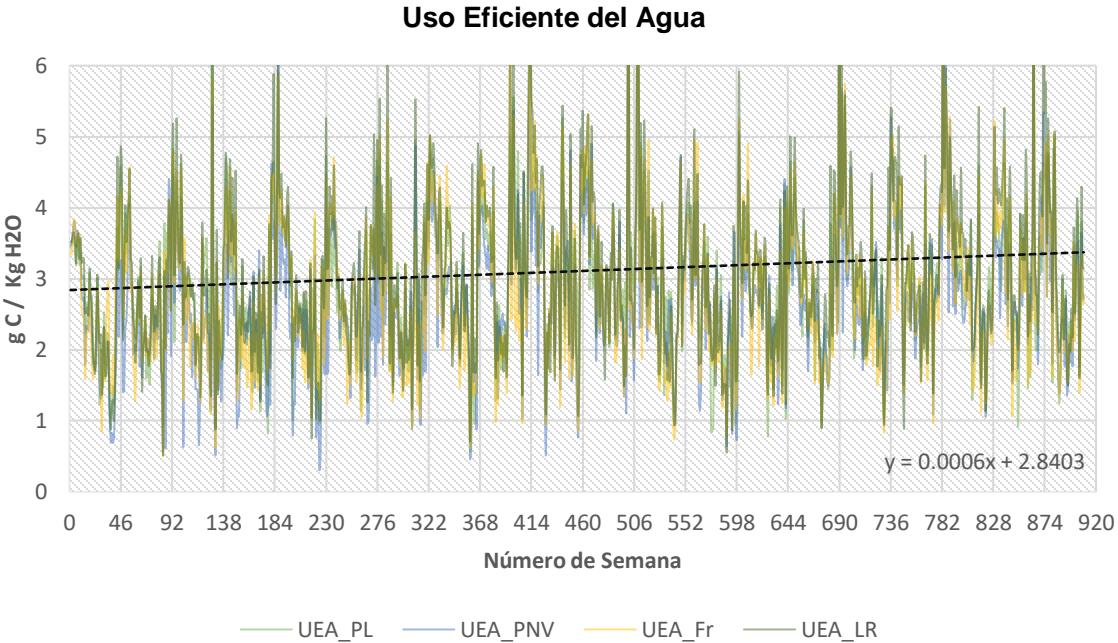


Figura 18. Gráfica Semanal de todo el set UEA 2001- 2021

UEA Primavera

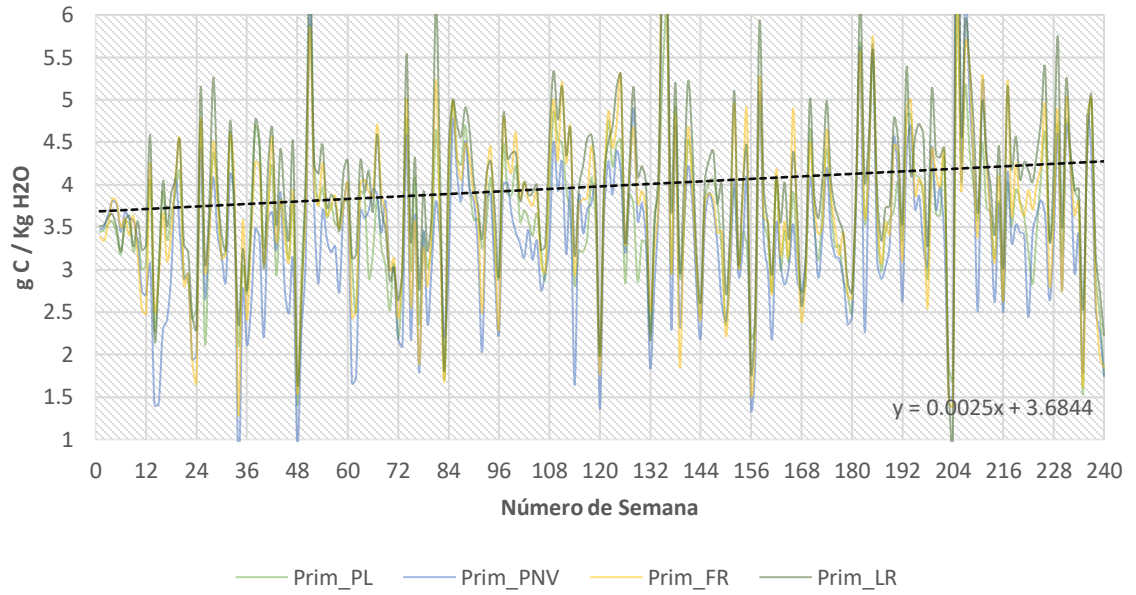


Figura 19. Gráfica UEA Set Primavera

UEA Verano

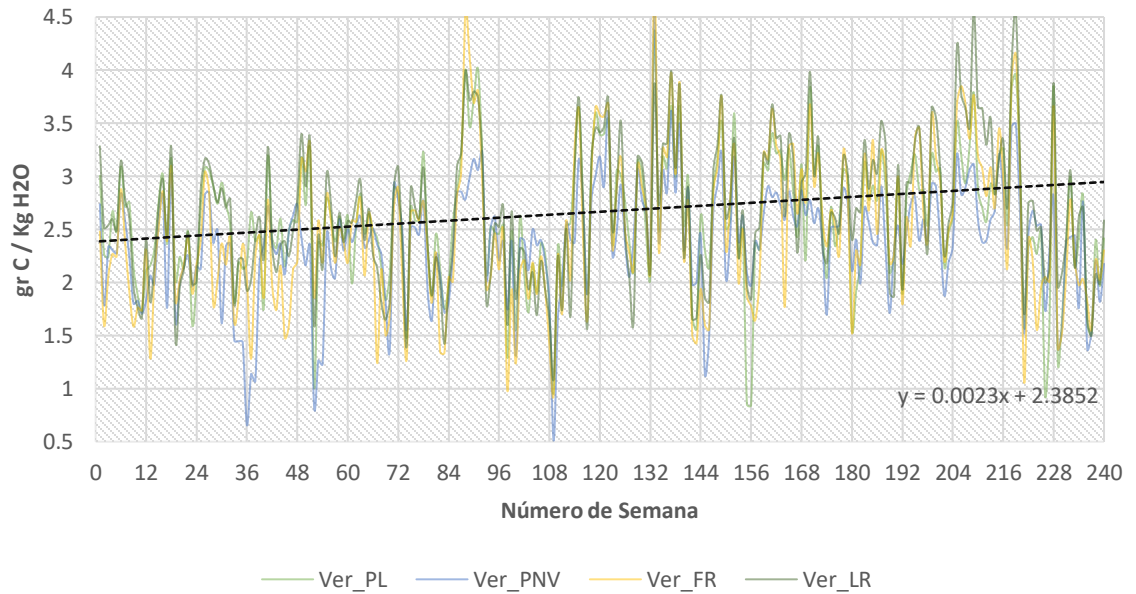


Figura 20. Gráfica UEA Set Verano

UEA Otoño

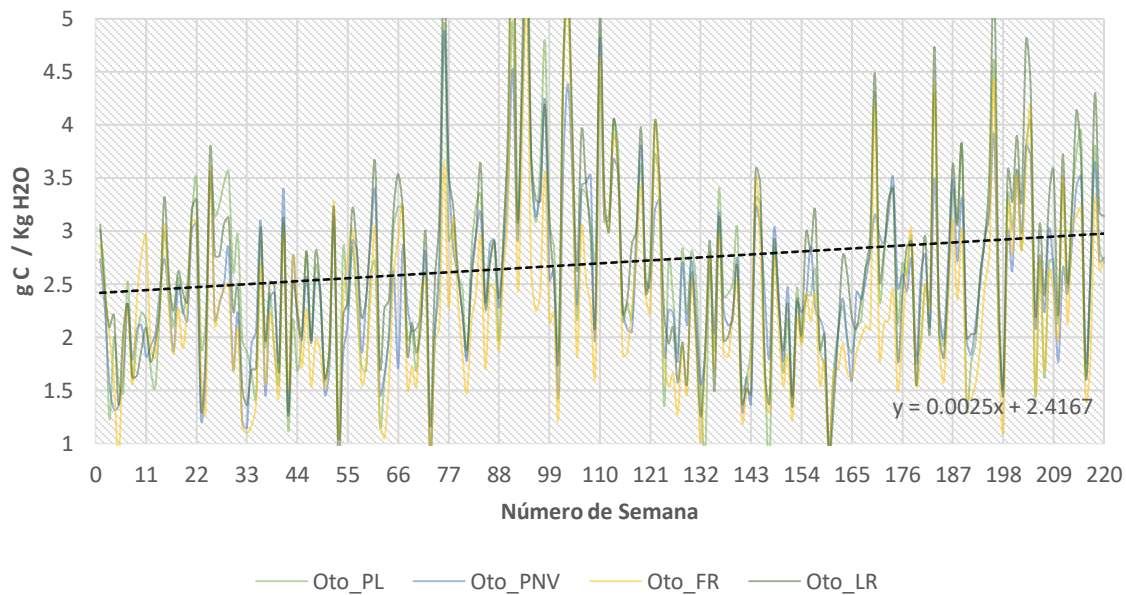


Figura 21. Grafica UEA Set Otoño

UEA Invierno

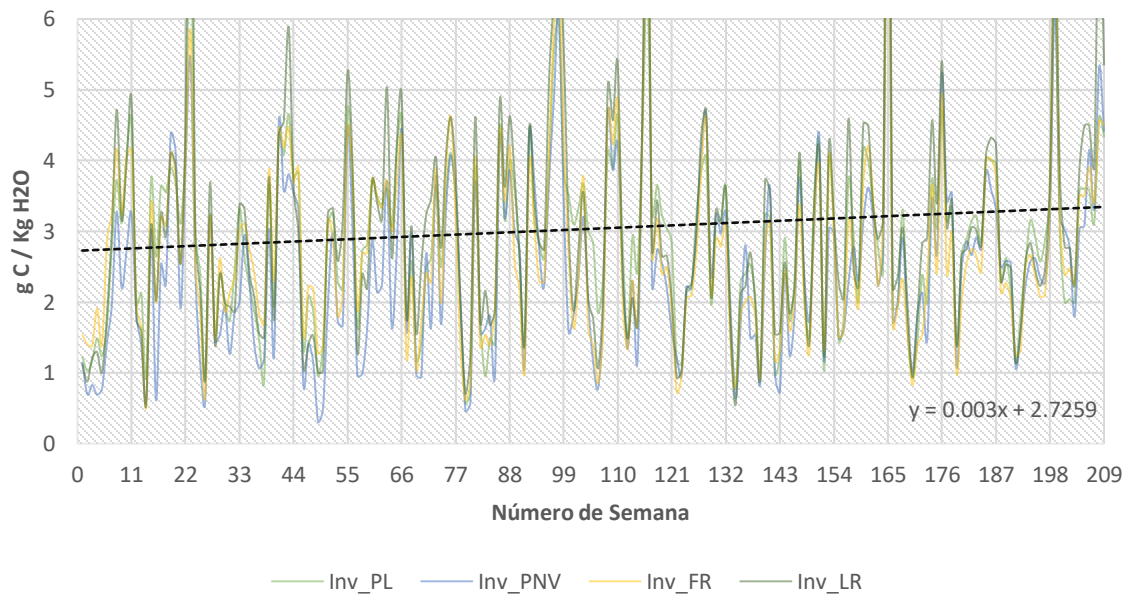


Figura 22. Grafica UEA Set Invierno

Cuadro 11. P- Value para series de UEA

Sitios	P-Value de la Serie				
	Sem	Prim	Ver	Oto	Inv
B3-B4	H($1.2 \cdot 10^{-06}$)	T ($8.7 \cdot 10^{-03}$)	H($1.3 \cdot 10^{-02}$)	T($2.7 \cdot 10^{-05}$)	T(0.120)
B3-B2	H(0.091)	T ($4.7 \cdot 10^{-04}$)	H(0.6923)	T(0.074)	T(0.396)
B3-B1	H(0.014)	T (0.5074)	H(0.0671)	T(0.005)	T(0.767)
B4-B2	H($3.5 \cdot 10^{-12}$)	T ($1 \cdot 10^{-10}$)	H($4.7 \cdot 10^{-05}$)	T(0.126)	T($9 \cdot 10^{-04}$)
B4-B1	H(0.016)	T ($3.5 \cdot 10^{-05}$)	H(0.692)	T(0.570)	T(0.598)
B2-B1	H($1.2 \cdot 10^{-06}$)	T ($5.1 \cdot 10^{-02}$)	H($4.0 \cdot 10^{-04}$)	T(0.804)	T(0.054)

H(p-value) valor de p prueba Holm; T(p-value) valor de p prueba Tukey; Sem: Semanal; Prim: Primavera; Ver: Verano; Oto: Otoño; Inv: Invierno.

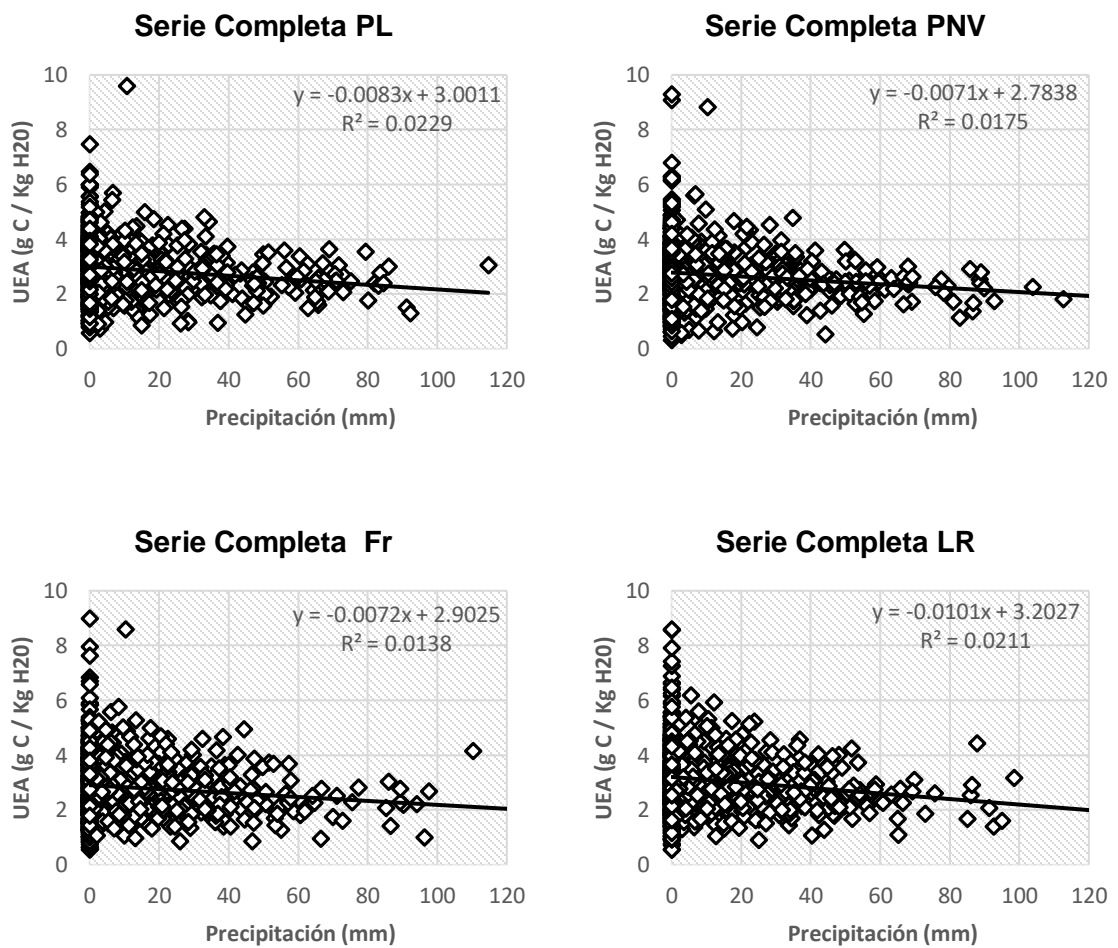
Cuadro 12. Valor promedio del UEA (g C / Kg H₂O)

		Serie				
		Completa	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Sitio	B1	2.92+/- 0.98	3.60+/-0.61	2.59+/-0.61	2.59+/-0.84	2.87+/-1.25
	B2	2.70+/-1.02	3.37+/-1.0	2.38+/-0.54	2.52+/-0.74	2.52+/-1.33
	B3	2.83+/-1.12	3.71+/-0.95	2.49+/-0.70	2.32+/-0.86	2.73+/-1.32
	B4	3.11+/-1.20	3.98+/-0.96	2.67+/-0.65	2.70+/-0.94	3.03+/-1.59

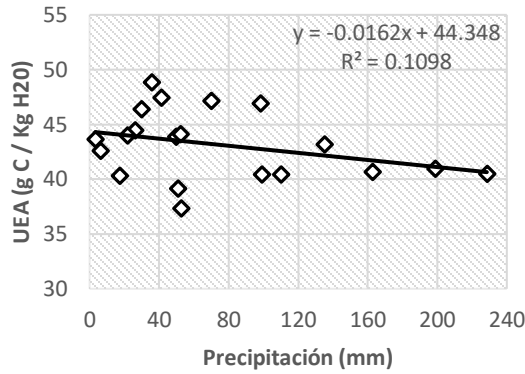
4.3 Relación entre Precipitación y UEA

La relación entre la precipitación y el UEA se llevó a cabo por un modelo de regresión lineal simple, esto para cada uno de los sitios de estudio y sus estaciones (Figura 23). En general, los valores de correlación tuvieron un rango entre -0.117 y -0.374 siendo menor para Freixenet en otoño y mayor, para el mismo Freixenet, en el conjunto total de datos, Cuadro 13. De manera general, la correlación entre la precipitación y el UEA indica que conforme la precipitación aumenta el UEA disminuye, esto tanto a una escala anual como estacional; mientras que, al presentarse periodos anuales o estacionales por debajo de la media de precipitación, el UEA era mayor (Figura 26). Para buscar la relación entre la

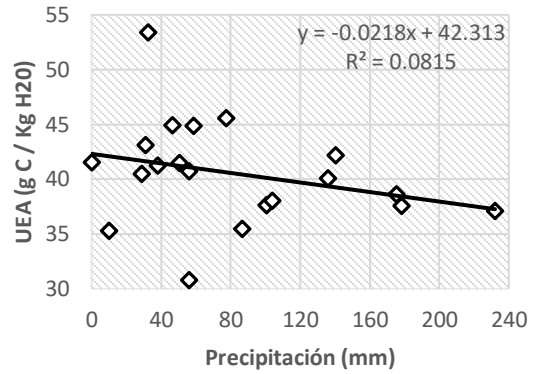
precipitación y el UEA se estimaron los coeficientes de correlación y determinación para los cuatro sitios en todas las estaciones anuales y el conjunto de datos, Figura 23. Al final de la sección se concentra los coeficientes de correlación y determinación, Cuadro 13, donde podemos notar valores de correlación negativos y bajos, que representan una disminución del UEA conforme crece la precipitación en todas las gráficas representadas.



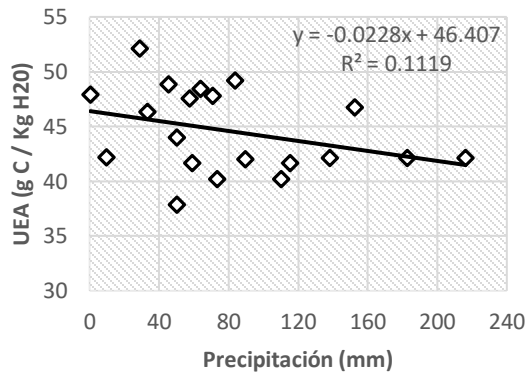
Serie Anual Primavera PL



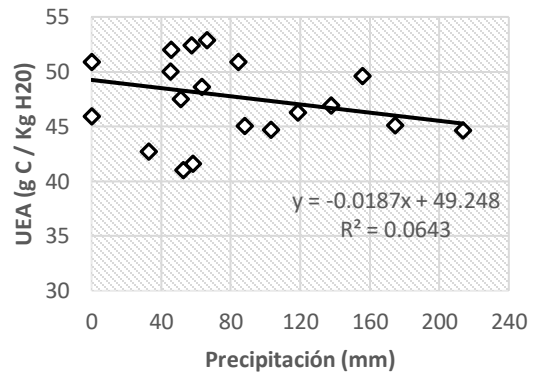
Serie Anual Primavera PNV



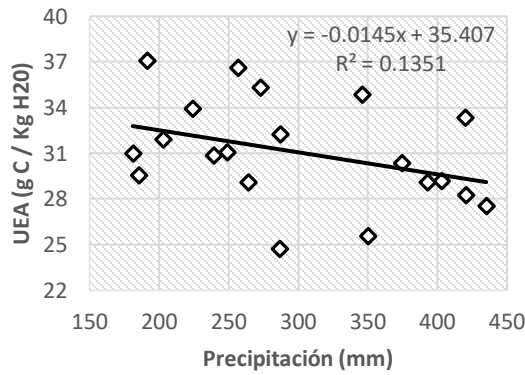
Serie Anual Primavera Fr



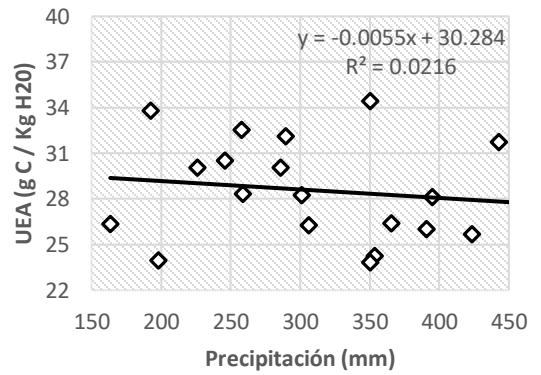
Serie Anual Primavera LR



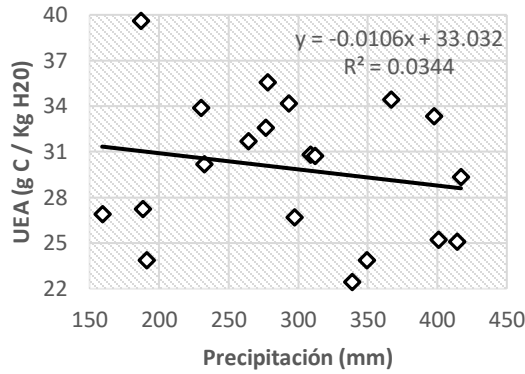
Serie Anual Verano PL



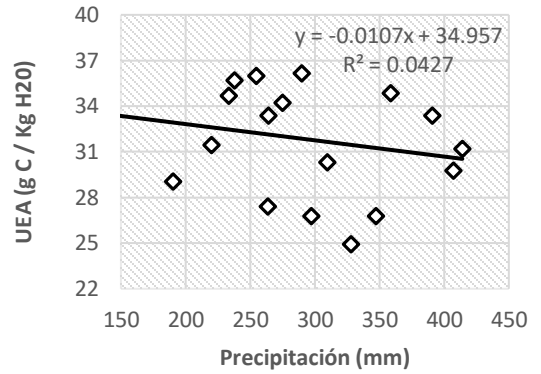
Serie Anual Verano PNV



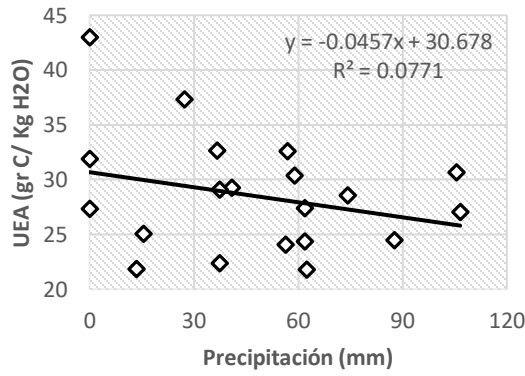
Serie Anual Verano Fr



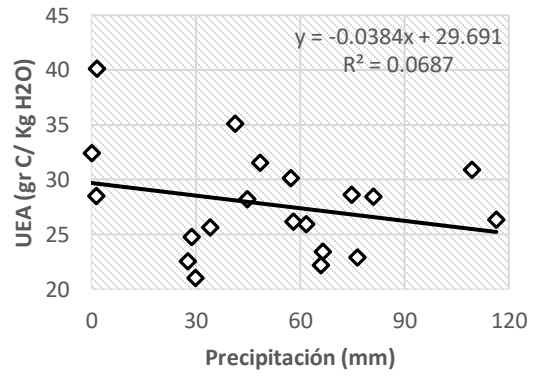
Serie Anual Verano LR



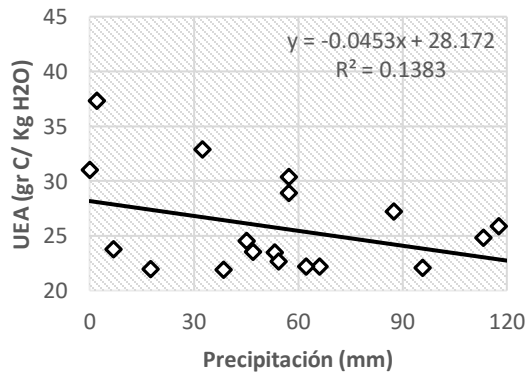
Serie Anual Otoño PL



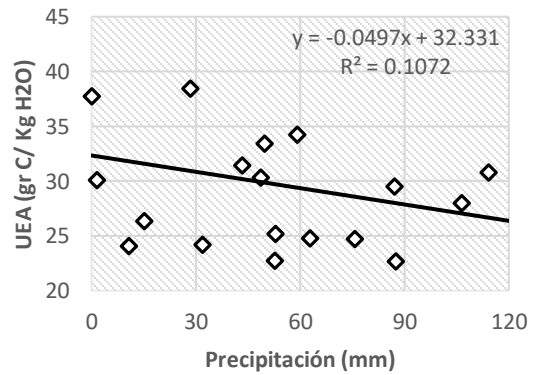
Serie Anual Otoño PNV



Serie Anual Otoño Fr



Serie Anual Otoño LR



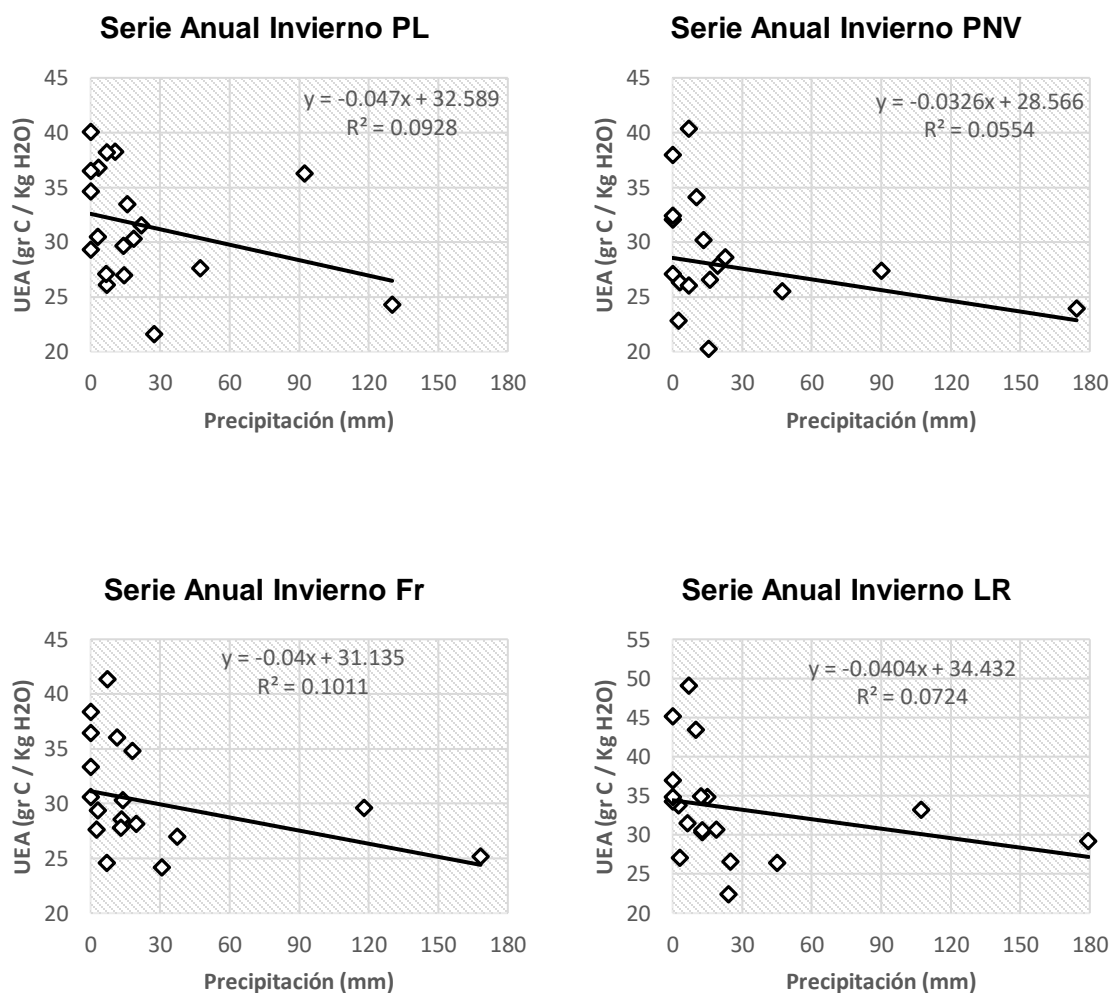


Figura 23. Conjunto de gráficas en la relación UEA y Precipitación

Cuadro 13. Lista de coeficientes de determinación y correlación

Serie	Puerta de Lobo		Parche Natural		Freixenet		La redonda	
	R	R ²	R	R ²	R	R ²	R	R ²
Sem	-0.151	0.023	-0.132	0.018	-0.117	0.014	-0.145	0.021
Prim	-0.331	0.110	-0.285	0.082	-0.335	0.112	-0.254	0.064
Ver	-0.368	0.135	-0.147	0.022	-0.185	0.034	-0.207	0.043
Oto	-0.278	0.077	-0.262	0.069	-0.372	0.138	-0.327	0.107
Inv	-0.305	0.093	-0.235	0.055	-0.318	0.101	-0.269	0.072

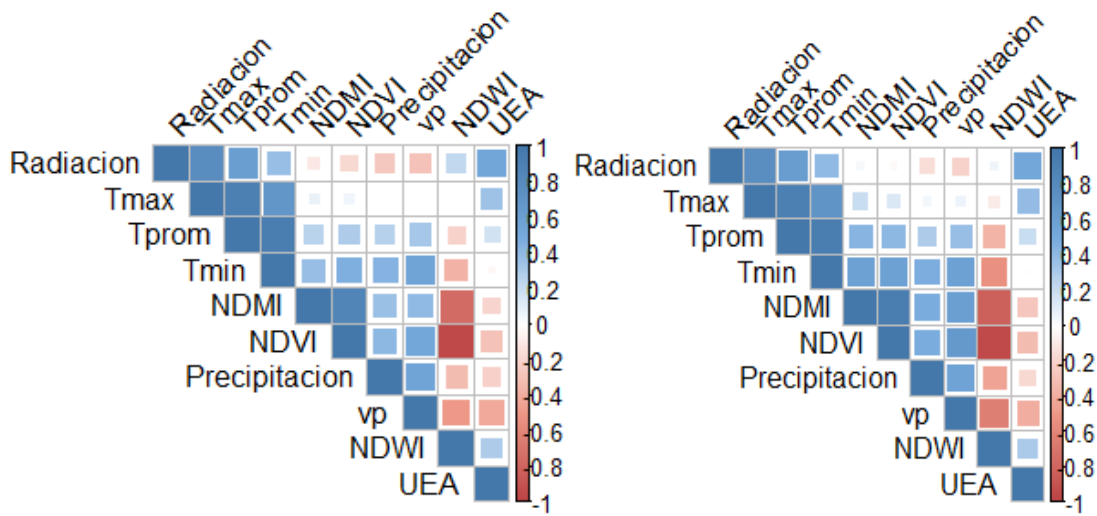
R² Coeficiente de determinación; R Coeficiente de correlación; Sem: Semanal; Prim: Primavera; Ver: Verano; Oto: Otoño; Inv: Invierno.

4.4 Correlación entre variables ambientales

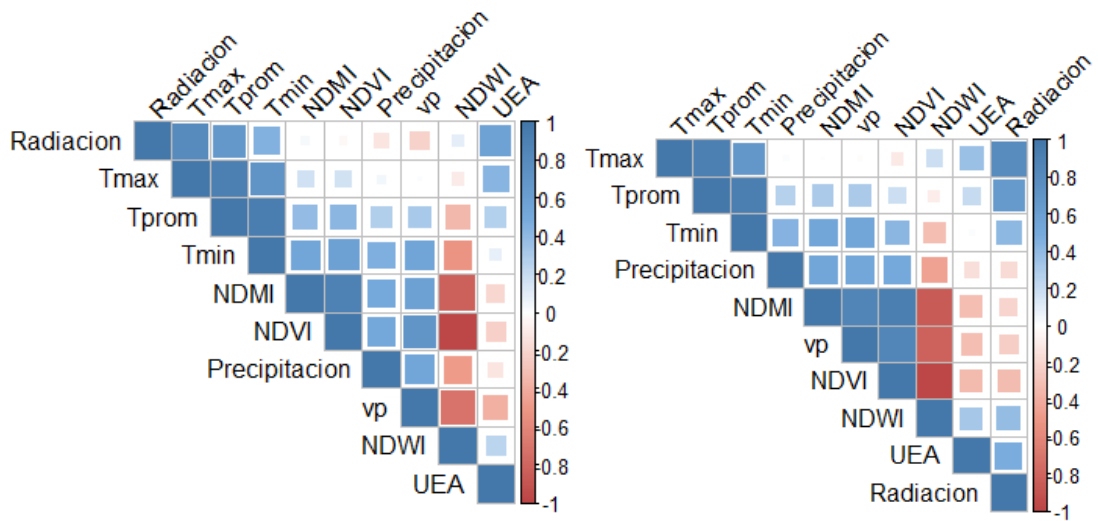
En este apartado se emplea el total de variables mencionadas en la sección 3.5 Base de Datos (i.e., Precipitación, UEA, Temperatura). Se presentan los resultados a una escala temporal quincenal con el propósito de conocer la relación del UEA con las variables ambientales que influyen directamente en su dinámica Figura 24, particularmente el acoplamiento quincenal, para visualizar la relación entre la interacción de variables debido al ecosistema presente en los sitios de estudio. Los métodos empleados son los siguientes: Correlograma, Árboles de decisión y Correlación Múltiple.

4.4.1. Correlogramas

Los resultados del correlograma de Pearson, muestra el resultado para los cuatro sitios de estudio, en donde se observan, para varios casos, una correlación positiva tanto mayor a 0.7 como menor a - 0.7 para las variables que se muestran a continuación. De manera positiva, radiación con la temperatura mínima, máxima y promedio; precipitación con los índices NDMI, NDVI y presión de vapor; UEA con radiación, temperatura máxima e índice NDWI. Además de manera negativa, NDWI con NDMI, NDVI, presión de vapor, temperatura mínima y precipitación; UEA con presión de vapor, precipitación, NDVI y NDMI. Resaltar la variable radiación, puesto que tiene diferente comportamiento de correlación con las variables analizadas dependiendo del sitio.



Gráfica izquierda Viñedo La Redonda y Derecha Viñedo Puerta de Lobo.



Gráfica izquierda Viñedo Freixenet y Derecha Parche Natural de Vegetación.

Figura 24. Correlogramas de Pearson de los sitios de estudio

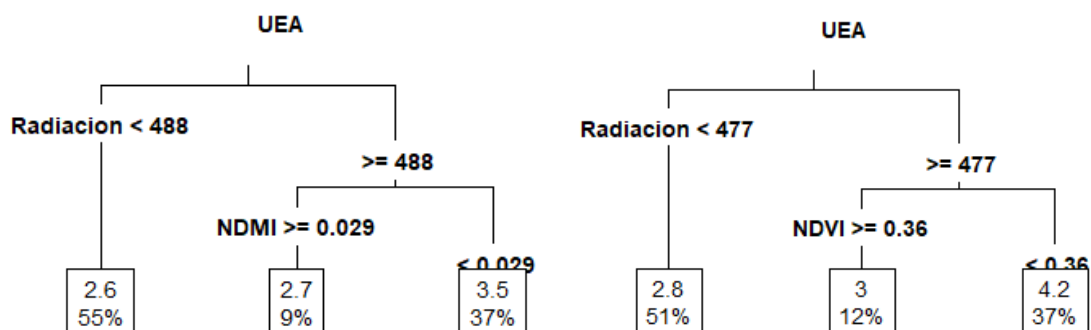
4.4.2 Árboles de Decisión

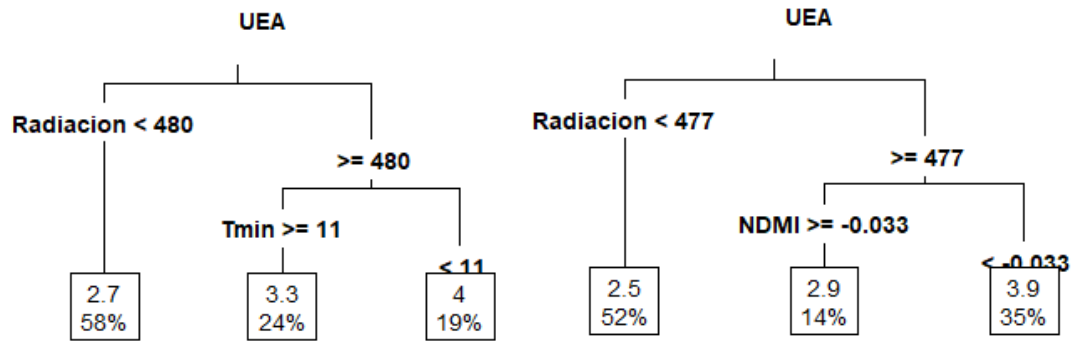
Una vez identificada las correlaciones entre variables, se procede a obtener cuatro arboles de decisión, uno para cada sitio de estudio, teniendo como base de datos el conjunto de resolución quincenal para la serie de tiempo de 1980-2021. La variable UEA funge como independiente y el resto como predictoras obteniendo los arboles de decisión de la Figura 25. Cada árbol de decisión cuenta con estadísticas propias de efectividad de predicción total y por número de nodos, las cuales se muestran en el

Cuadro 14. Porcentaje de efectividad en los arboles de decisión

Sitio	Número de Nodos	Error (%) por número de nodos	Efectividad global (%)
Viñedo P.Lobo	2	16	93.2
Parche Natural	2	23	86.1
Viñedo Freixenet	2	12	90.7
Viñedo La redonda	2	13	91.5

conforme a lo establecido en la sección 3.6.3 Árboles de decisión. Para todos los casos se cuenta con la variable radiación en el primer nodo y el subsecuente varia.





Los sitios se mencionan de la parte superior izquierda y son: Viñedo puerta de lobo, Parche Natural de Vegetación, Viñedo Freixente y Viñedo La reonda.

Figura 25. Árboles de decisión para los sitios de estudio

Cuadro 14. Porcentaje de efectividad en los arboles de decisión

Sitio	Número de Nodos	Error (%) por número de nodos	Efectividad global (%)
Viñedo P.Lobo	2	16	93.2
Parche Natural	2	23	86.1
Viñedo Freixenet	2	12	90.7
Viñedo La redonda	2	13	91.5

4.4.3 Correlación múltiple

Para identificar las variables significativas que predicen el comportamiento del UEA, se calcula la correlación múltiple entre cada una de ella en los sitios analizados. Para todos los casos se encontraron cuatro variables significativas, siendo la precipitación y radiación comunes además de dos variables distintas que en su conjunto obtienen un coeficiente de determinación como se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Correlación múltiple para cada sitio

Con base tanto en los arboles de regresión como en el análisis de correlación múltiple, las variables ambientales que tuvieron mayor influencia en el uso eficiente del agua son:

1. Viñedo Puerta de Lobo: Radiación, Precipitación y NDMI.
2. Parche de Vegetación: Radiación, Precipitación y NDVI.
3. Viñedo Freixenet: Radiación, Precipitación y NDMI.
4. Viñedo la redonda: Radiación, Precipitación y NDVI.

Sitio	Variable	Pr (> t)	R ²
Viñedo Puerta de Lobo	Precipitación	0.0082	0.38
	Radiación	1.2*10-14	
	Pre. de vapor	0.0174	
	Tem. Min	0.0423	
Parche N. de Vegetación	Precipitación	0.00142	0.30
	Radiación	1.03*10-5	
	Tem.Min	0.0295	
	NDVI	0.0325	
Viñedo Freixenet	Precipitación	0.0022	0.43
	Radiación	2*10-16	
	Pre. de vapor	0.0005	
	NDMI	0.0124	
Viñedo La Redonda	Precipitación	0.0146	0.40
	Radiación	1.1*10-07	
	Pre. de vapor	0.0015	
	NDVI	0.0014	

Capítulo 5. Discusión

Los resultados referentes a la comparación de medias para los distintos sitios de estudio muestran que la hipótesis general del estudio se cumple parcialmente. Debido a que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el periodo interanual de estudio entre los sitios de viñedo, pero si presentan diferencias con el parche natural de vegetación, sin embargo, no hubo diferencias significativas para las estaciones de verano y del otoño. Este comportamiento se puede deber a la influencia de los factores ambientales, las diferencias en la cobertura vegetación, así como posiblemente por el manejo antropogénico o ausencia de el para los distintos sitios de estudio. Lo anterior abre una comprensión en el UEA para el manejo vitivinícola en la región de Querétaro con respecto a la dinámica del UEA de la vegetación natural dentro de la ecorregión semiárida del altiplano mexicano en la región de Querétaro.

5.1 Relación entre la precipitación y la temperatura en uso eficiente del agua

La dinámica del UEA se encuentra influenciada directamente tanto por la precipitación como por la temperatura debido a su fuerte relación con los procesos fenológicos (Medrano et al., 2015), las condiciones para ambas variables tanto a nivel anual como estacional pueden ser descritas por las características bioclimáticas de la zona. Los factores bioclimáticos que mejor describen la región de estudio son (Cuadro 10): estacionalidad de la temperatura, temperatura anual, precipitación anual y precipitación del trimestre más cálido. Estas características son relevantes para la dinámica de los procesos fisiológicos de la vegetación para sistemas limitados por agua dentro de las ecorregión de elevaciones semiáridas (Gonzalez Medrano, 2012), puesto que: 1) La precipitación dentro del trimestre más cálido estimula de una manera más eficiente los procesos fisiológicos de la

vegetación, debido a que se presentan las condiciones óptimas entre humedad y energía para la captura de carbono (Villarreal et al., 2016); 2) La precipitación media anual tiene una relación directa con la humedad disponible para los procesos de captura de carbono y de evapotranspiración; 3) así mismo, el rango de temperatura anual también condiciona la tasa o magnitud en los procesos de captura de carbono y de evapotranspiración; 4) Finalmente, el rango de la estacionalidad de la temperatura ejerce un control directo para el UEA, esto debido a que condiciones de una temperatura alta la vegetación reduce las pérdidas potenciales por transpiración, mientras que para bajas temperaturas se presenta una baja respuesta metabólica por parte de la vegetación (Aguirre Gutierrez, 2014). Para estos factores no se encontraron diferencias significativas dentro de la región de estudio, lo cual permite contrastar la respuesta en el UEA para los viñedos y la vegetación natural de la zona, tanto a escala anual como estacional.

El comportamiento de la estacionalidad de la temperatura, oscila entre 1.5 °C a 3.3°, y el rango de la temperatura anual, que representa la diferencia entre la temperatura mensual máxima y mínima en cada año, con valores de 20 °C a 29°C (Figura 14 y Figura 15 respectivamente) representan condiciones que permiten evaluar la respuesta de la vegetación a nivel tanto anual como estacional ante condiciones opuestas. Estos dos índices indican la importancia de la variabilidad interanual de la temperatura en la región semiárida cubriendo con la temperatura media necesaria para el desarrollo de la vid (entre 11 °C y 18 °C), los cuales no presentan cambios en la desviación estándar mayores a 4°C (Hidalgo Fernandez-Cano & Hidalgo Togados, 2011). Los dos índices restantes, se refieren a la precipitación, precipitación anual, Figura 16, y precipitación del trimestre más cálido, Figura 17, lo que señala la importancia de la cantidad total anual para los requerimientos totales de la vid y en el trimestre más cálido, principalmente en la maduración del fruto, que es el periodo con mayor actividad de transpiración y evaporación de la humedad (Miras-Avalos & Araujo, 2021) .

5.2 Variación del Uso Eficiente del Agua

Para el uso eficiente del agua (UEA) se analiza su comportamiento a escala estacional (primavera, verano, otoño e invierno) con una resolución temporal semanal en un periodo de tiempo comprendido entre 2001 y 2021.

5.2.1 Tendencia del UEA

En la serie completa, Figura 18, se tiene un promedio menor para el parche natural de vegetación con valor de 2.70 g C / Kg H₂O, a diferencia de los viñedos, puerta de Lobo 2.92, freixenet 2.83 y la redonda 3.11 g C / Kg H₂O . Al realizar todas las posibles combinaciones entre viñedos y parche natural, Cuadro 11, podemos notar que solo la combinación freixenet y parche natural de vegetación tiene un valor de significancia alfa un poco mayor a 0.05, lo que significa que no siempre el comportamiento de medias en los viñedos y el parche natural de vegetación es distinto, corroborando que la variabilidad del UEA difiere para tipos de vegetación y respecto a su distribución espacial, ya que, aunque la zona de estudio se encuentre dentro de los límites de la región semiárida del altiplano mexicano, el valor del UEA se modifica por intervención antropogénica en los cultivos y no en las condiciones bioclimáticas como se mencionó en el capítulo anterior (Zhao et al., 2021). La tendencia general del UEA para los distintos sitios tiene un crecimiento de 2.9 a 3.3 g C / Kg H₂O al considerar los sitios de manera conjunta. Estas condiciones lo que confirma es la tendencia positiva para América del Norte (Huang et al., 2017) sugiriendo una adaptabilidad, como los presentes en zonas áridas, de resiliencia al déficit hídrico, disminuyendo la pérdida de agua y conservando el desarrollo vegetativo (L. Huang et al., 2017). Los resultados promedio en todas las series semanales muestran valores superiores al promedio mundial de 1.70 g C / Kg H₂O (Xue et al., 2015) y a la región semiárida del valle de Guadalupe en Baja California, para vegetación Matorrales Esclerófilo, 2.46 g C / Kg H₂O (Aguirre Gutierrez, 2014), pero tiene un comportamiento muy similar al Matorral cerrado (matorrales bajos y densos de 1 a 2 m y cobertura de vegetación superior al 60%) con valor promedio

2.90+/- 1.2 (Lai et al., 2022; Xue et al., 2015) lo que puede entenderse como la adaptabilidad del ecosistema a consecuencia de la desertificación en la zona.

Estos resultados son de suma importancia debido a la alta vulnerabilidad de nuestro país ante el cambio climático, principalmente referente a cambios en los patrones de precipitación y a un aumento de la temperatura (Diffenbaugh et al., 2008), y sobre todo un potencial cambio en la composición de las comunidades vegetales del parche natural de vegetación, y la potencial modificación en los planes de manejo de la vid para los sitios vitivinícolas. Referente a la adaptación ante condiciones de mayor aridez y aumento de temperatura para los sitios vitivinícolas, los planes de manejo incluyen modificaciones en el tipo de planta de cultivo, así como referente al manejo e implementación de distintas técnicas vitivinícolas ya que la planta adopta una tendencia a alcanzar su madurez en un periodo climático no tan favorable (Leeuwen et al., 2019).

5.2.2 Tendencia estacional del UEA

El comportamiento estacional de las medias del UEA para las estaciones climáticas es distinta para todos los sitios, Cuadro 11, ya que para primavera tiene cinco grupos desiguales, a diferencia de verano con tres, otoño con dos e invierno con uno. Esto se debe a la diferencia en la actividad metabólica vegetal la cual es mayor en primavera y va decreciendo hasta llegar a invierno lo que habla de comportamiento muy distintos en verano y semejantes en invierno. Lo anterior aumenta su impacto debido a que mientras exista mayor humedad se pueden apreciar un UEA distinto, lo cual nos habla de distintas condiciones funcionales referentes a las diferencias en el tipo de plantas entre los viñedos y la composición de vegetación del parche natural. Mientras se vuelve más seco el UEA tiende a ser similar, lo cual nos indica la adaptabilidad general de los sitios a las condiciones de menor disponibilidad de agua. La tendencia promedio en todas las series estacionales es creciente, al igual que para la serie total, contando con valores de

3.7 a 4.3 g C / Kg H₂O en primavera, 2.4 a 2.9 g C / Kg H₂O en verano, 2.4 a 3 g C / Kg H₂O en otoño y 2.8 a 3.3 g C / Kg H₂O en invierno indicando adaptabilidad en cada una de las estaciones. Resaltar que el parche natural de vegetación siempre cuenta con un UEA menor que los viñedos posiblemente debido a menor disponibilidad hídrica suministrada. Estos resultados son importantes para la región debido a que se espera una menor disponibilidad de agua, con lo cual podría haber cambios importantes en la vid referente a su producción, cantidad de azúcares, sabor de vino y la relación calidad precio por hectárea (Leeuwen et al., 2019)

5.3 Variación de la precipitación respecto al UEA

Una de las variables más importantes en ecosistemas semiáridos es la precipitación (Austin et al., 2004; Gonzalez Medrano, 2012) por ello se decide analizar la relación entre precipitación y UEA, Figura 23. En términos de la serie total anual, se observa una semejanza de distribución normal entre los pares ordenados, los cuales tienen una tendencia de decremento del UEA conforme la precipitación aumenta, esta tendencia permanece para todos los sitios y en todas las series, Cuadro 13, lo que confirma lo establecido por (Xue et al., 2015) al observar que en ecosistemas influenciados por la cantidad de agua presente surge la tendencia previamente mencionada. La tendencia antes descrita aunado a los cambios abruptos en la cantidad de precipitación anual acumulada, es decir, la transición años secos a húmedos y húmedas a secos, Figura 26 , genera un aumento del UEA para la transición de año húmedo a seco, ocasiona cambios en la composición vegetal para adaptarse a la sequía que deriva en menor rendimiento y cambios en el contenido de azúcares y, referente al decremento de año seco a húmedo, impactando en las etapa fenológica, particularmente en el recorte de tiempo en el periodo de maduración (Leeuwen et al., 2019). Estos problemas se potencializan para la zona vitivinícola en años venideros debido a condiciones de cambio climático y generara una reducción de producción (Medrano et al., 2015).

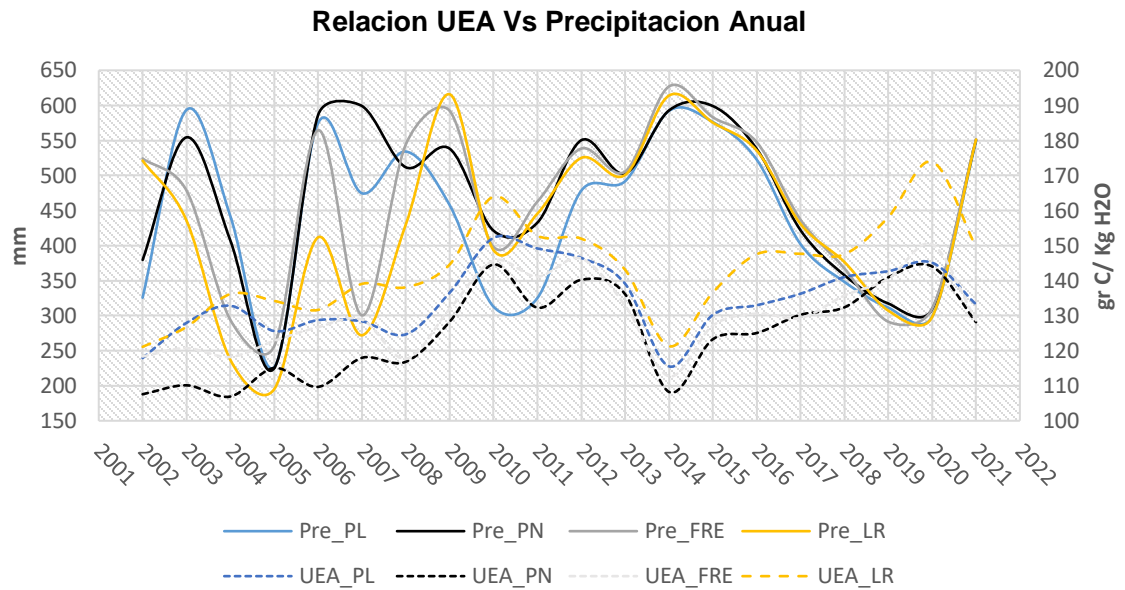


Figura 26. Relación UEA VS Precipitación Anual

5.4 Uso Eficiente del Agua y su relación con variables ambientales

Las variables meteorológicas juegan un papel importante en la fluctuación estacional y anual del UEA, y en combinación con las variables morfológicas (área foliar, biomasa, densidad de raíces y número de estomas) propician comportamientos diferentes e inclusive opuestos para diferentes periodos de tiempo (anual, estacional entre otros) y escala (ecosistémica, regional entre otras) (Xue et al., 2015), es decir, es muy importante las relaciones dentro de áreas locales de estudio, ya que aun estando en áreas con similitud, las combinaciones pueden ser muy locales. Por ello a través de los árboles de decisión se obtuvo que la variable radiación es la principal clasificadora del UEA en todos los sitios y en segundo lugar las variables NDMI, NDVI y temperatura mínima dependiendo el sitio. Estas características indican la fuerte influencia de las condiciones energéticas para los sitios de estudio, condiciones que son congruentes con la dinámica general de los ecosistemas tropicales semiáridos en donde se presenta una alta demanda

evaporativa derivada de las altas condiciones energéticas y del alto déficit de vapor de presión. En segundo orden jerárquico tenemos condiciones relacionadas a la disponibilidad de humedad (i.e., NDMI), así como el desarrollo de la vegetación (i.e., NDVI); en condiciones que indican presencia de humedad en la región y cierto grado de desarrollo del dosel por parte de la vegetación. Por lo tanto, bajo escenarios de cambio climático en donde se espera aumento de temperatura para la región y una disminución en la precipitación, potencialmente se tendrá una mayor influencia de las condiciones energéticas sobre el UEA, teniendo a incrementar a una escala anual.

Estas variables junto con la precipitación y presión de vapor, son significativas al utilizar el proceso de correlación múltiple, Cuadro 15, es decir, tiene una influencia en los cambios del UEA. Por las condiciones propias de la región semiárida la precipitación, la radiación y temperatura son muy importantes para el desarrollo ecosistémico global (Gonzalez Medrano, 2012). Investigaciones previas (Liu et al., 2016) sugieren que la radiación es un factor muy importante en los ecosistemas con poca disponibilidad de agua, ya que, su aumento puede ser responsable de mayor absorción de carbono bajo condiciones óptimas de humedad, al igual, se podría tener un incremento en la ET debido a una mayor evaporación del suelo y transpiración vegetal. Referente a la temperatura, estudios de (Xue et al., 2015) han encontrado que para sitios con temperatura media inferior a 20 °C, como es el caso de la región, Cuadro 8, el UEA tiende a aumentar hasta alcanzar valores promedio de 3.51 g C/kg H₂O.

Pero como se ha demostrado en mediciones insitu para regiones como Australia, Puerto Rico y Estados Unidos la capacidad ecosistémica para adaptarse a las condiciones hidroclimáticas propias de cada sitio sugieren relaciones específicas entre variables (Campos et al., 2013). Por ello a través de correlogramas se encontraron para todos los sitios correlaciones altamente positivas (entre 0.72 y 0.94) para las variables: radiación con temperatura mínima, máxima y promedio; precipitación con los índices NDMI, NDVI y presión de vapor; UEA con radiación de

onda corta, temperatura máxima, e índice NDWI. Estas relaciones son un tanto predecibles debido a la zona semiárida (Gonzalez Medrano, 2012), pero debido a su alta correlación es importante resaltar su impacto en el cambio climático y más aún por la relación UEA-Temperatura Máxima, ya que se espera tendencias a la alza de temperatura, lo que modificara la dinámica del UEA. En términos de correlación negativa se tiene con un alto nivel (entre -0.71 y -0.92) a las variables: NDWI con NDMI, NDVI, precipitación, presión de vapor y temperatura mínima; UEA con precipitación, presión de vapor y los índices NDVI y NDMI. Lo anterior confirma lo expuesto en la Figura 26, en la transición de años secos a húmedos y viceversa, siendo importante comprender su impacto en los ecosistemas semiáridos, ya que, se puede tener disponibilidad de humedad en el agua (NDWI) en épocas secas y no verse reflejada en la cantidad de agua disponible en la vegetación (NDMI) y por tanto en su estado de salud (NDVI).

Capítulo 6. Conclusión

La integración de las diversas variables climatológicas para el estudio del uso eficiente del agua en la región vitivinícola semiárida de Querétaro, permitió comprender la adaptación del UEA y su relación particular con las variables analizadas en la microrregión conforme a los siguientes puntos:

- Se encontró que no existe diferencias ambientales en la región semiárida vitivinícola, a través de la aplicación de índices bioclimáticos, importantes para dictaminar mismas condiciones fisiológicas de las especies.
- La región representada por los viñedos y el parche natural de vegetación cuenta con una tendencia de crecimiento en la temperatura media anual además de un comportamiento oscilante, respecto a la precipitación media anual. Lo anterior sugiere la presencia del cambio climático y repercute en las propiedades funcionales y estructurales del ecosistema agravando problemas presentes como la desertificación.
- Existe la misma tendencia de crecimiento del UEA en los viñedos y el parche natural de vegetación, no solo en el set de datos completo, sino también en los sets de estaciones climáticas. Este incremento de valor promedio es de 2.9 a 3.3 g C / Kg H₂O, por lo que se sugiere una adaptabilidad al ecosistema a condiciones de matorral cerrado (matorrales bajos y densos de 1 a 2 m y cobertura de vegetación superior al 60%).
- El valor promedio del UEA tiene un comportamiento significativamente diferente entre las comparaciones viñedos/parche natural de vegetación y viñedo/viñedo. En los intervalos de tiempo estacionales, el UEA cuenta un comportamiento muy diferente en todos los sitios para verano y comportamientos similares al llegar a invierno.
- El parche natural de vegetación cuenta con valores de UEA más bajos que los viñedos en el conjunto de datos analizados excepto por la temporada de otoño.

- La relación entre el UEA y la precipitación dictamina, para toda las series y sitios, una disminución del UEA conforme aumenta la precipitación. En forma de serie anual, se puede percatar un aumento del UEA en la transición de año húmedo a seco y decremento de año seco a húmedo.
- Las variables Radiación y Precipitación son significativas al momento de estimar el UEA, y se añade la variable presión de vapor si se trata de viñedos. Existen además variables significativas propias de cada sitio como: NDMI, NDVI y temperatura mínima que influyen en el valor del UEA.
- La existencia de altas correlaciones entre variables ayuda a entender el comportamiento ecosistémico y por ende el UEA. Para la región se encontró correlación positiva para las variables radiación con temperatura mínima, máxima y promedio; precipitación con los índices NDMI, NDVI y presión de vapor; UEA con radiación de onda corta, temperatura máxima y el índice NDMI y NDVI. Referente a correlación negativa a las variables: NDWI con NDMI, NDVI, precipitación, presión de vapor y temperatura mínima; UEA con precipitación, presión de vapor y los índices NDVI y NDWI.

Los resultados expuestos dan bases para un entendimiento hidroclimático de adaptación fisiológica de la vegetación presente en la zona y particularmente de la vid, derivado de cambios ecosistémica en la microrregión. Se espera que el presente trabajo de pie a investigaciones más profundas en el uso eficiente del agua y fisiología vegetal a nivel hoja través de mediciones in situ.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre Gutierrez, C. A. (2014). *Variabilidad estacional e interanual en la producción primaria bruta y evapotranspiración en un ecosistema de clima mediterráneo en Baja California* [CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA]. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/933>
- Ahmadi, B., Ahmadalipour, A., Tootle, G., & Moradkhani, H. (2019). Remote Sensing of Water Use Efficiency and Terrestrial Drought Recovery across the Contiguous United States. *Remote Sensing*, 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs11060731>
- Anderson, R., Bayer, P. E., & Edwards, D. (2020). Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current Opinion in Plant Biology*, 56, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.006>
- Austin, A. T., Yahdjian, L., Stark, J. M., Belnap, J., Porporato, A., Norton, U., Ravetta, D. A., & Schaeffer, S. M. (2004). Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 141(2), 221–235. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1519-1>
- Aybar, C. (2022). *rgee: R Bindings for Calling the “Earth Engine” API (Version 1.1.4)*. Git.Hub. <https://github.com/r-spatial/rgee/issues/>
- Bakker, W. H., Gieske, A. S. M., Gorte, B. G. H., A., K., Hecker, C. A., Horn, J. A., Janssen, G. C. H. L. F., Kerle, N., Parodi, F. D. van der M. G. N., Pohl, C., Prakash, A., Ruitenbeek, C. V. R. F. J. van, Tempfli, K., Weir, M. J. C., & Woldai, T. (2004). *Principles of Remote Sensing* (L. L. F. J. and G. C. H. (eds). . Norman Kerle (ed.); Third). The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36076544/Principles_of_Remote_Sensing-libre.pdf?1419796947=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFundamental_of_Remote_sensing.pdf&Expires=1667502105&Signature=fV8p1xvscUpE0usB4oBQydHUjXdK58jonCQPloJXNnt-
- Becerril-Piña, R., Mastachi-Loza, C. A., González-Sosa, E., Díaz-Delgado, C., & Ba, K. M. (2015). Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 120, 4–13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.04.006>
- Campos, G. E. P., Moran, M. S., Huete, A., Zhang, Y., Bresloff, C., Huxman, T. E., Eamus, D., Bosch, D. D., Buda, A. R., Gunter, S. A., Scalley, T. H., Kitchen, S. G., Mcclaran, M. P., Mcnab, W. H., Montoya, D. S., Morgan, J. A., Peters, D. P. C., & Sadler, E. J. (2013). Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. *Nature*, 2–6. <https://doi.org/10.1038/nature11836>

- Caretta, M. A., Mukherji, A., Authors, L., Betts, R. A., & Gelfan, A. (2022). Water. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, P. E.S, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 551–712). Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006.552>
- Carrasco, L., O’Neil, A. W., Daniel Morton, R., & Rowland, C. S. (2019). Evaluating combinations of temporally aggregated Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 for land cover mapping with Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/rs11030288>
- Chapin, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. V. (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* (Second). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>
- CONABIO, C. N. para el C. y U. de la B., INEGI, I. N. de E. G. e I., & INE, I. N. de E. (2008). *Ecorregiones terrestres de México (2008)*. Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2022). *Base de Datos Climatologicos*. COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Mensuales/qro/00022021.TXT>
- Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, V., Cox, P. M., Fisher, V., Foley, J. A., Friend, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., & Young-Molling, C. (2001). Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 7(4), 357–373. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00383.x>
- D’Odorico, P., Porporato, A., & Wilkinson Runyan, C. (2019). *Dryland Ecohydrology* (P. D’Odorico, A. Porporato, & C. Wilkinson Runyan (eds.); Second). Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-23269-6>
- De Jesús- Contreras, D., Thomé-Ortiz, H., Espinoza Ortega, Á., & Vizcarra Bordi, I. (2019). Trayectoria territorial de la región enológica de Querétaro, México (1970-2017): enoturismo y calidad territorial. *Cuadernos Geográficos*, 58(2), 240–261. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i2.7358>
- Del Callejo Canal, D., Canal Martínez, M., & Hákim Krayeb, M. R. (2021). *Anova de 1 factor: muestras independientes (paramétrico y no paramétrico) en R-Studio*. Youtube MX.

https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=frXBGcLheRc&ab_channel=DianaDelCallejo

- Del Callejo Canal, D., Canal Martínez, M., & Hákim Krayeb, M. R. (2022). *Comparaciones post hoc (muestras independientes)*. Youtube MX. https://www.youtube.com/watch?v=mQBPIGfsEec&ab_channel=DianaDelCallejo
- Deloire, A., Carbonneau, A., Wang, Z., & Ojeda, H. (2004). VINE AND WATER A SHORT REVIEW. *Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux)*, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.20870/oeno-one.2004.38.1.932>
- Deng, C., Pisani, B., Hernández, H., & Li, Y. (2020). Assessing the impact of climate change on water resources in a semi-arid area in central Mexico using a SWAT model. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 72(2), A150819. <https://doi.org/10.18268/BSGM2020v72n2a150819>
- Dore, M. H. I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*, 31(8), 1167–1181. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>
- Easterling, D. R., Meehl, G. A., Camille, P., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. *Atmospheric Science*, 2068(2000), 2068–2074. <https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>
- Foga, S., Scaramuzza, P. L., Guo, S., Zhu, Z., Dilley, R. D., Beckmann, T., Schmidt, G. L., Dwyer, J. L., Joseph Hughes, M., & Laue, B. (2017). Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. *Remote Sensing of Environment*, 194, 379–390. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>
- Gao, B. (1996). NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing Environ*, 266(April), 257–266. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gao, L., Zhao, P., Kang, S., Li, S., Tong, L., Ding, R., & Lu, H. (2019). Surface soil water content dominates the difference between ecosystem and canopy water use efficiency in a sparse vineyard. *Agricultural Water Management*, 226(July), 105817. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105817>
- García-Rodea, L. F., Thomé-Ortiz, H., Espinoza-Ortega, A., & de Alcântara Bittencourt-César, P. (2022). Viniculture and Tourism in the New World of Wine: a literature review from the American continent. *Wine Economics and Policy*, 11(1), 127–140. <https://doi.org/10.36253/wep-10897>
- Gatsonis, C., & Sampson, A. R. (1989). Multiple Correlation : Exact Power and Sample Size Calculations. *American Psychological Association*, 106(3), 516–524. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.106.3.516>

- Gentine, P., Green, J. K., Guérin, M., Humphrey, V., Seneviratne, S. I., Zhang, Y., & Zhou, S. (2019). Coupling between the terrestrial carbon and water cycles — a review. *Environmental Research Letters*, 1–19.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab22d6>
- Gonzalez Medrano, F. (2012). *Las zonas aridas y semiaridas de México y su vegetacion* (I. N. de E. (INE) & S. de M. A. y Re. N. (SEMARNAT) (eds.); Gonzalez M). Agua.org.mx. <https://agua.org.mx/biblioteca/las-zonas-aridas-y-semiari-das-de-mexico-y-su-vegetacion/>
- Guerrero García, B., & Pereznegrón Pereznegrón, R. (2017). Evolución, prospectiva y administración de las Zonas Áridas de México (Conaza). In *Memoria y prospectiva de las secretarías de estado* (Secretaría, pp. 445–472). Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación.
<https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/11/5278/21.PDF>
- Guevara-escobar, A., González-sosa, E., Cervantes-jiménez, M., Suzán-azpiri, H., Queijeiro-bolaños, M. E., Carrillo-ángeles, I., & Cambrón-sandoval, V. H. (2021). Machine learning estimates of eddy covariance carbon flux in a scrub in the Mexican highland. *Biogeosciences*, 367–392.
<https://doi.org/https://doi.org/10.5194/bg-18-367-2021>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. In A. Cano Carrasco & M. Osorio Sánchez (Eds.), *McGRAW-HILL/INTERAMERICANA* (McGRAW-HILL, Vol. 1). The McGraw-Hill Companies, Inc.
https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf
- Hernández Venegas, M. E. (2020). *ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO DEL ACUÍFERO VALLE DE SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO* [Universidad Autónoma del Estado de México].
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/110169>
- Herrera-pantoja, M., & Hiscock, K. M. (2015). Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. *Environmental Science and Policy*, 54, 81–89.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.020>
- Hidalgo Fernande-Cano, L., & Hidalgo Togores, J. (2011). *Tratado de Viticultura* (Mundi-Prensa (ed.); Mundi-Pren).
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YA3KBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR2&dq=tratado+de+viticultura+hidalgo&ots=VAhqrtMDIr&sig=GMVLIGM5FzFS9mOd_lcCI97-EGl#v=onepage&q=tratado de viticultura hidalgo&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YA3KBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR2&dq=tratado+de+viticultura+hidalgo&ots=VAhqrtMDIr&sig=GMVLIGM5FzFS9mOd_lcCI97-EGl#v=onepage&q=tratado+de+viticultura+hidalgo&f=false)
- Huang, L., He, B., Han, L., Liu, J., Wang, H., & Chen, Z. (2017). A global examination of the response of ecosystem water-use efficiency to drought based on MODIS data. *Science of The Total Environment*, 601–602, 1097–

1107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.084>
- Huang, M., Piao, S., Sun, Y., Ciais, P., Cheng, L., Mao, J., Poulter, B., Shi, X., Zeng, Z., & Wang, Y. (2015). Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades. *Global Change Biology*, 21(6), 2366–2378. <https://doi.org/10.1111/gcb.12873>
- Huber-sannwald, E., Maestre, F. T., Herrick, J. E., & Reynolds, J. F. (2006). Ecohydrological feedbacks and linkages associated with land degradation : a case study from Mexico. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 34(11), 3395–3411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.6337>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (R. T. and the C. W. T. Watson (ed.); Cambridge). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_TAR_full_report.pdf
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (IPCC (ed.); IPCC). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- IPCC. (2013). Glosario. In V. B. y P. M. M. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia (Ed.)], *Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (Cambridge). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- IPCC. (2014). Informe Del Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre El Cambio Climático. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, & B. R. A. Okem (eds.); Cambridge). IPCC. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jesús-contreras, D., & Thomé-ortiz, H. (2021). Patrimonio enogastronómico en el centro de México. *Anthropology of Food*, 1–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/aof.8333>
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., & Wolfe, R. E.

- (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83, 3–15. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00084-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6)
- Kang, Y., Gao, F., Anderson, M., Kustas, W., Nieto, H., Knipper, K., Yang, Y., White, W., Alfieri, J., Torres, A., Maria, R., Alsina, M., & Karnieli, A. (2022). Evaluation of satellite Leaf Area Index in California vineyards for improving water use estimation. *Irrigation Science*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00798-8>
- Kim, J., Ho, H., Um, M., & Kim, Y. (2018). Spatial and Temporal Variations in the Water Use Efficiency and its Drought Signal on the Korean Peninsula using MODIS-derived Products. *Korean Journal Of Remote Sensing*, 34(3), 553–564. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.7780/kjrs.2018.34.3.10>
- Knutti, R., Rugenstein, M. A. A., & Hegerl, G. C. (2017). Beyond equilibrium climate sensitivity. *Nature Geoscience*, September, 1–18. <https://doi.org/10.1038/NGEO3017>
- Lai, G., Quan, X., Yebra, M., & He, B. (2022). Model-driven estimation of closed and open shrublands live fuel moisture content. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1837–1856. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2139404>
- Laipelt, L., Henrique, R., Kayser, B., Santos, A., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Sensing Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178(June), 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018>
- Leeuwen, C. Van, Destrac-irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., Rességuier, L. De, & Ollat, N. (2019). An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. *MDPI Agronomy*, 21. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>
- Liu, Y., Xiao, J., Ju, W., Zhou, Y., & Wang, S. (2016). Water use efficiency of China 's terrestrial ecosystems and responses to drought. *Nature Publishing Group*, 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep13799>
- Madsen, E. L. (2011). Microorganisms and their roles in fundamental biogeochemical cycles. *Current Opinion in Biotechnology*, 22(3), 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.01.008>
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J. M., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J., & Bota, J. (2015). Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 499–517. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0280-z>
- Miras-Avalos, J. M., & Araujo, E. S. (2021). Optimization of vineyard water management: Challenges, strategies, and perspectives. *Water (Switzerland)*,

13(6), 1–32. <https://doi.org/10.3390/w13060746>

- Novo, G., Osorio, M., & Sotomayor, S. (2018). Wine tourism in Mexico : an initial exploration. *International Journal of Tourism and Hospitality*, 00(00), 1–12. <https://doi.org/10.1080/13032917.2018.1519212>
- Noyola-medrano, C., & Martínez-sías, V. A. (2017). Assessing the progress of desertification of the southern edge of Chihuahuan Desert : A case study of San Luis Potosi Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 27(3), 420–438. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1385-5>
- O'Donnell, M. S., & A. Ignizio, D. (2012). *Bioclimatic Predictors for Supporting Ecological Applications in the Conterminous United States Data Series 691*. <https://pubs.usgs.gov/ds/691/>
- Reddy, M. T., Begum, H., Sunil, N., Rao, P. S., Sivaraj, N., & Kumar, S. (2015). Predicting Potential Habitat Distribution of Sorrel (*Rumex vesicarius* L.) in India from Presence-Only Data Using Maximum Entropy Model. *OALib*, 02(06), 1–11. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101590>
- Reyna Trujillo, T. (1987). *Estado Actual De La Viticultura En Queretaro*. 45–63. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46111987000100002&script=sci_abstract&tlng=en
- Ringnér, M. (2008). What is principal component analysis? *Nature Biotechnology*, 26(3), 303–304. <https://doi.org/10.1038/nbt0308-303>
- Roby, G., Harbertson, J. F., Adams, D. A., & Matthews, M. A. (2004). Berry size and vine water deficits as factors in winegrape composition : Anthocyanins and tannins. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 10, 100–107. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2004.tb00012.x>
- Rouse, J. . J., Hass, R. ., Schell, J. ., Deering, D. ., & Harlan, J. . (1974). *MONITORING THE VERNAL ADVANCEMENT AND RETROGRADATION (GREENWAVE EFFECT) MONITORING THE VERNAL ADVANCEMENT OF NATURAL VEGETATION*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750020419>
- Running, S., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2021). *MODIS MYD16A2GF/Aqua Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid* (No. o61). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD16A2GF.061>
- Running, S., & Zhao, M. (2021). *MODIS MYD17A2HGF /Aqua Gross Primary Productivity Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid* (No. o61). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD17A2HGF.061>
- Santiago Rodriguez, S., Arteaga Ramirez, R., Sangerman Jarquin, D. M., Cervantes Osornio, R., & Navarro Bravo, A. (2012). Evapotranspiración de

- referencia estimada con Fao-Penman-Monteith , Priestley-Taylor , Hargreaves y RNA *. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3, 1535–1549. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000300343#:~:text=La productividad primaria bruta \(PPB, las pérdidas generadas por respiración.](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000300343#:~:text=La productividad primaria bruta (PPB, las pérdidas generadas por respiración.)
- Sassu, A., Gambella, F., Ghiani, L., Mercenaro, L., Caria, M., & Pazzona, A. L. (2021). Advances in Unmanned Aerial System Remote Sensing for Precision Viticulture. *Sensors MDPI*, 1–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21030956>
- Savoi, S., Wong, D. C. J., Arapitsas, P., Miculan, M., Bucchetti, B., Peterlunger, E., Fait, A., Mattivi, F., & Castellarin, S. D. (2016). Transcriptome and metabolite profiling reveals that prolonged drought modulates the phenylpropanoid and terpenoid pathway in white grapes (*Vitis vinifera* L .). *BMC Plant Biology*, 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0760-1>
- Schaik, C. P. Van, Terborgh, J. W., & Wright, S. J. (1993). The Phenology of Tropical Forests : Adaptive Significance and Consequences for Primary Consumers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 24, 353–377. <https://doi.org/189.193.79.79>
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. (2010). Earth-Science Reviews Investigating soil moisture – climate interactions in a changing climate : A review. *Earth Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
- SIAP, S. de I. A. y P. (2022). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Cierre de La Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Skinner, C. B., Poulsen, C. J., CHADWICK, R., DIFFENBAUGH, N. S., & FIORELLA, R. P. (2017). The Role of Plant CO₂ Physiological Forcing in Shaping Future Daily-Scale Precipitation. *American Meteorological Society.*, 2319–2340. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0603.1>
- Tang, X., Li, H., Desai, A. R., Nagy, Z., Luo, J., Kolb, T. E., Olioso, A., Xu, X., Yao, L., Kutsch, W., Pilegaard, K., Köstner, B., & Ammann, C. (2015). How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? *Scientific Reports*, 4(1), 7483. <https://doi.org/10.1038/srep07483>
- Tang, X., Mingguo, M., Zhi, D., Xibao, X., Li, Y., Xiaojuan, H., Qing, G., & Lisheng, S. (2017). Remotely Monitoring Ecosystem Water Use Efficiency of Grassland and Cropland in China's Arid and Semi-Arid Regions with MODIS Data Xuguang. *Remote Sensing*, 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs9060616>
- Thornton, P. E., Running, S. W., & White, M. A. (1997). Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology* 190, 190, 214–251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022->

1694(96)03128-9

- USGS. (2022a). *USGS Landsat 7 Level 2, Collection 2, Tier 1*. Earth Engine Data Catalog. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LE07_C02_T1_L2
- USGS. (2022b). *USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1*. Earth Engine Data Catalog. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2
- Velázquez Aguirre, L., & Ordaz Ayala, A. (1994). *Provincias Hidrogeológicas de México* (pp. 15–33). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. <https://doi.org/ISSN-e 1405-3322>
- Vijayavenkataraman, S., Iniyar, S., & Goic, R. (2012). A review of climate change , mitigation and adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 878–897. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009>
- Villarreal, S., Vargas, R., Yopez, E. A., Acosta, J. S., Castro, A., Escoto-rodriguez, M., Lopez, E., Martínez-osuna, J., Rodriguez, J. C., Smith, S. V, Vivoni, E. R., & Watts, C. J. (2016). Contrasting precipitation seasonality influences evapotranspiration dynamics in water-limited shrublands. *JGR Biogeosciences*, 494–508. <https://doi.org/10.1002/2015JG003169>.Received
- Vionda, F. J. (2020). *Vinitacora Queretaro - Guide of Mexican Wine and Wineries with Map of the Wine Routes* (Independie). <https://www.amazon.com/-/es/Vionda/dp/1734276711>
- Wallis, J. R., & Matalas, N. . (1971). Correlogram Analysis Revisited. *Water Resources Research*, 7(6), 1448–1459. <https://doi.org/10.1029/wr007i006p01448>
- Wang, K., & Dickinson, R. E. (2012). A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50(2). <https://doi.org/10.1029/2011RG000373>
- Wei, J., Wang, L., Liu, P., Chen, X., Li, W., & Zomaya, A. Y. (2017). Spatiotemporal Fusion of MODIS and Landsat-7 Reflectance Images via Compressed Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(12), 7126–7139. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2742529>
- Weltzin, J. F., LOIK, M. E., SUSANNE SCHWINNING, D. G. W., FAY, P. A., M., B., HADDAD JOHN HARTE, T. E. H., KNAPP, A. K., LIN, G., POCKMAN, W. T., SHAW, M. R., SMALL, E. E., SMITH, M. D., SMITH, S. D., TISSUE, D. T., & ZAK, J. C. (2003). Assessing the Response of Terrestrial Ecosystems to Potential Changes in Precipitation. *BioScience*, 53(10). [https://doi.org/https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0941:ATROTE\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0941:ATROTE]2.0.CO;2)

- Williams, D. L., Goward, S., & Arvidson, T. (2006). Landsat : Yesterday , Today , and Tomorrow. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 72(10), 1171–1178. <https://doi.org/https://doi.org/10.14358/PERS.72.10.1171>
- Xue, B.-L., Guo, Q., Otto, A., Xiao, J., Tao, S., & Li, L. (2015). Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. *Ecosphere*, 6(10), art174. <https://doi.org/10.1890/ES14-00416.1>
- Zhao, J., Xu, T., Xiao, J., Liu, S., Mao, K., Song, L., He, X., & Feng, H. (2019). Responses of Water Use Efficiency to Drought in Southwest China. *Remote Sensing*, 1–18. <https://doi.org/doi:10.3390/rs12010199>
- Zhao, Q., Yu, L., Li, X., Peng, D., & Zhang, Y. (2021). Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 1–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs13183778>
- Zou, J., Ding, J., Welp, M., Huang, S., & Liu, B. (2020). Assessing the Response of Ecosystem Water Use Efficiency to Drought During and after Drought Events across Central Asia. *Sensors*, 1–17. <https://doi.org/doi:10.3390/s20030581>