



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**COMPARACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN DOS PARCELAS
EXPERIMENTALES EN TEPETLAOXTOC ESTADO DE MÉXICO**

TESIS DE GRADO

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA

IVÁN ALEJANDRO GARCÍA LEMUS



APROBADA



**BAJO LA SUPERVISIÓN DE:
DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ**



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2024.

COMPARACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN DOS PARCELAS
EXPERIMENTALES EN TEPETLAXTOC ESTADO DE MÉXICO

Tesis realizada por IVÁN ALEJANDRO GARCÍA LEMUS bajo la dirección del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR:



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR:



DRA. LAURA ALICIA IBAÑEZ CASTILLO

ASESOR:



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos específicos	3
1.5 Literatura citada	5
2. NOPAL (<i>OPUNTIA SPP.</i>) Y SU RELEVANCIA EN EL NEXO ENERGÍA-AGUA-ALIMENTOS (EWF) EN REGIONES ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS	7
2.1 Resumen.....	7
2.2 Introducción	8
2.3 Metodología	9
2.4 Descripción general del nopal	10
2.4.1 Descripción botánica	10
2.4.2 Distribución geográfica	11
2.4.3 Usos y beneficios	11
2.5 El nopal en el sector energético	13
2.5.1 Producción de bioenergía.....	13
2.5.2 Innovaciones energéticas del nopal	14
2.6 El nopal en la gestión del agua	15
2.6.1 Conservación de agua y suelo	15
2.6.2 Remediación de aguas contaminadas.....	17
2.6.3 Impacto ambiental y diversidad	18
2.7 El nopal en la seguridad alimentaria	19
2.7.1 Valor nutricional.....	19
2.7.2 Beneficios agrícolas	21
2.8 Desafíos y oportunidades	22
2.8.1 Barreras para la adopción	22
2.9 Conclusiones	24
2.10 Recomendaciones	24
2.11 Literatura citada	25

3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO PAPALOTLA: UN ENFOQUE EN LA SUBCUENCA “APIPILHUASCO” EN EL ESTADO DE MÉXICO	33
3.1 Resumen.....	33
3.2 Introducción	34
3.3 Materiales y métodos	35
3.3.1 Área de estudio	35
3.3.2 Descripción y procesamiento de datos.....	35
3.3.3 Estación de aforo.....	38
3.3.4 El modelo SWAT	39
3.4 Resultados y discusión	40
3.4.1 Área drenada.....	40
3.4.2 Estimación de las pendientes medias	41
3.4.3 Grupo de suelo dominante	41
3.4.4 Coberturas vegetales dominantes	42
3.4.5 Resultados del modelo SWAT	43
3.5 Literatura citada	46
4. BALANCE HÍDRICO Y ESTIMACIÓN DE LA TEMPORADA AGRÍCOLA EN SANTO TOMÁS APIPILHUASCO, ESTADO DE MÉXICO	48
4.1 Resumen.....	48
4.2 Introducción	49
4.3 Materiales y métodos	50
4.3.1 Ubicación del área de estudio	50
4.3.2 Balance hídrico gráfico para estimar el inicio de la temporada lluviosa (ILL) y la duración de la estación de crecimiento (DEC)	51
4.3.3 Datos de Suelo	53
4.3.4 Balance hídrico climático (BHC)	53
4.4 Resultados y discusión	54
4.4.1 Establecimiento del inicio de la estación de crecimiento (IEC).....	54
4.4.2 Identificación del inicio de la temporada lluviosa (ILL).....	55
4.4.3 Balance hídrico climático (BHC)	56
4.4.4 Periodo libre de heladas con bajo riesgo.....	58
4.5 Literatura citada	58

5. COMPARACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN DOS PARCELAS EXPERIMENTALES: UNA DE PASTIZAL NATURAL Y OTRA INTERVENIDA CON PLANTACION DE NOPAL.....	60
5.1 Resumen.....	60
5.2 Introducción	61
5.3 Materiales y métodos	62
5.3.1 Ubicación del área de estudio	62
5.3.2 Establecimiento del experimento.....	62
5.3.3 Materiales y equipos.....	63
5.3.4 Métodos y procedimientos.....	64
5.3.5 Caracterización de suelos	65
5.3.6 Caracterización climática.....	67
5.4 Resultados y discusión	70
5.4.1 Caracterización de cobertura de suelo	74
5.4.2 Caracterización climática.....	76
5.5 Conclusiones y recomendaciones	88
5.6 Literatura citada	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Estaciones seleccionadas para el análisis de datos meteorológicos	36
Tabla 3.2 Valores medios de lluvia mensual por estación meteorológica....	36
Tabla 3.3 Temperatura media mensual por estación meteorológica	37
Tabla 3.4 Escurrimientos promedio anual y mensual en la estación de aforo de la cuenca.....	38
Tabla 4.1 Estación 15210 CONAGUA-DGE. Fuente CNA-SMN. (s.f.)	51
Tabla 4.2 Días julianos (dj) del inicio de la estación de crecimiento (a) para diferentes probabilidades	54
Tabla 4.3 Días julianos (dj) del término de la estación de crecimiento (d) para diferentes probabilidades	54
Tabla 4.4 Días julianos (dj) de la duración de la estación de crecimiento para diferentes probabilidades	55
Tabla 4.5 Días julianos (dj) del inicio de la temporada lluviosa (b) para diferentes probabilidades	55
Tabla 4.6 Días julianos (dj) del término de la temporada lluviosa (c) para diferentes probabilidades	55
Tabla 4.7 Días julianos (dj) de la duración del periodo de lluvia para diferentes probabilidades	55
Tabla 4.8 Balance hídrico climático tipo Thornthwaite	57
Tabla 5.1 Valores de CC, PMP, Dap y Textura de las muestras de suelo tomadas en campo	65
Tabla 5.2 Calificación de desempeño para evaluar la discrepancia en el cierre del Balance hídrico	73
Tabla 5.3 Parámetros para la estimación de ES según el SCS	77
Tabla 5.4 Parámetros para la condición previa de humedad del suelo.....	78
Tabla 5.5 Resultados de la Prueba U de Mann-Whitney para evaluar la significancia estadística de las diferencias entre dos conjuntos mensuales de datos	81

Tabla 5.6 Componentes del balance hídrico en la parcela intervenida con plantación de nopal.....	84
Tabla 5.7 Evaluación de la discrepancia del balance hídrico en la parcela intervenida con plantación de nopal.....	84
Tabla 5.8 Componentes del balance hídrico en la parcela NO intervenida con plantación de nopal.....	85
Tabla 5.9 Evaluación de la discrepancia del balance hídrico en la parcela NO intervenida con plantación de nopal.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Cuenca del rio Papalotla delimitada en el mapa, fuente: Google maps	35
Figura 3.2 Distribución media mensual de lluvia en la cuenca	37
Figura 3.3 Distribución media mensual de temperaturas en la cuenca.....	37
Figura 3.4 Escurrimiento anual en la estación de aforo de la cuenca.....	39
Figura 3.5 Escurrimiento medio mensual en la estación de aforo de la cuenca	39
Figura 3.6 Cuenca subdividida y la subcuenca “Apipilhuasco”	41
Figura 3.7 Grupos de suelo dominante en la cuenca.....	42
Figura 3.8 Coberturas vegetales dominantes en la cuenca delimitada.....	42
Figura 3.9 Coberturas vegetales dominantes en la subcuenca denominada “Apipilhuasco”	43
Figura 3.10 Selección del periodo de tiempo para correr el modelo SWAT .	44
Figura 3.11 Esquema final de Balance hidrológico estimado con SWAT para la cuenca del rio Papalotla.....	44
Figura 3.12 Esquema final de sedimentos estimado con SWAT para la cuenca del rio Papalotla.....	45
Figura 4.1 Ubicación del poblado de Santo Tomás Apipilhuasco, fuente: Google maps.....	50
Figura 4.2 Componentes del balance hídrico hidrográfico (Valencia y Arteaga, 2020).	52
Figura 4.3 Estación de crecimiento por disponibilidad de humedad en Santo Tomás Apipilhuasco.....	56
Figura 4.4 Climodiagrama obtenido con los resultados del balance hídrico climático.....	57
Figura 4.5 Periodo libre de heladas para Santo Tomás Apipilhuasco.....	58
Figura 5.1 Ubicación del poblado Santo Tomás Apipilhuasco, fuente Google maps	62
Figura 5.2 Vista de la plantación de nopal en la parcela intervenida	63

Figura 5.3 Curva de retención de humedad para cada muestra tomada	66
Figura 5.4 Ubicación de sensores de humedad Watermark en la zona de plantación de nopal y pastizal natural	66
Figura 5.5 Método de evaluación para cobertura fuente Mallqui (2022)	67
Figura 5.6 Recolección de datos meteorológicos en la zona de estudio	67
Figura 5.7 Cobertura del suelo en parcela intervenida con nopal	74
Figura 5.8 Cobertura del suelo en parcela de no intervenida	75
Figura 5.9 Variación de la precipitación registrada en el sitio de estudio.....	76
Figura 5.10 Temperaturas diarias registradas en el sitio de estudio.....	77
Figura 5.11 Escorrentía superficial en el área no intervenida con nopal.....	78
Figura 5.12 Escorrentía superficial en el área intervenida con nopal.....	78
Figura 5.13 Variación de la Evapotranspiración de referencia en el sitio de estudio	79
Figura 5.14 Variación en el almacenamiento de agua en el suelo en relación con la precipitación	79
Figura 5.15 Comparación de la variación de almacenamiento de agua en el suelo de la parcela no intervenida con nopal y la intervenida.	80
Figura 5.16 Histograma de frecuencias de los intervalos de la lámina almacenada en la parcela no intervenida	80
Figura 5.17 Histograma de frecuencias de los intervalos de la lámina almacenada en la parcela intervenida con plantación de nopal.....	81
Figura 5.18 Tamaño del efecto mensual de la Prueba U de Mann-Whitney	82
Figura 5.19 Tamaño del efecto mensual de la Prueba U de Mann-Whitney comparado con la lámina almacenada en la parcela intervenida y no intervenida con plantaciones de nopal.....	82
Figura 5.20 Vista de los cajetes de la base de la planta de nopal	83
Figura 5.21 Vista de los Pastizales naturales de la región.....	83
Figura 5.22 Comparación gráfica de la Pmedida y la Pt (simulada) en la parcela intervenida con nopal.	85

Figura 5.23 Comparación gráfica de la Pmedida y la Pt (simulada) en la parcela No intervenida con nopal.....	86
Figura 5.24 Climodiagrama de la parcela intervenida con plantaciones de nopal donde P, precipitación; ES, Escorrentía superficial; ET, Evapotranspiración; $\Delta\theta$, Cambio de almacenamiento de suelo; μ , discrepancia del modelo.	87
Figura 5.25 Diagrama de la parcela NO intervenida con plantaciones de nopal donde P, precipitación; ES, Escorrentía superficial; ET, Evapotranspiración; $\Delta\theta$, Cambio de almacenamiento de suelo; μ discrepancia del modelo.	87

DEDICATORIA

*Con todo el amor del mundo a mi compañera de vida
Gabriela Carrillo Hernández y mi hijo Alex
A mis padres Alfonso y Mercedes
A mis hermanas Dána y Daniela
Que me impulsaron siempre a superarme*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la oportunidad de aprender, por ser fuente de esperanza y la luz de mi camino.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico para desarrollar mis estudios de posgrado. A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), por otorgarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

De manera especial a mis asesores, Dr. Ramón Arteaga Ramírez, Dra. Laura A. Ibáñez Castillo y Dr. Mario A. Vázquez Peña por su valioso tiempo dedicado y los conocimientos brindados.

A todas las personas que me apoyaron de manera directa o indirecta e hicieron posible que este trabajo se realice con éxito.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Iván Alejandro García Lemus
Fecha de nacimiento: 13 de agosto de 1995
Lugar de nacimiento: Texcoco, Estado de México, México.

Desarrollo académico

Bachillerato: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo 2013
Licenciatura: Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo 2017

RESUMEN GENERAL

COMPARACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN DOS PARCELAS EXPERIMENTALES EN TEPETLAOXTOC ESTADO DE MÉXICO

El objetivo principal del estudio fue evaluar la variación estacional del contenido de agua en el suelo mediante un análisis comparativo del balance hídrico a nivel diario en dos parcelas de evaluación, una de pastizal natural y otra intervenida con plantación de nopal (*opuntia spp.*) en la comunidad de Santo Tomás Apipillhuasco, Tepetlaoxtoc, Edo. Méx., México. Para ello se midieron de manera directa las variables de precipitación (P), temperatura y humedad volumétrica del suelo (en 30 cm y 60 cm de profundidad). La escorrentía superficial (ES) se estimó mediante el método del número de curva (NC). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó mediante la ecuación Penman-Monteith. La evapotranspiración total (ET) se estimó con el coeficiente K_c de la cobertura vegetal. Durante la temporada de lluvias, la parcela intervenida con nopal retuvo más humedad en el suelo. En cambio, durante la época de estiaje, la parcela de pastizal natural mostró una mayor capacidad de almacenamiento de agua.

Palabras Clave: Erosión, Reforestación, Balance Hídrico, Humedad Volumétrica, Opuntia Spp.

ABSTRACT

COMPARISON OF WATER STORAGE IN TWO EXPERIMENTAL PLOTS IN TEPETLAOXTOC STATE OF MEXICO

The main objective of the study was to evaluate the seasonal variation in soil water content through a comparative analysis of the daily water balance in two evaluation plots: one with natural grassland and the other with a prickly pear cactus (*Opuntia spp.*) plantation, in the community of Santo Tomás Apipillhuasco, Tepetlaoxtoc, Mexico. For this, the variables of temperature, and volumetric soil moisture (at 30 cm and 60 cm depth) were directly measured. Precipitation (P) was measured directly, while surface runoff (SR) was estimated using the curve number (CN) method. Reference evapotranspiration (ET_o) was estimated using the Penman-Monteith equation. Total evapotranspiration (ET) was estimated with the K_c coefficient for vegetation cover. During the rainy season, the plot with prickly pear retained more moisture in the soil. In contrast, during the dry season, the natural grassland plot showed a greater capacity to store water.

Keywords: soil erosion, forestry, water balance, volumetric humidity, prickly pear cactus *opuntia spp*

1. INTRODUCCIÓN

Éste es un trabajo dedicado a la perspectiva local del progreso y su práctica en un pueblo de la sierra de Texcoco, ubicado en el centro de México, denominado Santo Tomás Apipilhuasco. Donde se mezclan las herencias de la época prehispánica con los elementos de la vida urbana. Un pueblo de gente trabajadora y deseosa de aprender nuevas técnicas agrícolas innovadoras amigables con el medio ambiente que les permitan mejorar su calidad de vida.

En esta región, desde la ocupación española, hace aproximadamente 450 años, los matorrales xerófilos y los pastizales han sido utilizados con fines ganaderos, mayormente para la cría de ovinos y bovinos. Esta actividad reduce la cobertura vegetal, en consecuencia, afecta la diversidad florística y estructura de la vegetación (Noss, 1994). Durante los últimos 100 años, el impacto del ganado y la agricultura sobre estos ecosistemas semidesérticos ha aumentado drásticamente. (Challenger, 1998).

Todos los cerros que están alrededor de la parte central del pueblo, cuyos picos están por debajo de los 2,800 metros sobre el nivel del mar están erosionados. Esta parte no es apta para el cultivo ni para la vivienda, solamente se utiliza ocasionalmente para pastoreo y recolectar nopales, tunas, quelites, leña, etc. (Kuromiya, 2006).

La pérdida de suelo superficial es el tipo de degradación dominante en la región, la cual según SEMARNAT (2008), tiene serias consecuencias en las funciones de este: remueve los nutrientes y la materia orgánica, reduce la profundidad de enraizamiento de las plantas y disminuye la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua. El tipo de vegetación, su condición y manejo en una cuenca- es de vital importancia para la captación, retención, infiltración, almacenamiento y aprovechamiento del agua de lluvia. (CONAFOR, 2018).

En las últimas décadas los ecosistemas de montaña han sufrido una creciente presión que ha causado impactos negativos relacionados con el manejo

inapropiado de los mismos, pero también debido al cambio climático, que se traduce en una serie de problemas, tanto en los propios ecosistemas como en las personas que habitan o que dependen de los servicios ecosistémicos que estos proveen. (Mallqui, 2022).

1.1 Antecedentes

El objetivo primordial del manejo de una cuenca es alcanzar un uso verdaderamente racional de los recursos naturales, en particular el agua, el suelo, el bosque, la flora y la fauna, considerando al hombre y la comunidad como agente protector o destructor. El manejo adecuado de una cuenca trata de evitar que los recursos naturales, se degraden eliminen o contaminen, considerando al mismo tiempo que el hombre tiene que obtener suficientes alimentos y adecuada cantidad de agua, madera, leña, etcétera (Ruiz, 2016).

La presente investigación tomó como base información recabada de previos trabajos, visitas de campo, de tal manera que se pudiera caracterizar y entender los procesos vinculados al deterioro de servicios ecosistémico de regulación hídrica del ecosistema de montaña natural y proponer soluciones mediante el establecimiento de plantaciones de nopal sobre estos espacios que reditúen al ámbito social y económico para mitigar el rezago y la marginación de campesinos, midiendo la efectividad real de estas intervenciones en términos de cantidad de agua.

El mejoramiento de los pastizales usando nopal ha sido practicado principalmente en África del Norte desde la década de 1930-1940. Le Houerou (2002) reportó plantaciones de nopal que fueron desarrolladas sistemáticamente, en particular en Túnez para mitigar los efectos de la sequía en el ganado para usarse como buffer de emergencia y reserva de forraje vivo.

El nopal, además de tener una importante función económica, desempeña un papel preponderante en la conservación biológica de zonas semiáridas dañadas, ya que no sólo retiene el suelo y el agua, sino que proporciona hábitat para flora y fauna de la región. (Harker *et al.*, 2008). La cobertura vegetal natural es más eficiente como parte de los procesos de infiltración y

almacenamiento de agua en el suelo, su conservación o recuperación beneficia hidrológicamente (Mallqui, 2022).

1.2 Justificación

El deterioro de la tierra o desertificación es el problema ecológico contemporáneo de mayor importancia en los países en desarrollo (Duarte, 1990). La pobreza de los campesinos les impide invertir en obras de conservación y mejoramiento de sus tierras, con lo que se acentúa un círculo vicioso en el cual el deterioro de los recursos naturales genera más pobreza y ésta más deterioro, y así sucesivamente, en la espiral de la desertificación.

Sus principales procesos son la degradación de la cobertura vegetal, la erosión hídrica y la eólica, la acumulación excesiva de sales, la degradación física, la química y la biológica. El desarrollo sustentable requiere que la investigación y el desarrollo tecnológico se ocupen de las zonas de bajo potencial; por ejemplo, de políticas encaminadas a subsanar las deficiencias alimentarias, de la búsqueda de medios alternos al uso de pastizales comunales, el impulso al uso de insumos producidos en la finca, mayor apoyo a sistemas que integren agricultura con pastizales, árboles y producción de leña (Becerra, 1998).

1.3 Objetivo general

Comparar la variación estacional del contenido de agua en el suelo en dos parcelas experimentales: una con pastizal natural y otra intervenida con plantación de nopal.

1.4 Objetivos específicos

- Analizar el papel del nopal (*Opuntia spp.*) en la sostenibilidad agrícola y la salud del medio ambiente, el papel del cactus de nopal en la mejora de la sostenibilidad y cómo esta planta resistente y versátil puede contribuir a optimizar el uso de recursos en regiones áridas y semiáridas, ofreciendo soluciones innovadoras para la producción de alimentos, la conservación del agua y la generación de energía.

- Analizar la subcuenca "Apipilhuasco" en la cuenca del río Papalotla. Describir sus características geográficas, hidrológicas y ambientales, y evaluar los procesos hidrológicos y de sedimentos con el modelo SWAT para mejorar la comprensión y gestionar mejor los recursos hídricos.
- Comprender la dinámica del agua en la zona de estudio y su impacto en los ciclos agrícolas mediante el análisis del balance hídrico, la estacionalidad agrícola y las características del suelo, con el propósito de desarrollar estrategias sostenibles de gestión del agua
- Comparar la variación estacional del contenido de agua en el suelo entre dos parcelas de evaluación mediante un análisis del balance hídrico diario.

Este es un estudio en una zona de bajo potencial productivo por la degradación de suelos y limitados recursos hídricos con mayor incidencia de sequías cada vez más prolongadas y con una población con rezago y marginación en el campo.

El reto que se presenta en esta breve introducción consiste en impulsar un desarrollo sustentable que reditúe en el ámbito social y económico con la búsqueda de medios alternos al uso de pastizales naturales comunales que permitan alcanzar un uso verdaderamente racional de los recursos naturales. El alcance de esta investigación consiste en comparar la variación estacional del contenido de agua en el suelo en dos parcelas experimentales: una con pastizal natural y otra intervenida con plantación de nopal bajo condiciones locales.

En el segundo capítulo de esta tesis, se analiza el papel del cactus de nopal en la mejora de la sostenibilidad y cómo esta planta resistente y versátil puede contribuir a optimizar el uso de recursos en regiones áridas y semiáridas, ofreciendo soluciones innovadoras para la producción de alimentos, la conservación del agua y la generación de energía.

El tercer y cuarto capítulo son estudios de gran visión respecto a la dinámica hidrológica a nivel subcuenca y poblado respectivamente para mejorar la comprensión y gestionar mejor los recursos hídricos.

En el tercer capítulo, se analiza la subcuenca "Apipilhuasco" en la cuenca del río Papalotla, donde se describen las características geográficas, hidrológicas y ambientales. Se evalúan los procesos hidrológicos y de sedimentos con el modelo SWAT.

En el cuarto capítulo, se estudia la dinámica del agua en la zona de estudio a nivel poblado y su impacto en los ciclos agrícolas mediante el análisis del balance hídrico, la estacionalidad agrícola y las características del suelo, con el propósito de desarrollar estrategias sostenibles de gestión del agua.

Finalmente, en el capítulo cinco, se compara la variación estacional del contenido de agua en el suelo entre dos parcelas de evaluación mediante un análisis del balance hídrico diario. La plantación de nopal en pastizales degradados podría aumentar la recarga de acuíferos, reducir las salidas de agua en estiaje y beneficiar a la fauna. Es crucial fomentar esta reforestación entre ejidatarios como una opción sostenible que, además, proteja los pastizales naturales del sobrepastoreo para su regeneración.

1.5 Literatura citada

- Becerra, M.A. (1998). Conservación de suelos y desarrollo sustentable, ¿Utopía o posibilidad en México?, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, 56230 Chapingo, Estado de México.
- Challenger, A. (1998). Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Agrupación Sierra Madre, S.C. México, D.F. pp. 617-724.
- CONAFOR (2018). Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales. Edición 2018. Manual de obras prácticas.
- Duarte, R. (1990). Contribución del representante y jefe de la misión diplomática de la FAO en México al Primer Simposio Nacional sobre Degradación de Suelos. pp. 97-103. In: Memorias del Simposium. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Harker, Mollie, García Rubio, Luz Adriana, & Riojas-López, Mónica E. (2008). Composición florística de cuatro hábitats en el rancho Las

Papas de Arriba, municipio de Ojuelos de Jalisco, Jalisco, México. Acta botánica mexicana, (85), 1-29. Recuperado en 07 de abril de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-71512008000400001&lng=es&tlng=es

- Kuromiya, A. (2006). Salir adelante, Conflicto, armonía y la práctica local del progreso en Santo Tomás Apipilhuasco, Estado de México. 2023, abril 6, de Universidad Iberoamericana. Sitio web: <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/014743/014743.pdf>
- Le Houérou, H.N. (2002). Cacti *Opuntia spp.* as a fodder crop for marginal lands in the Mediterranean Basin. Acta Hortic., 581: 21–46.
- Mallqui, H. (2022). Variación estacional del contenido de agua en el suelo en ecosistemas de pajonal natural e intervenido, Huaraz, Áncash. 2023, abril 6, de Universidad Nacional Agraria La Molina Lima Perú. Sitio web: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5495>
- Noss, R. F. (1994). Cows and conservation biology. Conserv. Biol. 8: 613-616.
- Ruíz, F. J., (2016). Conservación y rehabilitación de tierras degradadas, una visión holística, parte II. Primera ed. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- SEMARNAT (2008). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales. México.

2. NOPAL (*OPUNTIA SPP.*) Y SU RELEVANCIA EN EL NEXO ENERGÍA-AGUA-ALIMENTOS (EWF) EN REGIONES ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS (ARTÍCULO DE REVISIÓN)

Iván Alejandro García Lemus¹; Ramon Arteaga Ramírez^{*1}; Laura Alicia Ibáñez Castillo¹; Mario Alberto Vázquez Peña¹;

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. (UACH). Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. Estado de México.

Autor para correspondencia: arteagar@chapingo.mx

2.1 Resumen

El nexo energía-agua-alimentos (EWF) subraya la interconexión entre estos sistemas esenciales. Su gestión integrada es crucial para enfrentar la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y el cambio climático. Este estudio explora el papel del nopal (*Opuntia spp.*) en el contexto del nexo EWF en regiones áridas y semiáridas. Se analiza cómo el nopal mejora la sostenibilidad al aumentar la eficiencia en el uso del agua y la tierra. Gracias a sus adaptaciones fisiológicas únicas, el nopal captura y retiene humedad en suelos secos, promoviendo la conservación del agua. Además, se examinan sus aplicaciones en la producción de biogás y sistemas agrovoltaicos, destacando su capacidad para proporcionar alimentos nutritivos y forraje para ganado en condiciones climáticas adversas. Este análisis resalta el potencial del nopal no solo para fortalecer la seguridad alimentaria, sino también para mitigar los impactos del cambio climático y mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas y ecológicos en entornos áridos y semiáridos.

Palabras Clave: Gestión integrada, Sostenibilidad, Resiliencia climática, Restauración ecológica, Estrategias de conservación.

2.2 Introducción

El nexo energía-agua-alimentos (EWF) es un enfoque holístico que reconoce la interdependencia entre la producción y distribución de alimentos, la disponibilidad y gestión de recursos hídricos y energéticos. Este concepto es crítico para abordar la seguridad alimentaria en regiones con escasez de agua, y promueve una comprensión integral de las interdependencias entre estos recursos para lograr una gestión sostenible e innovadora de agua y energía, y así alcanzar la seguridad alimentaria (Shubbar et al., 2024).

La gestión de los recursos de energía, agua y alimentos en regiones áridas y semiáridas enfrenta desafíos complejos y multifacéticos debido a las condiciones climáticas extremas y la limitada disponibilidad de recursos naturales. La escasez de agua, la inseguridad alimentaria, y la alta demanda energética son problemas interrelacionados que requieren soluciones integradas y sostenibles. En estas regiones, la competencia por el agua es intensa, la producción agrícola depende en gran medida del riego, y la infraestructura energética es a menudo insuficiente. Además, el cambio climático exacerba la variabilidad climática, aumentando la frecuencia de sequías y otros eventos extremos que complican aún más la gestión de estos recursos (Chávez & González, 2015).

Para abordar estos desafíos, es esencial adoptar enfoques holísticos que incluyan el uso eficiente del agua, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, y la inversión en energías renovables (Ni & Chen, 2024). La implementación de tecnologías avanzadas y la cooperación regional son también cruciales para desarrollar estrategias resilientes que aseguren la sostenibilidad y la equidad en la distribución de estos recursos vitales.

El nopal (*Opuntia spp.*) desempeña un papel crucial en el nexo energía-agua-alimentos en regiones áridas y semiáridas debido a su capacidad de crecer en condiciones extremas con mínimos recursos hídricos. Su alta productividad de biomasa lo convierte en una fuente viable de bioenergía, mientras que sus cladodios y frutos proporcionan alimento nutritivo tanto para humanos como para ganado. Además, el nopal contribuye a la conservación del suelo y la

gestión del agua, mejorando la sostenibilidad agrícola en estas regiones y ofreciendo soluciones integrales para la seguridad alimentaria y energética.

El objetivo de este artículo es revisar el papel del cactus de nopal en la mejora de la sostenibilidad y eficiencia del nexo energía-agua-alimentos (EWF). Se examina cómo esta planta resistente y versátil puede contribuir a optimizar el uso de recursos en regiones áridas y semiáridas, ofreciendo soluciones innovadoras para la producción de alimentos, la conservación del agua y la generación de energía. A través de un análisis detallado, se pretende demostrar que el nopal no solo es una opción viable sino también una herramienta crucial para enfrentar los desafíos asociados con la gestión integrada de estos recursos vitales.

2.3 Metodología

Se llevó a cabo una revisión sistemática con el objetivo de proporcionar un resumen completo de la literatura actual relevante para la pregunta de investigación planteada. El primer paso para realizar esta revisión sistemática fue formular una pregunta de investigación específica y estructurada para orientar el proceso de revisión. Esta pregunta fue: "¿Cuál es la importancia del Nopal (*Opuntia spp*) en el nexo energía-agua-alimentos (EWF) en regiones áridas y semiáridas?"

El segundo paso implicó una búsqueda exhaustiva de artículos relevantes. Para identificar publicaciones científicas pertinentes sobre la importancia del nopal en el nexo energía-agua-alimentos (EWF) en regiones áridas y semiáridas, se realizaron múltiples consultas para refinar los términos de búsqueda de manera iterativa en las bases de datos Web of Science y Scopus, centrándose en títulos, resúmenes y palabras clave como: "Nopal", "Opuntia spp.", "nexo energía-agua-alimentos", "sostenibilidad", "innovación agrícola", "gestión de recursos" y "ecosistemas áridos." Este proceso iterativo garantizó la inclusión de la literatura más relevante en la revisión y aseguró que se capturaran los estudios más pertinentes para el tema en cuestión. La información sobre estos estudios se proporciona y analiza a lo largo de las secciones de este artículo.

2.4 Descripción general del nopal

2.4.1 Descripción botánica

El nopal, conocido científicamente como *Opuntia spp.*, perteneciente a la familia de las cactáceas y originario del continente americano, exhibe una estructura ramificada y presencia de espinas que le permiten prosperar en condiciones áridas y semiáridas (Galicia *et al.*, 2017).

Los nopales suelen encontrarse en suelos secos y rocosos y son capaces de resistir condiciones de sequía debido a su capacidad para almacenar agua en sus tallos. Juegan un papel ecológico importante en estas regiones al proporcionar hábitat y alimento para varias especies de vida silvestre, incluyendo aves, insectos y pequeños mamíferos. Además, los nopales ayudan a prevenir la erosión del suelo y la desertificación a través de sus extensos sistemas de raíces y su densa cobertura vegetal. A continuación, se presentan algunas de sus principales adaptaciones fisiológicas (Inglese *et al.*, 2018).

- **Cladodios:** Los cladodios, también conocidos como pencas, son estructuras planas y carnosas del nopal, recubiertas por una cutícula cerosa que reduce la pérdida de agua por evaporación. Además, su capacidad para almacenar agua en los tejidos internos les permite emplear la succulencia como una estrategia para resistir la sequía. Esta adaptación los habilita para prosperar en una variedad de entornos, incluyendo regiones áridas y suelos salinos (Pérez *et al.*, 2023). Los nopales cultivados presentan cladodios más grandes, con más areolas y menos espinas y glóquidas en comparación con los silvestres (López *et al.*, 2015).
- **Estructura y Función:** La *Opuntia*, tiene tallos con una corteza fotosintética y un núcleo central de tejido hidrénquima que proporciona alta capacidad hidráulica para sobrevivir a períodos de sequía intensa. Los tallos suelen ser acanalados, permitiendo una expansión y contracción tipo acordeón según el contenido de agua, y mejorando el soporte mecánico (Griffiths & Males, 2017).

- **Mucílago:** El nopal produce mucílago, una sustancia gelatinosa que recubre sus tejidos. El mucílago del nopal cambia con la edad de los cladodios. A medida que envejecen, aumentan su peso molecular y la concentración de ácidos urónicos, mientras que disminuyen los niveles de galactosa, ramnosa y xilosa (Rodríguez *et al.*, 2021).
- **Metabolismo Crasuláceo (CAM):** Utilizando la vía metabólica CAM, el nopal lleva a cabo la fotosíntesis, permitiéndole abrir sus estomas por la noche para absorber dióxido de carbono y reducir la pérdida de agua por transpiración durante el día.
- **Sistema Radicular:** El nopal posee un sistema radicular superficial y extenso que explora las capas superficiales del suelo en busca de agua. Este sistema radicular le permite regular su transporte de agua según las condiciones del suelo. De acuerdo con De Castro *et al.* (2021), la densidad de raíces finas disminuye con la profundidad y la distancia desde la base de la planta.
- **Defensas Naturales:** La reducción de las hojas a espinas es una característica común, proporcionando defensa contra herbívoros y reduciendo la carga térmica y lumínica en el tallo.

2.4.2 Distribución geográfica

El cactus de nopal es originario de México y se cultiva en todo el mundo, especialmente en América del Sur, África, Australia y la cuenca mediterránea. En los últimos diez años, ha habido un creciente interés científico en el nopal, con numerosos artículos enfocados en estudiar diferentes partes de la planta, particularmente los frutos y cladodios (Bellumori *et al.*, 2023).

2.4.3 Usos y beneficios

El nopal tiene aplicaciones tecnológicas en la producción de alimentos, colorantes naturales y tratamiento de aguas. Su potencial industrial abarca varios campos, desde la química de alimentos hasta la biotecnología (Araújo *et al.*, 2021).

Sus cladodios y frutos son consumidos como alimentos nutritivos ricos en fibra, vitaminas y minerales, mientras que sus propiedades medicinales incluyen efectos antiinflamatorios y antioxidantes. Tiene potencial terapéutico como alternativas naturales en la odontología, debido a sus efectos citocompatibles, antimicrobianos y antiinflamatorios en enfermedades proinflamatorias crónicas (Lemus *et al.*, 2023). Las nanofibras con extracto de nopal pueden ser una alternativa natural para apósitos de heridas, ya que son muy estables en agua, absorben más líquido y tienen propiedades antibacterianas que ayudan a combatir infecciones, lo que las hace útiles para la curación de heridas (Rodríguez *et al.*, 2020).

En la industria, el nopal se utiliza para la producción de cosméticos y productos farmacéuticos. El mucílago de nopal puede utilizarse para encapsular el ácido gálico, un compuesto antioxidante, ofreciendo potenciales aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica para la liberación controlada del antioxidante (Medina *et al.*, 2013). El nopal se estudia como material para encapsular aceites esenciales, mostrando buenos resultados en eficiencia y estabilidad. En la industria alimentaria, es apreciado por ser fácil y barato de extraer, con propiedades similares a otros aditivos comunes. Además, los recubrimientos comestibles de nopal podrían sustituir a los plásticos, reduciendo su impacto ambiental (Cakmak *et al.*, 2023). También se utiliza el nopal en la fabricación de bioplásticos y biocombustibles debido a su alta productividad de biomasa (Sánchez *et al.*, 2016). El mucílago de nopal podría ser un buen aditivo para desarrollar materiales de empaque biodegradables y ecológicos (Rivera *et al.*, 2014). Los residuos de nopal pueden transformarse en nanopartículas de celulosa mediante molienda de alto impacto, teniendo viabilidad para aplicaciones industriales gracias a su cristalinidad confirmada por difracción de rayos X (Marin *et al.*, 2017).

En la industria de la construcción, el mucílago de nopal se utiliza como inhibidor de corrosión para proteger el acero de refuerzo en estructuras de concreto, especialmente en ambientes con alta concentración de cloruros. Su comportamiento semipermeable permite el paso únicamente de moléculas de agua a través de sus poros, proporcionando así una barrera efectiva contra

agentes corrosivos (López *et al.*, 2019b). Las fibras de nopal se mezclan con otros ingredientes, como hidróxido de calcio y puzolana, para fabricar estuco de mayor durabilidad y sostenibilidad, un material de construcción similar al yeso que se utiliza para recubrir paredes y superficies exteriores e interiores de edificaciones. Este estuco no solo conserva propiedades beneficiosas para la restauración arquitectónica, sino que también contribuye a su conservación a largo plazo (Rodríguez *et al.*, 2022). Además, el uso de 2% de extracto de nopal y 0.5% de aloe vera en concreto estructural expuesto a ambientes salinos mejora las propiedades físicas y mecánicas, aumenta la resistencia a la compresión, mejora la durabilidad y compactación del concreto (Agüero *et al.*, 2024).

Contribuye a la conservación del suelo y la gestión del agua, especialmente en regiones áridas y semiáridas, promoviendo la sostenibilidad ambiental y económica. Generalmente estas plantas son valoradas en las comunidades rurales por su capacidad para prosperar en condiciones difíciles y por sus frutos comestibles (Macheka *et al.*, 2022).

2.5 El nopal en el sector energético

2.5.1 Producción de bioenergía

La bioenergía es una fuente renovable de energía que utiliza materiales de desecho reciclados para generar recursos energéticos. Además, la bioenergía se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, promoviendo acciones climáticas y el avance de la vida en la Tierra (Aidonojie *et al.*, 2023).

El nopal tiene un gran potencial como fuente de biogás y bioetanol gracias a su capacidad para crecer en condiciones adversas. Se ha demostrado que los rendimientos de metano del nopal son comparables a los del maíz. Además, los cladodios homogeneizados de *Opuntia* producen gas con un alto contenido de hidrógeno y metano. La composición química del nopal, rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, lo hace ideal para la producción de bioenergía. La biomasa del nopal es rica en carbohidratos como el almidón y la pectina, lo que la hace adecuada para la digestión anaeróbica y la producción de biometano (Sánchez *et al.*, 2016). El biogás obtenido del nopal

puede usarse como un combustible alternativo en esas comunidades marginales en países donde el suministro de energía es deficiente o no tienen acceso a fuentes convencionales (Honorato *et al.*, 2021).

2.5.2 Innovaciones energéticas del nopal

Los cladodios de nopal tienen potencial como materia prima para la producción de bioetanol. La máxima actividad hidrolítica y producción de alcohol se logra a temperaturas y pH específicos utilizando microorganismos como *Acinetobacter pittii* y *Kluyveromyces marxianus* (López *et al.*, 2019a). El pretratamiento alcalino con peróxido de hidrógeno (AHP) de los cladodios del cactus (*Opuntia ficus-indica*) mejora significativamente la producción de biogás en un 83.4% y con cambios en la composición lignocelulósica de los cladodios, respaldando la eficacia del AHP como estrategia para aumentar el rendimiento de biogás (Belay *et al.*, 2021).

El efluente de biogás de nopal, residuo líquido obtenido tras la digestión anaeróbica del nopal contiene nutrientes y compuestos orgánicos que pueden ser utilizados como fuente de alimento en otros procesos, como en las Celdas de Combustible Microbianas (C-MFCs) para generar energía eléctrica (Kamaraj *et al.*, 2019).

Se ha descubierto que *Pectobacterium cacticida* es una especie de bacteria altamente eficaz en la degradación de los cladodios del nopal, lo que sugiere su capacidad para aumentar la liberación de azúcares fermentables. Este hallazgo destaca su relevancia en la mejora de los rendimientos de etanol a partir de biomasa de nopal y promueve nuevas oportunidades para la investigación en este campo (Blair *et al.*, 2021).

Los polvos de nopal se utilizan en el desarrollo de tecnologías de energía renovable y dispositivos inteligentes como los nanogeneradores triboeléctricos, que puede cosechar energía verde y convertirla en energía eléctrica (Delgado *et al.*, 2024).

Es posible sintetizar puntos cuánticos de grafeno (GQDs) a partir del extracto de nopal usando microondas. Estos GQDs son nanopartículas con

propiedades electrónicas y ópticas especiales debido a su pequeño tamaño. Son útiles en aplicaciones como sensores, células solares, dispositivos electrónicos y también pueden detectar ácido fítico y fosfatos (Centeno *et al.*, 2021).

En sistemas agrovoltaicos, que combinan energía solar y agricultura, el nopal puede aumentar la productividad de la tierra hasta en un 60%, ahorrar agua al mitigar el efecto de isla de calor fotovoltaico y contribuir al secuestro de carbono y la biodiversidad. Además, mejora la resiliencia climática, ayudando a enfrentar sequías y el calentamiento global, aunque se necesita más investigación para comprender completamente su impacto (Gomez *et al.*, 2023).

2.6 El nopal en la gestión del agua

2.6.1 Conservación de agua y suelo

Investigaciones han documentado el impacto positivo del nopal en la retención de humedad del suelo en diversos ecosistemas. Por ejemplo, la incorporación de residuos de poda de nopal en polvo tiene un efecto positivo en la retención de agua, aunque se requiere un volumen sustancial. A pesar de esto, abre oportunidades para los sectores hortícolas y florícolas (Bondi *et al.*, 2022). Además, los individuos maduros de nopal contribuyen a la acumulación de materia orgánica en el suelo, lo que no solo mejora la retención de humedad, sino que también fomenta el establecimiento de vegetación nativa en regiones semiáridas (Génin *et al.*, 2017).

En entornos secos, donde la disponibilidad de agua y la conservación del suelo son fundamentales para la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria, el nopal emerge como una herramienta invaluable. Las técnicas de conservación de suelo y agua que involucran el uso estratégico del nopal han cobrado gran relevancia debido a su capacidad única para adaptarse a condiciones áridas y suelos marginales. El cultivo de cobertura con nopal ha demostrado ser efectivo para reducir la escorrentía y la pérdida de suelo, así como para aumentar su contenido de humedad, siendo más eficientes las

plantaciones orientadas a 90° con respecto a la dirección de la pendiente (Montenegro *et al.*, 2020).

Los nopales son indicadores de los niveles de precipitación, ya que su apariencia refleja las condiciones recientes de humedad. La turgencia y el color de sus pencas pueden indicar la cantidad de lluvia y la salud general de la planta, lo que lleva a los rancheros a utilizarlas en su monitoreo informal de los potreros para tomar decisiones de manejo (Woods & Ruyle, 2015).

Según Kumar *et al.* (2021), el período óptimo para la plantación de nopal abarca desde julio hasta octubre, lo que mejora tanto el establecimiento como el crecimiento de la planta, aprovechando la humedad del suelo favorable y la temperatura adecuada. Sin embargo, es crucial revisar las condiciones locales antes de proceder.

Algunas tecnologías ahorradoras de agua como Groasis Waterboxx® (cajas de polipropileno con reservorio de agua y refugio protector para germinantes) pueden mejorar la supervivencia de especies de cactus endémicos como el nopal durante las primeras etapas de restauración. La elección adecuada de la tecnología y el manejo agronómico pueden ser clave para el éxito de la restauración (Tapia *et al.*, 2019). Los fitoreguladores kinetina (KIN) y 6-bencilaminopurina (BA) mejoran significativamente la formación de raíces y brotes, respectivamente, cuando se incorporan en los sistemas de micropropagación de nopal verdura (Herrera *et al.*, 2024).

En algunas regiones es esencial la instalación de cercas protectoras para mitigar el daño causado por los herbívoros (Cevallos & Jaramillo, 2024). El nopal mejora la tolerancia a la sequía mediante el uso de la tecnología de retención de agua en el subsuelo (SWRT), una innovadora técnica para mejorar la eficiencia del uso del agua en áreas áridas y semiáridas. Funciona instalando membranas impermeables en forma de "U" en el suelo, justo debajo de la zona de raíces de las plantas, para retener el agua y crear un depósito subterráneo. Esto permite que las raíces accedan al agua cuando lo necesiten, mejorando la disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas (Lahbouki *et al.*, 2022).

2.6.2 Remediación de aguas contaminadas

La combinación de mucílago de nopal y almidón de yuca aumenta la efectividad de los coagulantes naturales utilizados individualmente para la remoción de turbidez en el tratamiento de agua. La mezcla es capaz de remover hasta un 67% de la turbidez, lo que indica que esta combinación podría considerarse como una alternativa en el proceso de purificación de agua (Lugo *et al.*, 2020).

El nopal tiene capacidad para eliminar metales pesados del agua mediante un copolímero de almidón de papa y mucílago de nopal. El rango de adsorción de multimetales es de 102.20 a 151.43 mg/g, con mayor afinidad para plomo (Pb), arsénico (As), aluminio (Al), mercurio (Hg) y cromo (Cr) a pH 6 (Choque *et al.*, 2023). El mucílago extraído de los nopales, especialmente aquel con un alto contenido de ácidos urónicos, tiene una eficiencia significativa en la remoción de metales pesados como hierro, manganeso, cromo y arsénico y reducción de la turbidez. Los grupos funcionales del mucílago interactúan con los metales pesados mediante interacciones electrostáticas (González *et al.*, 2024a). Los grupos funcionales carboxilo, carbonilo e hidroxilo en el mucílago son los responsables de esta eliminación (Vargas *et al.*, 2022).

La combinación de biomasa seca y carbón activado de nopal (*Opuntia ficus-indica*) es efectiva para adsorber arsénico (As) en agua de pozo contaminada. Esta técnica representa una solución viable y económica para problemas ambientales y de salud pública relacionados con la contaminación por arsénico (Torres *et al.*, 2022b).

El nopal se muestra como un coagulante natural eficiente y económico en el tratamiento de lixiviados, con condiciones óptimas determinadas para su uso en forma de polvo seco y mucílago. Logra una remoción de turbidez del 72-73% y de Demanda Química de Oxígeno (COD) del 50-54% (Nhan *et al.*, 2022).

2.6.3 Impacto ambiental y diversidad

El nopal posee un potencial notable para impulsar la regeneración natural de especies leñosas bajo riesgo de desertificación, lo que conlleva a un impacto positivo en la diversidad, el diámetro basal y la altura de la vegetación. Las plantaciones del cactus mejoran la concentración de especies vegetales alrededor de la base del arbusto plantado, lo que puede expresar una mejora en las condiciones microambientales (Neffar *et al.*, 2013). En un estudio por Gouhis *et al.* (2019), se empleó el cultivo de nopal junto con otras especies, como parte de una estrategia de rehabilitación de pastizales con el objetivo de restaurar áreas degradadas, fomentar la biodiversidad y mitigar la erosión del suelo. Las opuntias contribuyen a la biodiversidad del ecosistema de praderas mixtas (Frost *et al.*, 2023).

Sin embargo, se requiere un enfoque cauteloso debido a su potencial invasivo (Bueno *et al.*, 2024). Los problemas experimentados debido a las plantas invasoras incluyen la reducción del escurrimiento de agua superficial y las reservas de agua subterránea, una marcada reducción de la biodiversidad y muchas consecuencias económicas (Van der Merwe & Vitoriano, 2019). La expansión del nopal en algunas regiones amenaza la conservación de la biodiversidad y el modo de vida de las comunidades locales (Hussein & Estifanos, 2023). Por otro lado, el nopal ha mostrado una notable capacidad de resistencia frente a la invasión de otras especies, persistiendo incluso ante la disminución de la biodiversidad en los pastizales. Por consiguiente, su presencia podría considerarse como un indicador relevante de la salud y los cambios en la composición vegetal en estos entornos invadidos (Mazis *et al.*, 2021).

La presencia de algunas Opuntias es significativa en ecosistemas donde varias especies amenazadas y en peligro dependen del entorno natural (Brehme *et al.*, 2023). Las opuntias forman parte de la comunidad de plantas dominantes en muchas regiones y son importantes para la biodiversidad, sirviendo como hábitat para varias especies de invertebrados y aves, así como para ungulados grandes durante el invierno (Wade *et al.*, 2024).

No obstante, según González *et al.* (2020), el cambio de uso del suelo debido al crecimiento de actividades agrícolas e industriales amenaza a estas especies. Por lo tanto, la protección de las áreas donde crecen las Opuntias resulta fundamental para preservar la biodiversidad, la estabilidad del suelo y la sostenibilidad en estas regiones. Además, el cambio climático está teniendo un impacto negativo en la Opuntia, ya que el aumento de las lluvias debido a eventos de El Niño está provocando una disminución en su cobertura en algunas regiones (Dueñas *et al.*, 2021).

2.7 El nopal en la seguridad alimentaria

2.7.1 Valor nutricional

El nopal es una rica fuente de nutrientes y compuestos bioactivos, con beneficios demostrados para la salud, incluyendo la prevención de enfermedades como la diabetes y el cáncer. Es un alimento funcional y prebiótico debido a su capacidad para modificar la microbiota intestinal y reducir la endotoxemia metabólica, así como otras anomalías bioquímicas asociadas con la obesidad (Cornejo *et al.*, 2019). El consumo de nopal no se limita a las especies comerciales. Hay 93 especies de Opuntia, y los nopales silvestres tienen gran potencial por sus propiedades nutraceuticas y alimenticias (Herrera *et al.*, 2022).

El mucílago del nopal ha demostrado ser beneficioso para la microbiota intestinal, ya que aumenta la presencia de lactobacilos y bifidobacterias, mientras que reduce la cantidad de bacterias patógenas (Cruz *et al.*, 2021). Se utiliza en la medicina tradicional para tratar y prevenir enfermedades del sistema gastrointestinal y del sistema cardiovascular, específicamente, la especie *Opuntia ficus-indica* (Torres *et al.*, 2022a).

El nopal presenta resultados alentadores en el tratamiento de la osteoporosis, mostrando efectos positivos en la salud ósea al influir en diversos objetivos y vías asociadas con la enfermedad (Karimi *et al.*, 2023). Los compuestos fenólicos presentes en las soluciones acuosas del nopal pueden modular las proteínas transportadoras de colesterol en las células hepáticas, lo que podría contribuir a reducir los niveles de colesterol (Ressaissi *et al.*, 2020).

Los extractos de cladodios de nopal, ricos en antioxidantes macromoleculares y fenoles, muestran alta capacidad antioxidante y potencial antimicrobiano contra bacterias multirresistentes, lo que los hace prometedores para el desarrollo de nuevos antimicrobianos (Aruwa *et al.*, 2019). Las variedades de *Opuntia ficus-indica* y *O. robusta* presentan altas capacidades antioxidantes, lo que sugiere su potencial para ser procesados en productos alimenticios saludables (Du Toit *et al.*, 2018). El nopal tiene componentes bioactivos y tecno-funcionales con beneficios para la salud y potencial en la confitería. Sus polifenoles y polisacáridos tienen propiedades antioxidantes, antidiabéticas y anticancerígenas, y su mucílago es útil para mermeladas y como sustituto de gelificantes (Ponce *et al.*, 2023).

El aceite extraído de semillas de nopal mediante una prensa de tornillo presenta una composición de ácidos grasos, ácido linoleico y ácido oleico, reconocidos por sus beneficios para la salud. Además, el subproducto sólido resultante, conocido como "torta de prensa", es una fuente rica en fibra y antioxidantes, lo que sugiere su potencial aplicación en la industria alimentaria (Masmoudi *et al.*, 2021). La harina de nopal puede ser utilizada para producir pastas libres de gluten y que, al combinarla con arroz quebrado, se pueden obtener propiedades nutricionales mejoradas (Castro *et al.*, 2024). Al añadir nopal a la tortilla de maíz, se reduce su nivel calórico y se incrementan sus beneficios nutricionales, ya que el nopal aporta fibra dietética, actividad antioxidante y efecto prebiótico, contribuyendo a la prevención de enfermedades crónicas degenerativas (Ceja *et al.*, 2021).

Se sugiere que los cladodios de nopal maduros a 20 días tienen la concentración más alta de fibra soluble, proteínas y bioactivos, lo que los hace ideales para consumo y procesamiento (Marques *et al.*, 2023). La cocción al vapor a 100 °C del nopal durante 4 minutos preserva sus componentes, pero diferentes tiempos de cocción modifican su composición química (Ortiz *et al.*, 2022). El jugo fresco de nopal crudo puede contener microorganismos patógenos como coliformes totales y *Escherichia coli*, con niveles más bajos en invierno y primavera. También bacterias como *Citrobacter* y *Salmonella*, cuya presencia puede ser inaceptable para la salud. Se recomiendan

intervenciones para reducir la contaminación en jugos sin pasteurizar (Hernández *et al.*, 2017).

La suplementación con 20-30 g/día de fibra de nopal mejora a corto plazo los síntomas del síndrome del intestino irritable, aunque se requiere un ensayo clínico más amplio para confirmar estos resultados (Remes *et al.*, 2020). Además, el nopal se fermenta rápidamente en el colon. Esto significa que se descompone y fermenta fácilmente en el intestino, lo que puede tener efectos beneficiosos para la función intestinal y la salud digestiva (Gunn *et al.*, 2020).

2.7.2 Beneficios agrícolas

Encontrar fuentes de alimentos sostenibles es de gran importancia en la era del cambio climático. Los nopalitos, a menudo subutilizados, podrían representar una alternativa saludable y resistente a la sequía (Du Toit *et al.*, 2021). El nopal tiene un gran potencial para ser utilizado en prácticas agrícolas resilientes y sostenibles (Talucder *et al.*, 2024).

La producción de nopal está estrechamente vinculada al trabajo familiar y a la mano de obra contratada, manteniéndose las huertas mediante podas selectivas, riego mensual y control de malezas (Pedraza *et al.*, 2024). Se utilizan fertilizantes químicos, estiércol y composta. La adición de residuos de poda de nopal, solos o combinados con estiércol de cabra, incrementan la capacidad de intercambio catiónico del suelo, aumento en la capacidad de germinación, mayor resistencia al estrés hídrico y un incremento significativo en el crecimiento y producción de las plantas (González *et al.*, 2024b). El nopal podría ser un aditivo muy útil para enriquecer y acelerar el proceso de compostaje debido a su alto contenido de fuentes fácilmente accesibles de carbono. Actúa como una fuente de energía para los microorganismos, estimulando su actividad enzimática y mejorando la actividad microbiana (Blanco *et al.*, 2021).

El nopal se puede deshidratar utilizando un secador solar indirecto, lo que ofrece una tasa de secado efectiva y protección contra la luz solar directa. Esto permite conservarlo por más tiempo y evitar la proliferación de microorganismos y el desarrollo de reacciones químicas que lo deterioran

(Finck, 2014). El nopal deshidratado presenta un perfil químico único, rico en fibra, calcio, potasio, ácidos fenólicos, flavonoides, y ácidos grasos. Su composición varía según el cultivar y la temporada de poda (Di Bella *et al.*, 2021).

El secado con Ventana de Refractancia es más eficiente y causa menos deterioro químico en la planta en comparación con el secado en horno convencional (Medina *et al.*, 2023). El secado por microondas, específicamente a 75 kW/kg, es efectivo para preservar la microestructura del nopal. Este método reduce el tiempo de secado y mantiene las propiedades estructurales del material (Cruz *et al.*, 2020).

Es una de las pocas especies de forraje comercialmente disponibles adecuadas para la producción ganadera en agroecosistemas con limitaciones de agua (Müller *et al.*, 2019). El uso de nopal fermentado como suplemento alimenticio en ganado ha demostrado mejorar la condición corporal y aumentar el peso vivo en comparación con las dietas tradicionales. La fermentación semisólida permite aumentar significativamente el contenido de proteína cruda y la energía metabolizable del nopal (Flores *et al.*, 2019). Al integrar nopal en la alimentación de vacas lecheras mejora el perfil nutracéutico de los productos lácteos (Maniaci *et al.*, 2024).

2.8 Desafíos y oportunidades

2.8.1 Barreras para la adopción

Los productores de nopal enfrentan múltiples desafíos que afectan su eficiencia y rentabilidad, entre ellos, una alta incidencia de plagas y enfermedades, como la enfermedad del "cacarizo del nopal", la cual es causada por la chinche roja (*Hesperolabops nigriceps*) (Palomares *et al.*, 2016), Picudo del nopal (*Cactophagus spinolae*), un insecto dañino para los cultivos de nopal verdura (Méndez *et al.*, 2024), la palomilla (*Cactoblastis cactorum*), insecto lepidóptero cuya larva se alimenta de las palas o cladodios del nopal y está presente en 22 países en todo el mundo (Contreras, 2014), entre otras. Una escasa tecnificación en sus métodos de cultivo, una organización deficiente y canales de comercialización limitados, así como la

necesidad de mayor capacitación y acompañamiento técnico para mejorar sus prácticas de producción. (Flores *et al.*, 2023). La mayoría de los productores no recibe asesoría técnica y enfrenta problemas de control de plagas y enfermedades, además de sufrir bajos precios (Márquez *et al.*, 2012).

La desigualdad entre productores de nopal ha aumentado, marginando a algunos debido a factores políticos y la intensa competencia en el mercado (Aguilar & Sánchez, 2022). Las condiciones laborales en el cultivo de nopal son precarias. Los productores de nopal no consideran beneficioso un período de abundante cosecha, ya que la excesiva oferta del producto reduce los precios por debajo de los costos de producción, haciendo que la actividad no sea rentable. La falta de capital y conocimiento sobre derivados del nopal limita a los productores, reduciendo los incentivos para aprovechar la cosecha (Bonilla *et al.*, 2020).

El cultivo de nopal en México impacta significativamente el calentamiento global y la capa de ozono debido a los fertilizantes químicos. También genera emisiones de nitrato y fósforo por erosión del suelo (Vergel *et al.*, 2021). Aunque las normas de Buen Uso y Manejo de Plaguicidas han minimizado riesgos, el uso no autorizado de plaguicidas sintéticos en el cultivo de nopal sigue siendo peligroso para trabajadores, consumidores y el medio ambiente. Se necesitan estrategias para garantizar la seguridad alimentaria (Ramírez *et al.*, 2023).

Estudios sobre el nexo energía-agua-alimentos (EWF) en zonas áridas han confirmado que los niveles de agua subterránea disminuyen cada año y el consumo de energía para el riego aumenta, indicando que el sistema es insostenible (Miguel & Gareis, 2023). Es necesario cambiar la gestión de los recursos naturales debido a los límites físicos y la alta demanda actual. Un desafío clave del nexo EWF es la necesidad de rediseñar políticas públicas y planificar de manera coordinada entre diversos sectores. La creciente demanda de estos recursos esenciales, agravada por el cambio climático y el aumento de la población, requiere un enfoque integrado y colaborativo (Mahlknecht, 2024). Es crucial realizar un análisis integral de los recursos de

agua, energía y alimentos para mitigar los efectos adversos ambientales, sociales y económicos (Ávila *et al.*, 2023).

2.9 Conclusiones

El nopal emerge como una planta versátil y fundamental en el nexo energía-agua-alimentos de regiones áridas y semiáridas, ofreciendo soluciones sostenibles y resilientes en producción energética, eficiencia hídrica y suministro alimentario. Destaca como biomasa para la producción de biogás mediante digestión anaeróbica, aprovechando su alto contenido de materia orgánica.

En sistemas agrovoltaicos, el nopal bajo paneles solares no solo genera energía solar, sino que también mejora la eficiencia del uso del suelo al proporcionar sombra que reduce la evaporación del agua. Sus adaptaciones permiten su supervivencia, beneficios ecológicos en su entorno, mejora la retención de agua en el suelo, esencial para la conservación de recursos hídricos y la prevención de la erosión. Además, como fuente nutritiva para humanos y animales, el nopal promueve la seguridad alimentaria y mejora la calidad de la dieta animal como forraje.

Sin embargo, estas ventajas pueden conllevar compensaciones potenciales. La competencia por el uso del suelo entre energía y alimentos, especialmente en sistemas agrovoltaicos, limita el espacio para la producción agrícola exclusiva. La intensificación del uso del suelo y los requerimientos hídricos asociados con la producción de biogás plantean desafíos para la gestión sostenible de recursos.

2.10 Recomendaciones

Las inversiones iniciales y la volatilidad del mercado pueden impactar la viabilidad a largo plazo de iniciativas basadas en el nopal, especialmente en regiones con limitaciones económicas. Estas consideraciones subrayan la necesidad de un enfoque integrado y cuidadoso en el desarrollo y aplicación de tecnologías que incorporen el nopal, para maximizar beneficios y gestionar adecuadamente los impactos potenciales.

El nopal tiene el potencial de influir positivamente en los sectores de energía, agua y alimentos, ofreciendo soluciones sostenibles que mejoran la eficiencia de recursos y la resiliencia climática. La coordinación intersectorial y políticas públicas adecuadas serán esenciales para aprovechar plenamente su potencial en el nexo energía-agua-alimentos.

2.11 Literatura citada

- Agüero H.D.S., Barco T.E.K. y Farfán C.M.G. (2024). Nopal extract and aloe vera to improve structural concrete exposed to saline environments, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*
- Aguilar S.D. y Sánchez S.M.T. (2022). La organización territorial de la producción de nopal verdura en Tlalnepantla, Morelos. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. doi: 10.14350/rig.60490
- Aidonojie, P.A., Ukhurebor, K.E., Oaihimire, I.E., Ngonso, B.F., Egielewa, P.E., Akinsehinde, B.O., Kusuma, H.S., Darmokoesoemo, H., (2023). Bioenergy revamping and complimenting the global environmental legal framework on the reduction of waste materials: A facile review. *Heliyon*, 9, e12860.
- Ávila C.G.I., Otazo S.E.M., Román G.A.D., Acevedo S.O.A. (2023). ¿Qué es el nexo agua-energía-alimentos?, *PÄDI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), pp. 29-35.
- Araújo, F.F., Farias, D.P., Neri-Numa, I.A. and Pastore, G.M. (2021). Underutilized plants of the Cactaceae family: Nutritional aspects and technological applications, *Food Chemistry*, 362, p. 130196.
- Aruwa, C.E., Amoo, S.O., Kudanga, T., (2019). Extractable and macromolecular antioxidants of *Opuntia ficus-indica* cladodes: Phytochemical profiling, antioxidant and antibacterial activities. *South African Journal of Botany*, 125, pp.402-410
- Belay, J.B., Habtu, N.G., Ancha, V.R., y Hussien, A.S. (2021). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of cladodes of cactus (*Opuntia ficus-indica*) for biogas production, *Heliyon*, 7, e08002.
- Bellumori, M., Innocenti, M., Andrenelli, L., Melani, F., Cecchi, L., Pandino, G., Mauromicale, G., La Malfa, S., Mulinacci, N., (2023). Composition of discarded Sicilian fruits of *Opuntia ficus indica* L.: Phenolic content, mineral profile and antioxidant activity in peel, seeds and whole fruit. *Food Chemistry*, 428, 136756
- Blair, B.B., Yim, W.C., Cushman, J.C. (2021). Characterization of a microbial consortium with potential for biological degradation of cactus pear biomass for biofuel production. *Heliyon*, 7, e07854.
- Blanco C.M., Maurice L.J.V., Ramírez R.K., Cazares S., Delgadillo M.J., Reséndiz M.R., y Tejeria P.G. (2021). Microbial activity in the composting of backyard sheep manure, nopal and ant waste. Presentado en XXII Simposio Iberoamericano sobre Conservación y Utilización de Recursos Zoogenéticos, Noviembre 2021

- Bonilla B., Ruiz R.A., Cortés V., Trujillo S. y Hernández M. (2020). Análisis económico de productores y comercializadores de nopal en el Valle de Teotihuacán. RICEA Revista Iberoamericana de Contaduría, Economía y Administración, 9, 72-108
- Brehme C.S., Thomsen S.K., Adsit-Morris D., Fisher R.N. (2023). Global Ecology and Conservation. 47, e02640. Elsevier B.V.
- Bueno, R.S., Badalamenti, E., Sala, G., La Mantia, T. (2024). A crop for a forest: *Opuntia ficus-indica* as a tool for the restoration of Mediterranean forests in areas at desertification risk. Frontiers in Forests and Global Change, 7, art. no. 1343069.
- Cakmak, H., Ilyasoglu B.H., Sogut E., Ozyurt V. H., Gumus B.C.E., Simsek S. (2023). A review on recent advances of plant mucilages and their applications in food industry: Extraction, functional properties and health benefits Food Hydrocolloids for Health, 3, 100131
- Castro M.Y.A., Jacobo V.N., Delgado N.C.I., Ruiz A.X.A., Heredia B., Delgado M.S.A., Calderón C.A., Zazueta M.J.J. (2024). Efecto del proceso de extrusión sobre las propiedades fitoquímicas, antioxidantes y de cocción de pastas libres de gluten elaboradas a partir de arroz quebrado y nopal. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 23(1), 1-15
- Ceja L.E.S., Sánchez S.M.G., Cárdenas P.R., Loeza L.P.D. y Núñez O.V., (2021). Evaluación de aditivos químicos y biológicos en la vida de anaquel de la tortilla de nopal (*Opuntia ficus-indica*). South Florida Journal of Development, 2(4), pp.6133-6141. doi:10.46932/sfjdv2n4-087
- Centeno, L., Romero G.J., Alvarado C.C., Gallardo V.C., Télles P.G., Díaz Barriga C.E., Cabrera A.E.N., Ledezma P. A. y de León A. (2021). Green synthesis of graphene quantum dots from *Opuntia* sp. extract and their application in phytic acid detection, Sensing and Bio-Sensing Research, 32, p. 100412.
- Cevallos, D., Jaramillo D.P. (2024). Assessing Water-Saving Technologies and the Impact of Giant Tortoise Herbivory on the Restoration of *Opuntia megasperma* var. *orientalis* on Española Island—Galapagos Water (Switzerland), 16 (3), art. no. 369.
- Chávez J.A. y González Z.D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. RIBAGUA – Revista Iberoamericana del Agua, 2, pp. 3–13. Elsevier España, S.L.U
- Choque Q.D., Ligarda S.C., Choque Q.Y., Solano R.A., Ramos P.B., Zamalloa P.M., Álvarez L.G., Zamalloa P.A., Choque Q.K., Alzamora F.H. (2023). Multimetal removal in aqueous medium using a potato starch/nopal mucilage copolymer: A study of adsorption kinetics and isotherms, Results in Engineering, Volume 18, 101164, ISSN 2590-1230
- Contreras S.C. (2014). La palomilla del nopal (*Cactoblastis cactorum*) y la importancia del análisis temporal William Carlos Williams Review, 1(1), 783–787
- Cornejo G.F., Calderón de la Barca, A.M., Torres, N., Martínez-Romero, E., Torres, J., López-Vidal, Y., Soberón, X., Partida-Martínez, L.P., Pinto-Cardoso, S., Alcaraz, L.D., Pardo-López, L., Canizales-

- Quinteros, S., Puente, J.L., Ochoa-Leyva, A. (2019). Microbiome-MX 2018: microbiota and microbiome opportunities in Mexico, a megadiverse country. *Research in Microbiology*, Volume 170, Issues 4–5, Pages 235-241.
- Cruz L.L., Espinosa S.T., Aguilar M.M.A., Guerra R.D., & Hernández E.G. (2020). Influence of microwave drying process on microstructure and thermodynamic properties of nopal cladodes. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*. 12(2). 10.5154/r.inagbi.2019.12.075.
 - Cruz R.J.M., Mueller M., Viernstein H., Loeppert R., y Praznik W. (2021). Prebiotic potential and chemical characterization of the poly and oligosaccharides present in the mucilage of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*, *Food Chemistry*, 362, p. 130167. Elsevier Ltd.
 - Delgado A.E., Martínez C.J., Morales G.E.A., et al. (2024). Eco-friendly, compact, and cost-efficient triboelectric nanogenerator for renewable energy harvesting and smart motion sensing. *Heliyon*, 10, e28482.
 - Di Bella G., Lo Vecchio G., Albergamo A., Nava V., Bartolomeo G., Macrì A., Bacchetta L., Lo Turco V., & Potortì A.G. (2021). Chemical characterization of Sicilian dried nopal [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104307.
 - Dueñas, A., Jiménez-Uzcátegui, G., Bosker, T. (2021). The effects of climate change on wildlife biodiversity of the Galapagos islands. *Climate Change Ecology*. 2, 100026.
 - Du Toit, A., De Wit M., Osthoff G., & Hugo A. (2018). Antioxidant properties of fresh and processed cactus pear cladodes from selected *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* cultivars. *South African Journal of Botany*, 118, 44-51.
 - Du Toit A., Mpemba O., De Wit, M., Venter S.L., y Hugo A. (2021). The effect of size, cultivar and season on the edible qualities of nopalitos from South African cactus pear cultivars. *South African Journal of Botany*, 142, 459-466.
 - Finck P.A.G. (2014). NOPAL (*Opuntia Lasiantha*) DRYING USING AN INDIRECT SOLAR DRYER. *Energy Procedia*, 57, 2984-2993.
 - Flores H.A., Macías R.F.J., Meza H.C.A., García H.G., Esquivel A.O., Ortiz S.J., Hernández B.C. (2019). Semi-solid fermentation of nopal (*Opuntia* spp) for use as an animal protein supplement *Revista de Geografía Agrícola*, DOI: 10.5154/r.rga.2019.63.04. Licencia CC BY-NC 4.0.
 - Flores S.D., Reyes T.A.S., Navarro G.H., Pérez O.M.A., Almaguer V.G. (2023). Características y retos del sistema de cultivo nopal verdura en Cuautlacingo, Otumba. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(2), 211-222.
 - Frost, M.D.T., Komatsu, K.J., Porensky, L.M., Reinhart, K.O., Wilcox, K.R., Koerner, S.E., (2023). Consequences of Rainfall Manipulations for Invasive Annual Grasses Vary Across Grazed Northern Mixed-Grass Prairie Sites. *Rangeland Ecology & Management*, 90, pp.1-12
 - Galicia, S., Escamilla-García, P.E., Alvarado-Raya, H., Aquino-González, L.V., Serna-Álvarez, H. and Hernández-Cruz, L.M. (2017). Plantación experimental de nopal para evaluación de sistemas de fertilización y extracción de mucílago', *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Vol.8 Núm.5, pp. 1087-1099.

- Génin, M., Alifriqui, M., Fakhech, A., Hafidi, M., Ouahmane, L., and Génin, D. (2017). Back to forests in pre-Saharan Morocco? When prickly pear cultivation and traditional agropastoralism reduction promote argan tree regeneration. *Silva Fennica*. 51. 10.14214/sf.1618.
- Gomez C.N., Mwebaze, P., Khanna, M., et al. (2023). Knowns, uncertainties, and challenges in agrivoltaics to sustainably intensify energy and food production. *Cell Reports Physical Science*, 4, 101518.
- González Z.A., Ríos S.E. and Pérez M.R. (2020). Conservation of vascular plant diversity in an agricultural and industrial region in the Chihuahuan Desert, Mexico. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01002.
- González A.E., Rodríguez G.F., Vargas S.S.V., Osorio R. A., Jonathan M.P. y Campos V.L.E. (2024a). Effect of the concentration of uronic acids in *Opuntia* mucilage on the removal of heavy metals and water quality of the Yautepec River, Mexico *Arabian Journal of Chemistry*, 17, 105636.
- González T.G.Y., Bernardino N.A., Fernández A.S., Acosta G.G., Juárez G.J.M. y González C.L. (2024b). Effects of Nopal and Goat Manure on Soil Fertility and the Growth, Yield and Physical Characteristics of Tomato and Carrot Plants, *Agronomy*, 14(6), p. 1221.
- Gouhis, F., Louhaichi, M., & Nefzaoui, A. (2019). Cactus (*Opuntia ficus-indica*) utilization for rehabilitating rangelands in arid regions of Tunisia. *Acta Horticulturae*, 1247, pp. 95 – 101
- Griffiths, H. & Males, J. (2017). Succulent plants. *Current Biology* Vol. 27, R890-R896, ISSN 0960-9822.
- Gunn D., Murthy R., Major G., Wilkinson S.V., Hoad C., Marciani L., Remes T.J., Gill S., Rossi M., Harris H., Ahn J.J., Warren F., Whelan K., Spiller R. (2020). Contrasting effects of viscous and particulate fibers on colonic fermentation in vitro and in vivo, and their impact on intestinal water studied by MRI in a randomized trial. *Am J Clin Nutr*. 112. 595–602.
- Hernández A.A.M., Landa S.P., Eslava C.C.A., Vargas H.M. y Patel J. (2017). Microbiological Quality of Fresh Nopal Juice, *Microorganisms*, 4(4), doi: 10.3390/microorganisms4040046.
- Herrera M.C.A., Chávez P.K., Rubio O.E., y Ávila V.T. (2022). Establecimiento in vitro de nopales silvestres (*Opuntia* spp.) con potencial alimentario. DOI:10.13140/RG.2.2.22500.76167.
- Herrera M.C.A., Rubio O.E., Mendoza C.J., Ávila V.T., García S.P.A. (2024). Efecto de reguladores de crecimiento sobre la brotación y enraizamiento de nopal (*Opuntia* sp) in vitro *Bol. Nakari*, 34(3), 43-45
- Honorato S.J., Aburto, J., Amezcua A.M., (2021). Agave and *Opuntia* Species as Sustainable Feedstocks for Bioenergy and Byproducts. *Sustainability*, 13, 12263
- Hussein, A. y Estifanos, S., (2023). Modeling impacts of climate change on the distribution of invasive *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. in Ethiopia: Implications on biodiversity conservation. *Heliyon*, 9, e14927.
- Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A., Saenz, C., Taguchi, M., Makkar, H. y Louhaichi, M. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos

del nopal¹. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

- Kamaraj S.K., Esqueda R.A., Murugesan S., García M. J., Maya O., Frausto R.C., Tapia R.J., Silos E.H., & Caballero B.F. (2019). Electricity generation from Nopal biogas effluent using a surface modified clay cup (cantarito) microbial fuel cell. *Heliyon*, 5, e01506.
- Karimi S. M., Bayat M., & Rahimi R. (2023). Plant-derived natural medicines for the management of osteoporosis: A comprehensive review of clinical trials. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 14(2024), 1-18.
- Lahbouki S., Ech-Chatir L., Er-Raki S., Outzourhit A., Meddich A. (2022). Improving drought tolerance of *Opuntia ficus-indica* under field using subsurface water retention technology: changes in physiological and biochemical parameters. *Canadian Journal of Soil Science*, 102 (4), pp. 888 - 898,
- Lemus V.J.L., Gómez M.L.A., Díaz V.M., Martínez V.J.A., Ponce B.J., García C.R. (2023). Efectos terapéuticos de *Opuntia ficus-indica* (Nopal) y *Opuntia joconostle* (Xoconostle): Revisión Sistemática-Narrativa. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 11(65), pp.1-14.
- López G.D.M., Reyes A.J.A., Muñoz A., Robles J. y Cuevas E. (2015). Comparación morfológica entre poblaciones silvestres y manejadas de *Opuntia atropes* (Cactaceae) en Michoacán, México *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86, 1072-1077
- López D.C.M., Ramírez S.M.O., Rodríguez B.I.M. (2019a). Enzymatic hydrolysis of *Opuntia ficus-indica* cladode by *Acinetobacter pittii* and alcohol fermentation by *Kluyveromyces marxianus*: pH, temperature and microorganism effect, *Biotechnology Reports*, 24, e00384
- López L.L.D., Juárez I.M.A., Bassam A., Pérez C.A.D., Castañeda R.I.E. (2019b). Electrochemical Behavior of a Cactus Mucilage-Based Corrosion-Resistant Coating, *International Journal of Electrochemical Science*, 14, pp. 10016-10031.
- Lugo A.J., Lugo A.E., Ovallos G.D., Arango J., de la Puente, M. y Silva, J., (2020). Effectiveness of the mixture of nopal and cassava starch as clarifying substances in water purification: A case study in Colombia. *Heliyon*, 6(7), e04296.
- Macheka, L., Manditsera, F. A., Ngadze, R. T., et al. (2022). Agro-ecological distribution and consumption of wild harvested edible insects, fruits, and vegetables in rural Zimbabwe²³. *Future Foods*, 6, 100187. Elsevier B.V.
- Mahlkecht, J. (2024). Desarrollo sostenible a través del nexo agua-energía-alimentos: avances y perspectivas para México *CIENCIA ergo-sum*, 31
- Maniaci, G., Ponte, M., Giosuè, C., et al. (2024). Cladodes of *Opuntia ficus-indica* (L.) as a source of bioactive compounds in dairy products. *Journal of Dairy Science*, 107, 1887–1902. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23847>
- Marin B.M., Chanona P.J., Güemes V.N., Cásarez S.R., Perea F.M., Arzate V.I., Calderón D.G. (2017). Production and characterization of

cellulose nanoparticles from nopal waste by means of high impact milling, *Procedia Engineering*, 200, pp. 428–433. Elsevier Ltd.

- Márquez B.S.R., Torcuato C.C., Almaguer V.G., Colinas L.M.T. y Gardezi A.K. (2012). El sistema productivo del nopal tunero (*Opuntia albicarpa* y *O. megacantha*) en Axapusco, Estado de México: Problemática y alternativas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18(1), 81-93
- Marques de Farias P., Vaz Matheus J.R., Cavalcante Fai A.E., & Vasconcelos L.B. (2023). Global Research Trends on the Utilization of Nopal (*Opuntia* Sp) Cladodes as a Functional Ingredient for Industrial Use Plant Foods for Human Nutrition, 78(4), 1-9
- Masmoudi M., Baccouche A., Borchani M., Besbes S., Blecker C., & Attia H. (2021). Physico-chemical and antioxidant properties of oils and by-products obtained by cold press-extraction of Tunisian *Opuntia* spp. seeds *Applied Food Research*, 1, 100024
- Mazis, A., Fowler, J.A., Hiller, J., Zhou, Y., Wardlow, B.D., Wedin, D., & Awada, T. (2021). Ecophysio-optical traits of semiarid Nebraska grasslands under different *Juniperus virginiana* and *Pinus ponderosa* canopy covers. *Ecological Indicators*, 131, 108159. Elsevier Ltd.
- Medina T.L., García C.E., Calderas F., González L.R., Sánchez O.G., Gallegos I.J., Rocha G.N., Rodríguez R.J. (2013). Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*). *LWT - Food Science and Technology*, 50, 642-650.
- Medina O.J., Patarroyo W., Moreno L.M. (2023). Current trends in cacti drying processes and their effects on cellulose and mucilage from two Colombian cactus species *Heliyon*, 8 (2023) e12618
- Méndez G.F., Favela T.E. y Buenrostro F.J.J. (2024). *Metarhizium robertsii*, un prometedor aliado contra las infestaciones de Picudo en cultivos de nopal verdura. *Mexican Journal of Technology and Engineering*, 3(1), pp. 16-20. doi: 10.61767/mjte.003.1.1620
- Miguel R.E. y Gareis M.C. (2023). El nexa agua, energía y alimentos en un valle árido bajo explotación intensiva, *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 33(62)
- Montenegro, A.A.A., Almeida, T.A.B., de Lima, C.A., Abrantes, J.R.C.B., de Lima, J.L.M.P. (2020). Evaluating Mulch Cover with Coir Dust and Cover Crop with Palma Cactus as Soil and Water Conservation Techniques for Semiarid Environments: Laboratory Soil Flume Study under Simulated Rainfall. *Hydrology*, 7(3), 61.
- Müller, F.L., Raitt, L.M., Cyster, L.F., Cupido, C.F., Samuels, M.I., Chimphango, S.B.M. and Boatwright, J.S. (2019). The effects of temperature, water availability and seed burial depth on seed germination and seedling establishment of *Calobota sericea* (Fabaceae). *South African Journal of Botany*, 121, pp. 224–229. DOI: 10.1016/j.sajb.2018.11.012.
- Neffar, S., Chenchouni, H., Beddiar, A., and Redjel, N. (2013). Rehabilitation of Degraded Rangeland in Drylands by Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica* L.) Plantations: Effect on Soil and Spontaneous Vegetation. *Ecologia Balkanika*. 5. 63-76.

- Nhan H.T., Trong N.T., y Thai V.N. (2022). Experimental optimization of natural coagulants from nopal cactus applied in leachate treatment, STS 2022, HUTECH University, Ho Chi Minh City, Vietnam.
- Ni, Y. y Chen, Y., (2024). Does the implementation sequence of adaptive management countermeasures affect the collaborative security of the water-energy-food nexus? A case study in the Yangtze River Economic Belt2. *Ecological Indicators*, 163, 112090.
- Ortiz R.R., Ahumada G.J.T., Pérez S.R.E., García S.P.A., Martínez F.H.E., & Val A.D. (2022). Evaluation of physicochemical changes of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 24, 242-253.
- Palomares P.M., Rodríguez L.E., Ortega L., Santillán G.T., Valdovinos P.G., y Ramírez A.S. (2016). Cacarizo of Nopal in *Opuntia Ficus-indica* L. Miller, Milpa Alta, Mexico City. *Agrociencia*, 50(7), 877-887
- Pedraza R.K.A., Pérez O.M.A., Navarro G.H. y Espejel G.A. (2024). El sistema familiar de producción de nopal verdura (*Opuntia ficus indica* L.) en San Pablo Ixquiltán, Méx. Importancia y estrategias de funcionamiento, *Revista de Geografía Agrícola*, febrero, DOI: 10.5154/r.rga.2023.72.2.
- Pérez, A.V., Lim, S.D., and Cushman, J.C. (2023). Tissue succulence in plants: Carrying water for climate change. *Journal of Plant Physiology*, 289, 154081
- Ponce L.A., Pérez F.J.G., Pérez E.E., Portillo T.L.A., García C.L. y Contreras L.E. (2023). Potencial del nopal para su incursión en la industria de la confitería, *PADI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(22), doi: 10.29057/icbi.v11i22.11074.
- Ramírez B.I.I., López M.V.N., Arratia C.A.A., y Fernández H.E. (2023). Risk factors associated with the use and management of pesticides in the production of nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill). *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i12.2459>
- Remes T.J., Taboada L.H., Gill S., Amieva B.M., Rossi M., Hernández R.G., García M.J. y Whelan, Kevin. (2020). Nopal fiber (*Opuntia ficus-indica*) improves symptoms in irritable bowel syndrome in the short term: a randomized controlled trial. *Neurogastroenterology & Motility*. 33. e13986. 10.1111/nmo.13986.
- Ressaissi, A., Attia, N., Pacheco, R., Falé, P. L., y Serralheiro, M. L. M. (2020). Cholesterol transporter proteins in HepG2 cells can be modulated by phenolic compounds present in *Opuntia ficus-indica* aqueous solutions. *Journal of Functional Foods*, 64, 103674.
- Rivera C.J.L., Rodríguez G.F., Rendón V.R., García H.E., Solorza F.J. (2014). Thermal, structural and rheological properties of sorghum starch with cactus mucilage addition. *LWT - Food Science and Technology*, 59, pp.806-812
- Rodriguez, C., Padilla, V., Lozano, K., McDonald, A. (2020). Fabrication of Forcespinning® nanofibers incorporating nopal extr act, *Polymer International*, 70(5), DOI: 10.1002/pi.6163
- Rodríguez G.F., Pérez G.J., Muñoz L.C., Vargas S.S.V., & Marín S.B. (2021). Influence of age on molecular characteristics and rheological

- behavior of nopal mucilage. *Food Science & Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2629>.
- Rodríguez J.M.E., Perez D.E., Lopez D.G., Leyva P.V., Valencia C.D., Millan M.V., Rodríguez G.M. (2022). Development and characterization of lime-based stucco for modern construction and restoration applications based on ancient stuccoes from the “El Cerrito” pyramid, Querétaro, Mexico. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00875
 - Sánchez, F., Sánchez, J. and San Miguel, G. (2016). Biomass resources to hybridize CSP with biomethane: potential of horticultural residues and drought-tolerant crops. *Procedia Computer Science*, 83, 1102-1109. doi: 10.1016/j.procs.2016.04.230
 - Shubbar, H.T., Tahir, F., & Al-Ansari, T. (2024). Bridging Qatar’s food demand and self-sufficiency: A system dynamics simulation of the energy–water–food nexus. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 382–399.
 - Talucder, M.S.A., Ruba, U., Robi, M.A.S., (2024). Potentiality of Neglected and Underutilized Species (NUS) as a future resilient food: A systematic review. *Journal of Agriculture and Food Research* 16 (2024), 101116
 - Tapia, P.I., Negoita, L., Gibbs, J.P., Jaramillo, P. (2019). Effectiveness of water-saving technologies during early stages of restoration of endemic *Opuntia cacti* in the Galápagos Islands, Ecuador. *PeerJ*, 7, e8156.
 - Torres L.C., Rebolledo R.F., Aguirre J.J.A., Ramírez M.A., Chávez G.M.L., Aguillón G.D.R., Camacho G.L., Ramírez G.N., Hernández V.S., Aguilar C.N. (2022a). Medicinal plants used by rural communities in the arid zone of Viesca and Parras Coahuila in northeast Mexico. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 31, 21-28.
 - Torres O.M., Maldonado M.S. y López E. (2022b). Removal of water arsenic by dry biomass and activated carbon of nopal (*Opuntia ficus-indica*), *Journal of Economic Development*, 9(27), pp. 17-26.
 - Van der Merwe, P. y Vitoriano Maia, B.S. (2019). Assessing conservation management practices within South Africa’s private game reserves. *Global Ecology and Conservation* 20 e00695.
 - Vargas S.V., Rodríguez G.F., Martínez V.R., Morales G.S.S., Jonathan M.P. (2022). Removal of heavy metals present in water from the Yautepec River Morelos, México, using *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Environmental Advances*, 7, 100160.
 - Vergel R.G., Escamilla G.P., Camarillo L.R.H., Esquivel G.J., y Pérez S.F. (2021). The environmental impact of nopal (*Opuntia ficus-indica*) production in Mexico City, Mexico through a life cycle assessment (LCA). *Environment, Development and Sustainability*, 23.
 - Wade, N.M., Vermeire, L.T., Scasta, J.D., (2024). Prescribed fire and exotic plant responses in phreatophytic *Sarcobatus vermiculatus* rangelands with contrasting degradation. *Global Ecology and Conservation*, 52, e02955.
 - Woods, S.R. & Ruyle, G.B. (2015). Informal Rangeland Monitoring and Its Importance to Conservation in a U.S. Ranching Community¹. *Rangeland Ecology & Management*, 68, 390-401. doi:10.1016/j.rama.2015.07.005

3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO PAPALOTLA: UN ENFOQUE EN LA SUBCUENCA “APIPILHUASCO” EN EL ESTADO DE MÉXICO

Iván Alejandro García Lemus¹; Ramon Arteaga Ramírez^{*1}; Laura Alicia Ibáñez Castillo¹; Mario Alberto Vázquez Peña¹;

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. (UACH). Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. Estado de México.

Autor para correspondencia: arteagar@chapingo.mx

3.1 Resumen

La gestión efectiva de los recursos hídricos en las cuencas fluviales es crucial para el desarrollo sostenible y la subsistencia de las comunidades locales. En este estudio, se llevó a cabo una caracterización detallada de la cuenca del río Papalotla, ubicada en el oriente del Estado de México, con un enfoque particular en la subcuenca "Apipilhuasco". Se describieron aspectos clave como la topografía, la cobertura del suelo, la vegetación dominante y las condiciones climáticas. Se utilizaron datos de estaciones meteorológicas y técnicas de modelado para analizar la distribución espacial y temporal de la lluvia y la temperatura en la cuenca. Además, se analizaron los escurrimientos anuales y mensuales promedio utilizando datos históricos de la estación de aforo "La Grande". El modelo SWAT se utilizó para simular el balance hidrológico y los sedimentos en la cuenca y la subcuenca durante un período de diez años. En la cuenca del río Papalotla, de los 636.7 mm de precipitación anual, el 77% se pierde por evapotranspiración, el 8.3% como escorrentía superficial, el 8.5% como flujo lateral y el 5.7% se infiltra hacia acuíferos poco profundos. La recarga a acuíferos profundos es mínima (0.3%). Además, se generan 17.15 Mg/ha de sedimentos anuales, con un pico máximo de 49.47 Mg/ha.

Palabras Clave: Balance hídrico, Modelo hidrológico SWAT, Sostenibilidad agrícola, Subcuenca hidrográfica, Gestión integral del agua.

3.2 Introducción

Los recursos hídricos desempeñan un papel fundamental en la sostenibilidad de la vida humana y el progreso socioeconómico, siendo un componente esencial en numerosos sectores (Li y Wu, 2019). Sin embargo, enfrentamos desafíos significativos relacionados con el agua a nivel mundial, que van desde la escasez hasta la contaminación y eventos extremos como sequías e inundaciones (Zhang *et al.*, 2022). Estos desafíos subrayan la necesidad urgente de comprender y gestionar de manera efectiva los recursos hídricos para garantizar su disponibilidad y calidad para las generaciones futuras.

Los modelos hidrológicos constituyen herramientas vitales para comprender las complejas interacciones entre los sistemas atmosférico, terrestre y acuático en diferentes contextos ambientales (Karki *et al.*, 2023). Entre estos modelos, el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) destaca como una herramienta poderosa y ampliamente utilizada para evaluar el impacto de la gestión del suelo, el uso de la tierra y las prácticas de manejo del agua en la cantidad y calidad del agua en las cuencas hidrográficas. Desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el modelo SWAT ha sido implementado en todo el mundo para una variedad de aplicaciones relacionadas con la gestión de recursos hídricos (Malede *et al.*, 2023).

El presente estudio tiene como objetivo principal realizar un análisis de la cuenca del río Papalotla, con un enfoque específico en la subcuenca "Apipilhuasco". Se proporciona una descripción detallada de las características geográficas, hidrológicas y ambientales de esta subcuenca. Además, se evalúan los procesos hidrológicos y la dinámica de sedimentos en la subcuenca mediante la aplicación del modelo SWAT. Al comprender mejor estos procesos y sus interacciones, es posible mejorar la capacidad para gestionar de manera efectiva los recursos hídricos y mitigar los impactos negativos asociados con la variabilidad climática y los cambios en el uso del suelo.

datos de la estación meteorológica fueron las temperaturas máxima y mínima, la precipitación diaria y evaporación de tanque tipo A.

Lluvia promedio anual en la cuenca y distribución mensual promedio

Para el análisis climático se consideraron las cinco estaciones meteorológicas cercanas y dentro de la cuenca delimitada. Las estaciones seleccionadas se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Estaciones seleccionadas para el análisis de datos meteorológicos Fuente CNA-SMN. (s.f.)

Clave	Lat	Long	Elevación	Nombre
15210	19.53	-98.727	2750	San Juan Totolapan
15044	19.576	-98.914	2250	La Grande
15125	19.506	-98.882	2250	Texcoco
15263	19.64	-98.913	2255	Acolman
15101	19.519	-98.813	2405	San Miguel Tlaixpan

Los resultados de los valores medios de lluvia mensual en cada estación meteorológica se muestran en la tabla 3.2, resultando una lluvia promedio anual en la cuenca de 580.7 milímetros. En la figura 3.2 se muestra su distribución mensual promedio.

Tabla 3.2 Valores medios de lluvia mensual por estación meteorológica Fuente CNA-SMN. (s.f.)

Lluvia media mensual (mm)													
CLAVE	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	Nov	dic	Total
15210	8.1	15.6	22.5	32.1	55.3	97.5	102.3	94.5	95.3	44.1	14.4	5.0	586.8
15044	7.9	6.1	15.2	27.1	45.7	100.6	109.0	110.9	95.3	37.6	12.2	6.9	574.5
15125	8.6	7.7	13.2	24.4	48.5	105.6	120.4	101.9	75.0	37.6	9.6	4.9	557.4
15101	12.0	6.8	14.0	28.5	56.6	109.4	114.2	94.3	99.8	51.4	11.8	5.5	604.1
Media	9.2	9.0	16.2	28.0	51.5	103.3	111.5	100.4	91.3	42.7	12.0	5.6	580.7

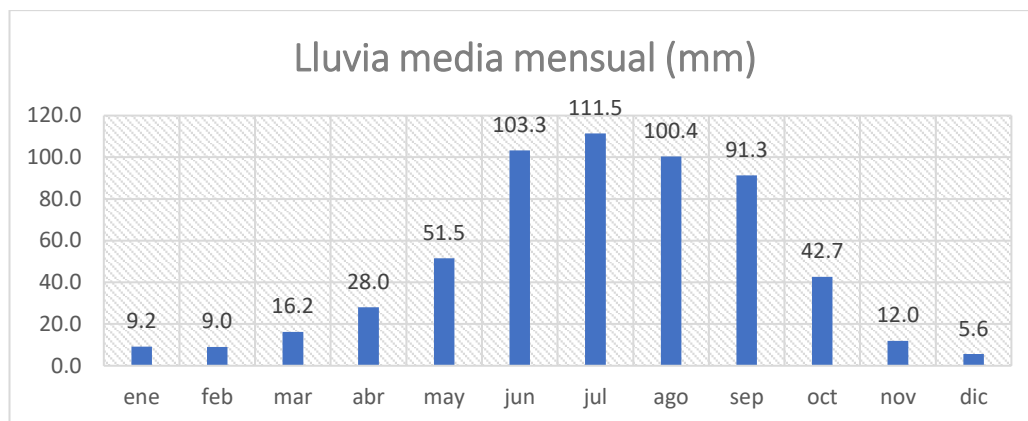


Figura 3.2 Distribución media mensual de lluvia en la cuenca

Temperatura promedio anual en la cuenca y distribución mensual promedio

Análogamente se realizó el análisis con las estaciones meteorológicas seleccionadas para obtener los valores de la temperatura promedio anual en la cuenca resultando 15 °C y su distribución mensual promedio, dichos resultados se muestran en la tabla 3.3 y figura 3.3 respectivamente.

Tabla 3.3 Temperatura media mensual por estación meteorológica

Temperatura media mensual (°C)													
CLAVE	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	Nov	Dic	Media
15210	11.6	12.8	14.2	15.6	15.9	14.7	13.9	13.9	13.6	13.2	12.5	12.0	13.7
15044	12.3	13.7	15.7	17.5	18.1	17.9	17.0	16.9	16.5	15.4	13.7	12.5	15.6
15125	12.7	14.0	15.8	17.6	18.1	17.6	16.6	16.7	16.3	15.6	14.1	13.1	15.7
15101	12.5	13.8	15.6	17.3	17.9	16.9	15.9	15.9	15.8	15.0	13.6	12.8	15.2
Media	12.3	13.6	15.3	17.0	17.5	16.7	15.8	15.8	15.5	14.8	13.5	12.6	15.0

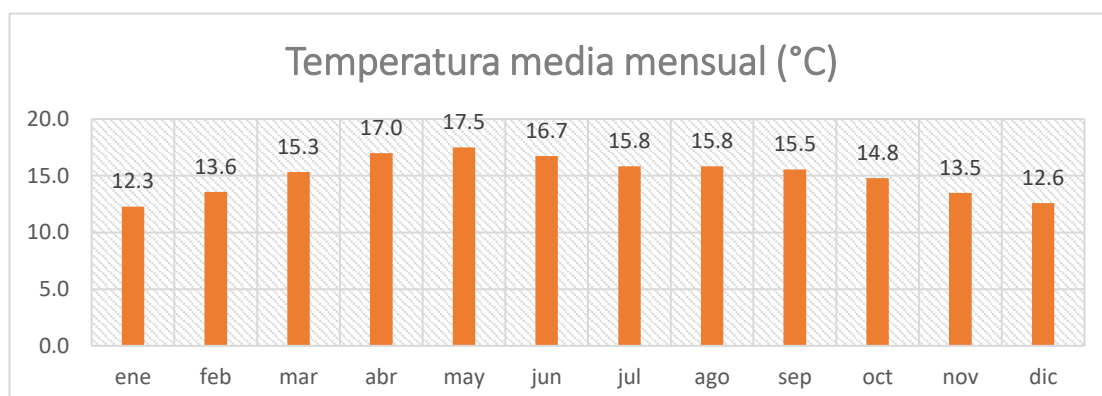


Figura 3.3 Distribución media mensual de temperaturas en la cuenca

3.3.3 Estación de aforo

La estación de aforo en la cuenca lleva por nombre 'La Grande' con número de clave 26193, localizada en las siguientes coordenadas: longitud 98°55'00", latitud 19°34'45", a una altitud de 2,273 msnm. Está ubicada sobre el río Papalotla, 10 m aguas arriba del cruce de esta corriente con el puente carretero del camino Texcoco-Tepexpan, y a unos 2.0 km al sur de Tezoyuca, en el municipio de Texcoco, Estado de México. Esta estación forma parte de la región hidrológica RH 26 (Río Pánuco), en la cuenca del río Moctezuma y el Lago de Texcoco.

Los datos de caudal medido se obtuvieron de la base de datos reportada por el Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA para obtener los escurrimientos promedio anual y mensual en la estación de aforo de la cuenca (figura 3.4 y 3.5 respectivamente y tabla 3.4). El periodo reportado consta de 58 años comprendido desde el año 1945 a 2003 (90% del periodo cuenta con datos).

Tabla 3.4 Escurrimientos promedio anual y mensual en la estación de aforo de la cuenca.

Mes	Escurrimiento promedio (miles m ³)
enero	84.929
febrero	8.103
marzo	7.507
abril	66.801
mayo	374.122
junio	1196.174
julio	1452.155
agosto	1368.952
septiembre	1337.021
octubre	492.473
noviembre	70.223
diciembre	28.651
anual	6487.110

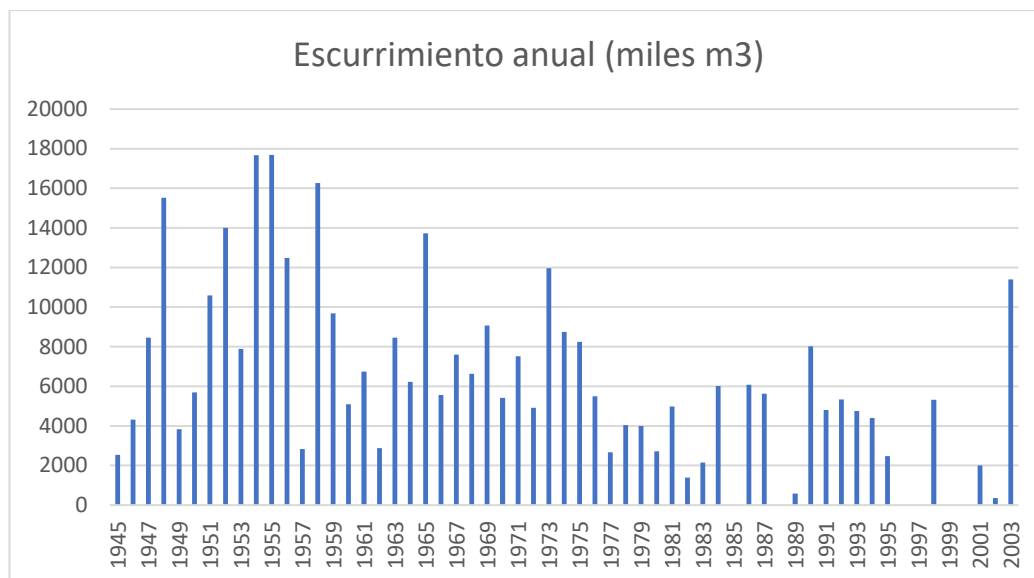


Figura 3.4 Esguerrimiento anual en la estación de aforo de la cuenca

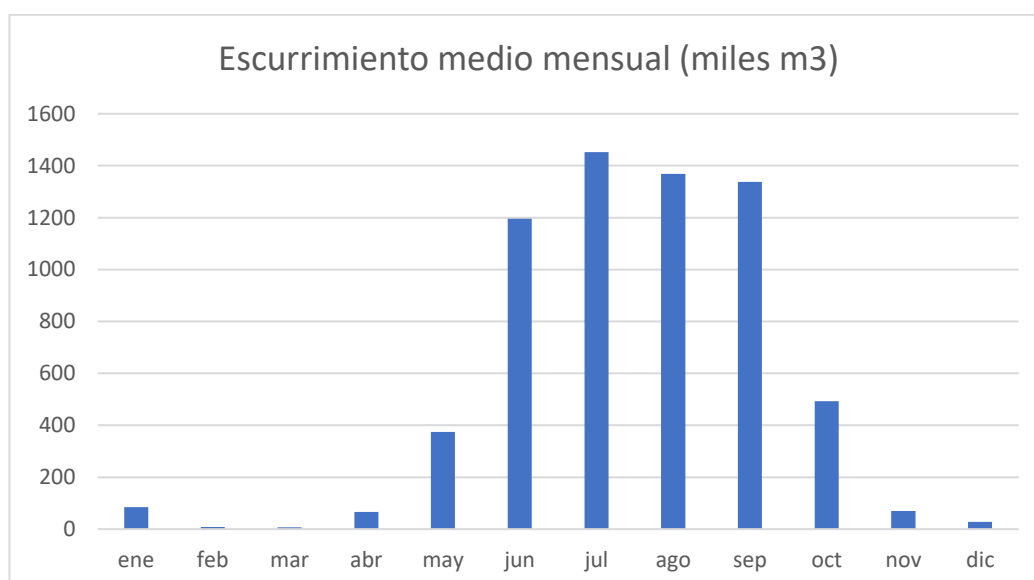


Figura 3.5 Esguerrimiento medio mensual en la estación de aforo de la cuenca

3.3.4 El modelo SWAT

SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) es un modelo hidrológico ampliamente utilizado. Está diseñado para simular tanto la calidad como la cantidad del agua, así como varios procesos hidrológicos durante largos periodos de tiempo (Marahatta *et al.*, 2021).

El modelo SWAT es un modelo hidrológico semi-distribuido, físicamente basado, que permite simular los componentes del balance hídrico (Ecuación

3.1), en escala espacial y temporal. Se clasifica como continuo, debido a que opera en el paso diario de tiempo y está diseñado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de escurrimientos, sedimentos; así como del comportamiento de sustancias agrícolas químicas en cuencas complejas con diferentes tipos de suelo, cobertura vegetal y condiciones de manejo en tiempos prolongados (meses o años) (Arnold *et al.*, 1998; Weber y Baigorri, 2018).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.1)$$

Donde: SW_t , es el contenido final de agua en el suelo (mm) en el tiempo t ; SW_0 , es el contenido inicial de agua del suelo en el día i (mm); t , es el tiempo (días); R_{day} , es la cantidad de precipitación en un día i (mm); Q_{surf} , es la cantidad de escurrimiento superficial en un día i (mm); E_a , es la cantidad de evapotranspiración en el día i (mm); W_{seep} , es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm) y Q_{gw} , es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm).

En el proceso de simulación, el modelo SWAT divide la cuenca en subcuencas y cada subcuenca en unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) basadas en la pendiente, el tipo de suelo y el uso de suelo. Simula los cambios espaciales en la cuenca basados en la dinámica hidrológica de cada HRU para calcular el volumen de agua en los cauces (Arnold *et al.*, 2012). El estudio involucró una corrida del modelo utilizando datos de lluvia recientes disponibles de 10 años comprendidos de 2007 a 2017. El modelo no fue calibrado porque los datos de aforo son hasta el año 2003.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Área drenada

En este estudio, se definió un área de 182.1 km² utilizando la herramienta ArcSwat. Dentro de esta área, la subcuenca asignada a la parcela de investigación "Apipilhuasco" abarcó un total de 29.42 km². A continuación, se

muestra en la figura 3.6 el mapa de la cuenca dividida y la subcuenca "Apipilhuasco" en estudio en color azul marino.



Figura 3.6 Cuenca subdividida y la subcuenca "Apipilhuasco"

3.4.2 Estimación de las pendientes medias

La pendiente media de la cuenca delimitada se calculó utilizando las herramientas de ArcGIS 10.5, obteniendo un valor de 21.5%. Para la subcuenca del área de investigación "Apipilhuasco", la pendiente media se determinó como 27.1%.

En cuanto a las pendientes medias de los cauces, se emplearon procedimientos similares con ArcGIS 10.5. Para la cuenca delimitada, la pendiente media del cauce se registró en un 17.08%, mientras que para la subcuenca de "Apipilhuasco" se obtuvo un valor del 23.81%.

3.4.3 Grupo de suelo dominante

La textura franca es dominante sobre el 100% de la superficie de la cuenca y la subcuenca. Sobre toda la cuenca, existen dos tipos de suelo según el mapa de suelos mundial de la FAO, los cuales son clave: Th1-2b-5027 y Re25-2a-5286 en un 55% y 45% de la superficie de la cuenca respectivamente tal como se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7 Grupos de suelo dominante en la cuenca

3.4.4 Coberturas vegetales dominantes

Las tres coberturas vegetales dominantes en la cuenca delimitada son: bosque de pino, agricultura de temporal anual y agricultura de temporal anual-permanente con 16.5%, 12% y 8.9% de la superficie de la cuenca respectivamente, como se muestra en la figura 3.8.

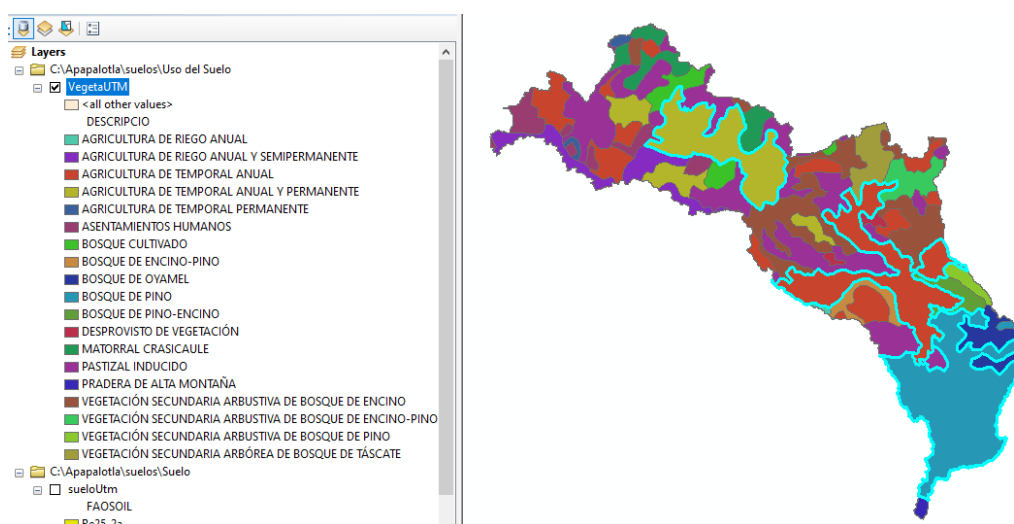


Figura 3.8 Coberturas vegetales dominantes en la cuenca delimitada

Las tres coberturas vegetales dominantes en la subcuenca denominada “Apipilhuasco” son: bosque de pino, agricultura de temporal anual y pastizal

inducido con 65%, 20% y 4.6% de la superficie de la subcuenca delimitada respectivamente.

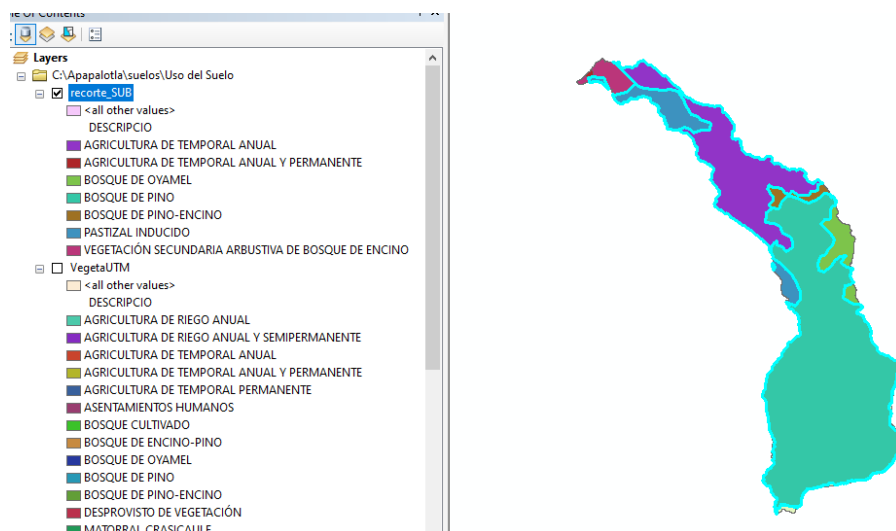


Figura 3.9 Coberturas vegetales dominantes en la subcuenca denominada “Apipilhuasco”

3.4.5 Resultados del modelo SWAT

Los datos de DEM, uso del suelo y tipo de suelo se utilizaron para delinear redes fluviales, cuencas hidrográficas y para generar Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs, por sus siglas en inglés). Basándose en los datos de entrada, el área de estudio se dividió en 7 subcuencas y 37 HRUs.

Estudiando la base de datos de las estaciones meteorológicas se concluyó como periodo para correr el modelo SWAT 10 años comprendidos de 2007 a 2017, a continuación, se muestra en la figura 3.10 la selección del periodo de estudio para correr la simulación. El esquema obtenido tras ingresar la información necesaria para correr el modelo se muestra a continuación en la figura 3.11 y 3.12.

Setup and Run SWAT Model Simulation

Period of Simulation

Starting Date: Ending Date:
Min Date = 1/1/2007 Max Date = 12/31/2017

Rainfall Sub-Daily Timestep

Timestep: Minutes

Rainfall Distribution

☒ Skewed normal
☐ Mixed exponential

SWAT.exe Version

☒ 32-bit, debug ☐ 32-bit, release
☐ 64-bit, debug ☐ 64-bit, release
☐ Custom (swatUser.exe in TxtIn/Out folder)

Printout Settings

☐ Daily ☐ Yearly ☐ Print Log Flow ☐ Print Pesticide Output
☒ Monthly NYSKIP: ☐ Print Hourly Output ☐ Print Soil Storage
☐ Print Soil Nutrient ☐ Route Headwaters ☐ Print Binary Output
☐ Print Water Quality Output ☐ Print Snow Output ☐ Print Vel./Depth Output
☐ Print MGT Output ☐ Print WTR Output ☐ Print Calendar Dates

Output File Variables:

☐ Set CPU Affinity CPU ID:

Figura 3.10 Selección del periodo de tiempo para correr el modelo SWAT

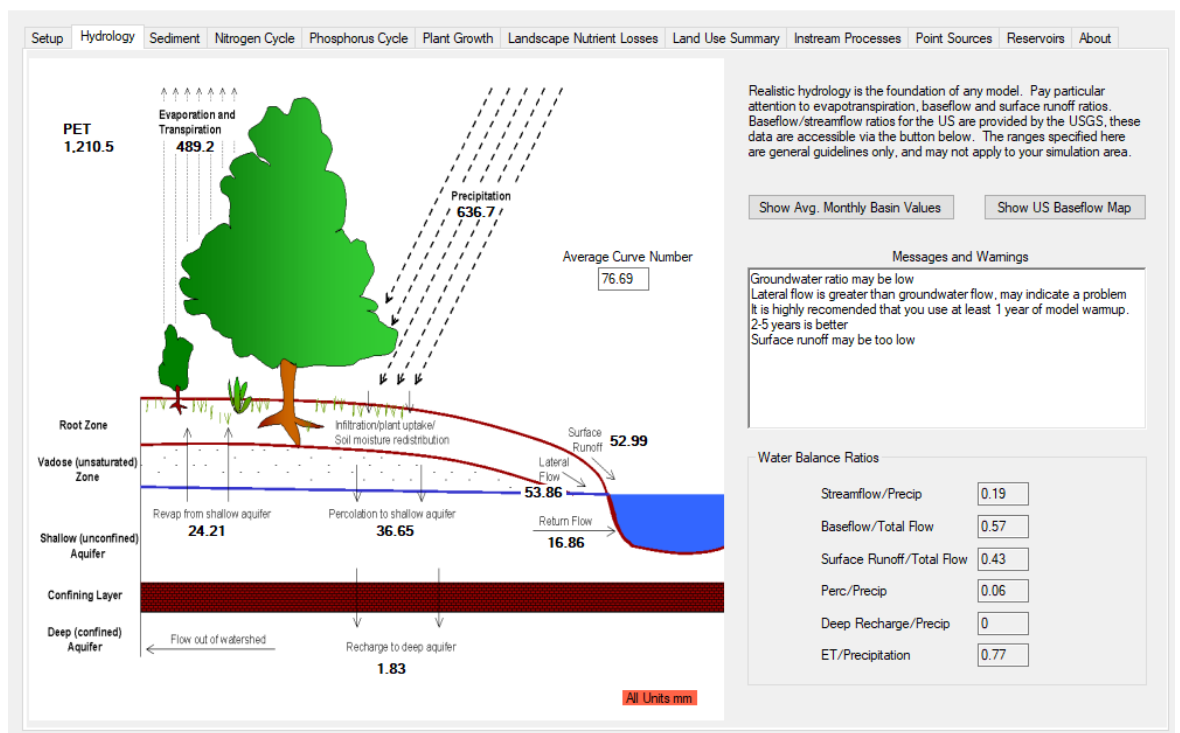


Figura 3.11 Esquema final de Balance hidrológico estimado con SWAT para la cuenca del rio Papalotla

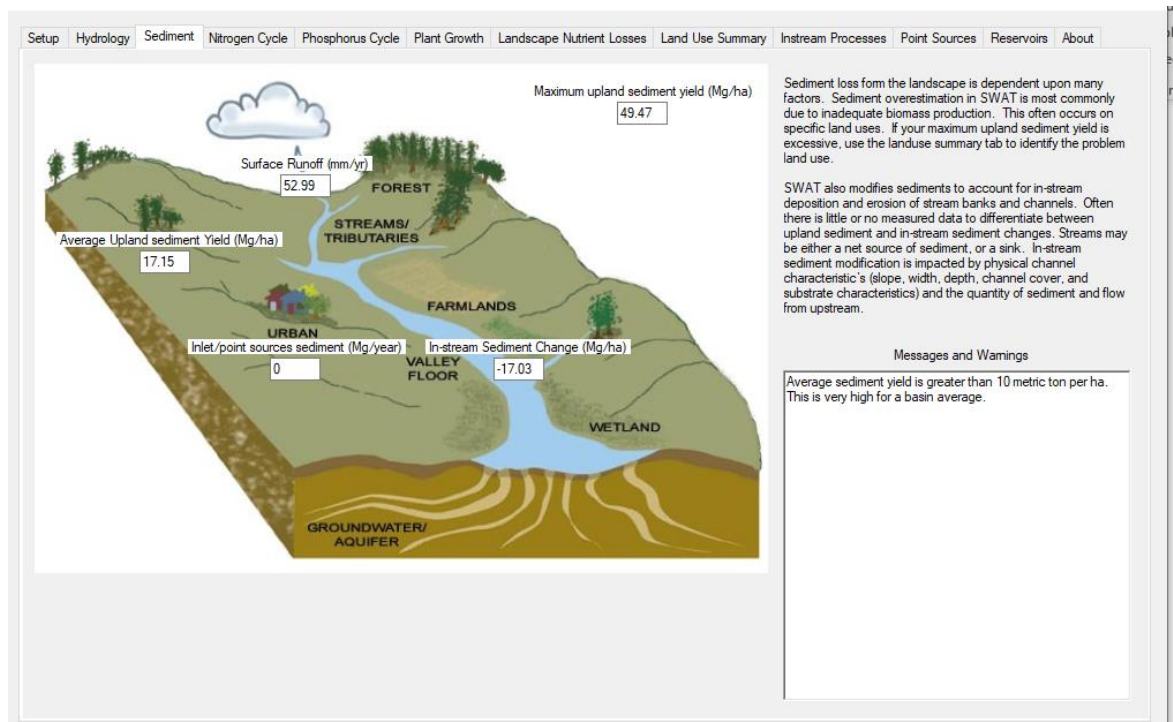


Figura 3.12 Esquema final de sedimentos estimado con SWAT para la cuenca del río Papalotla

Se han descrito algunas características geográficas, hidrológicas y ambientales de la subcuenca Apipilhuasco para comprender mejor estos procesos y sus interacciones para gestionar de manera efectiva los recursos hídricos y mitigar los impactos negativos asociados con la variabilidad climática y los cambios en el uso del suelo.

Se realizó en SWAT el balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. El esquema muestra que de una lámina precipitada promedio anual de 636.7 mm para el periodo en estudio, se pierden por evapotranspiración 489.2 mm, la escorrentía superficial es de 52.99 mm, hay flujo lateral de 53.86 mm, flujo de retorno de 16.86 mm, percolación hacia acuíferos poco profundos de 36.65 mm, recarga hacia acuíferos profundos de 1.83 mm, además se produce un promedio anual de sedimentos de tierras altas de 17.15 Mg/ha (toneladas/ha) y un sedimento máximo de tierras altas de 49.47 Mg/ha.

3.5 Conclusión

El balance hídrico muestra que del total de 636.7 mm de precipitación anual en la cuenca del río Papalotla, el 77% se pierde por evapotranspiración, el 8.3% como escorrentía superficial, el 8.5% como flujo lateral y el 5.7% se infiltra hacia acuíferos poco profundos. La recarga a acuíferos profundos es mínima (0.3%). Además, se genera un promedio anual de 17.15 Mg/ha de sedimentos, con un pico máximo de 49.47 Mg/ha.

3.6 Literatura citada

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961>.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE* 55 (4), 1491–1508.
- Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) consultado el 1 de mayo de 2023 en BANDAS (conagua.gob.mx)
- CNA-SMN. (s. f.). Información estadística climatológica. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- CONAGUA (2014). MIA Proyectos de regulación de avenidas y protección de centros de población en la zona lago de Texcoco.
- Karki, R., Qi, J., Gonzalez-Benecke, C.A., Zhang, X., Martin, T.A., Arnold, J.G., 2023. SWAT-3PG: improving forest growth simulation with a process-based forest model in SWAT. *Environ. Model. Softw.* 164, 105705.
- Li, P., Wu, J., (2019). Drinking water quality and public health. *Expo. Health* 11 (2), 73–79. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00299-8>.
- Malede, D.A., Alamirew, T., Andualem, T.G., (2023). Integrated and individual impacts of land use land cover and climate changes on hydrological flows over birr river watershed, abbay basin, Ethiopia. *Water* 15 (1), 166. <https://doi.org/10.3390/w15010166>.
- Marahatta, S., Aryal, D., Devkota, L.P., Bhattarai, U., Shrestha, D., (2021). Application of SWAT in hydrological simulation of complex mountainous river basin (Part II: climate change impact assessment). *Water* 13 (11), 1548. <https://doi.org/10.3390/w13111548>.
- Velázquez Quintero, Datse. 2022. “El Río ya no suena. Memoria y percepción en torno a la transformación del río Papalotla.” Tesis de maestría en antropología social. Centro de investigaciones y estudios superiores en antropología social CIESAS. Consultado el 28 de abril de

2023

en:

<http://ciesas.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1015/1457>

- Weber, J. F., & Baigorri-Ocampo, S. B. (2018). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina) Calibration of the SWAT hydrological model for a basin in the mountain region of Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34-54. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-03>
- Zhang, L., Li, P., He, X., (2022). Interactions between surface water and groundwater in selected tributaries of the Wei River (China) revealed by hydrochemistry and stable isotopes. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 28 (1), 79–99. <https://doi.org/10.1080/10807039.2021.2016054>.

4. BALANCE HÍDRICO Y ESTIMACIÓN DE LA TEMPORADA AGRÍCOLA EN SANTO TOMÁS APIPILHUASCO, ESTADO DE MÉXICO

Iván Alejandro García Lemus¹; Ramon Arteaga Ramírez^{*1}; Laura Alicia Ibáñez Castillo¹; Mario Alberto Vázquez Peña¹;

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. (UACH). Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. Estado de México.

Autor para correspondencia: rarteagar@chapingo.mx

4.1 Resumen

Este estudio presenta un análisis detallado del balance hídrico y la estacionalidad agrícola en Santo Tomás Apipilhuasco, ubicado en el municipio de Tepetlaoxtoc, Estado de México. Utilizando datos climáticos históricos de una estación cercana, se elaboró un balance hídrico gráfico para estimar el inicio de la temporada lluviosa y la duración de la estación de crecimiento. Se aplicaron técnicas probabilísticas para evaluar diferentes niveles de certeza en estas estimaciones. Además, se analizaron datos del suelo para calcular la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. El balance hídrico climático se realizó siguiendo la metodología de Thornthwaite & Mather (1955), se revisó el periodo libre de heladas y se presentaron los resultados en forma de tablas y diagramas. El inicio de la temporada lluviosa y la duración de la estación de crecimiento se encuentran en el periodo libre de heladas los cuales permiten identificar los periodos adecuados para la siembra y la cosecha de los cultivos en la comunidad de Santo Tomás Apipilhuasco.

Palabras Clave: Balance hídrico, Estacionalidad agrícola, Temporada lluviosa, Gestión del agua, Factores agroclimáticos.

4.2 Introducción

La agricultura de temporal desempeña un papel esencial en la economía y la subsistencia de muchas comunidades rurales en todo el mundo. El impacto de los cambios en el uso y cobertura del suelo generados por la expansión acelerada de la agricultura de temporal ha causado transformaciones biológicas que alteran la estructura y el comportamiento de los ecosistemas, principalmente en entornos semiáridos (Yao *et al.*, 2020). La gestión eficiente del agua y la planificación agrícola son aspectos fundamentales para el desarrollo sostenible de estas comunidades, especialmente en regiones donde la disponibilidad de agua es limitada. Uno de los desafíos más apremiantes es el cambio climático, que incluye el aumento de las temperaturas, la alteración de la estacionalidad y los patrones de precipitación intempestivos y esporádicos. La situación es particularmente grave en regiones con inseguridad alimentaria (Abhijeet *et al.*, 2023).

En este contexto, el balance hídrico juega un papel crucial al proporcionar una herramienta para comprender la dinámica del agua en el medio ambiente y su influencia en los ciclos agrícolas. El método de balance hídrico se aplica a todas las escalas espacio temporales y es simple, fácil de operar y altamente preciso, lo que lo convierte en un método ampliamente utilizado (Xu *et al.*, 2019).

El presente estudio se centra en Santo Tomás Apipilhuasco, un pueblo ubicado en el municipio de Tepetlaoxtoc, Estado de México, que se enfrenta a desafíos relacionados con la gestión del agua y la agricultura. A través de un análisis detallado del balance hídrico y la estacionalidad agrícola, este estudio busca proporcionar información valiosa para mejorar la planificación y la toma de decisiones en la región. El objetivo es con datos climáticos históricos y técnicas de modelado, se estima el inicio de la temporada lluviosa y la duración de la estación de crecimiento, lo que permite identificar los períodos adecuados para la siembra y la cosecha. Además, se analiza el periodo libre de heladas para corroborar que no exista incidencia de las mismas en la estación de crecimiento por disponibilidad de humedad.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Ubicación del área de estudio

El pueblo de Santo Tomás Apipilhuasco se encuentra en el municipio de Tepetlaoxtoc al noreste del Estado de México. Situado aproximadamente a 2,600 metros sobre el nivel del mar en la zona conocida como Sierra de Texcoco. El municipio colinda al este con el estado de Tlaxcala; al norte con los municipios de Acolman, San Martín de las Pirámides, San Juan Teotihuacán y Otumba; al oeste con el municipio de Chiautla; al sur con los municipios de Papalotla y Texcoco.

Tepetlaoxtoc de Hidalgo es la cabecera municipal, se encuentra aproximadamente a 15 kilómetros de Santo Tomás. Estas poblaciones se encuentran comunicadas por la carretera federal. Al este, el territorio de Santo Tomás colinda con el estado de Tlaxcala; al sudeste colinda con San Juan Totolapan, el cual antes fue su barrio; al sur, la barranca que se llama Rio Grande donde están los límites con San Jerónimo Amanalco y con la colonia Guadalupe que pertenecen al municipio de Texcoco; al oeste están ubicados San Andrés de las Peras y San Bernardo Tlalmimilolpan; al norte colinda con el ejido de San Pedro Chiautzingo. (Kuromiya, 2006).



Figura 4.1 Ubicación del poblado de Santo Tomás Apipilhuasco, fuente: Google maps

4.3.2 Balance hídrico gráfico para estimar el inicio de la temporada lluviosa (ILL) y la duración de la estación de crecimiento (DEC)

Se emplearon datos diarios de precipitación (mm) y evaporación de tanque tipo A (mm) de 32 años de la estación más cercana (3 km) Est. 15210 San Juan Totolapan (tabla 4.1) para elaborar un balance de agua gráfico (ANEXO 1) para cada uno de los años de la muestra (figura 4.2), donde se apreciaron los valores mensuales de precipitación (PP), evapotranspiración de referencia ($E_{to} = 0.8 \cdot E_v$ tanque tipo A) y 50% de la E_{to} en función del tiempo; la intersección de las curvas define fechas relacionadas con las actividades agrícolas, como: el inicio de la temporada lluviosa, la fecha de siembra, y la duración de la estación de crecimiento (Cochemé y Franquin, 1967).

Se determinó el Inicio de la temporada lluviosa (ILL) como todos aquellos puntos de intersección “c-b” y la duración de la estación de crecimiento (DEC) como la diferencia de los puntos “d-a”, se obtuvieron fechas en días julianos y la cantidad de días para cada periodo (Sivakumar, 1988). A ambos procedimientos se les realizó un análisis probabilístico al 20, 40, 60 y 80% pero al ILL se le determinó probabilidad de no excedencia y a la DEC probabilidad de excedencia (Valencia y Arteaga, 2020).

Tabla 4.1 Estación 15210 CONAGUA-DGE. Fuente CNA-SMN. (s.f.)

ESTACION: 15210
NOMBRE: SAN JUAN TOTOLAPAN
ESTADO: MEXICO
MUNICIPIO: TEPETLAOXTOC
SITUACION: OPERANDO
ORGANISMO: CONAGUA-DGE
CVE-OMM: Nulo
LATITUD: 019.530°
LONGITUD: -098.727°
ALTITUD: 2,750 msnm

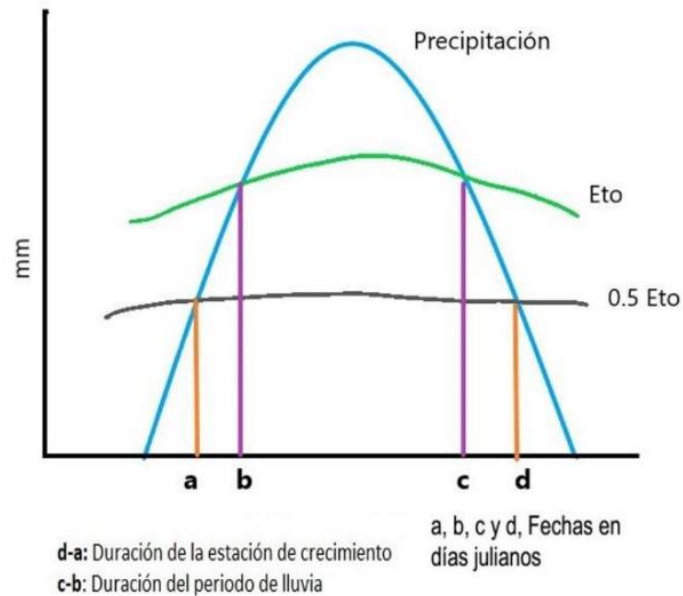


Figura 4.2 Componentes del balance hídrico hidrográfico (Valencia y Arteaga, 2020).

Para identificar el día del año en que se da el Inicio de la estación de crecimiento (IEC) para los niveles de probabilidad de no excedencia del 20, 40, 60 y 80%, se aplicó la distribución Normal estándar inversa y se obtuvo el valor Z que corresponde a cada una de las probabilidades respectivamente. De la ecuación de Z (Infante & Zarate, 2001), se despejó el valor de X_i , correspondiente al valor en día juliano del inicio de la estación de crecimiento.

$$Z = (X_i - X_{med})/S \quad (4.1)$$

Donde:

X_{med} = media de días julianos en los que ha iniciado la estación de crecimiento para los años del periodo muestral.

S =desviación estándar

$$X_i = X_{med} + Z * S \quad (4.2)$$

Las probabilidades del valor de Z y el cálculo del X_i se realizaron en el programa Excel en Office 365. Se clasificó por nivel de probabilidad de no excedencia en: 20% probabilidad de fecha temprana, 40% y 60% fechas promedio y al 80% fechas tardías (Ruiz *et al.*, 2012). En este sentido, para el 20% de probabilidad uno de cada cinco años se establecerá en esa fecha o antes; y al 80% de probabilidad de no excedencia indica que en cuatro de cinco años el IEC se establecerá en esa fecha o antes, debido a que en este

nivel de probabilidad se elimina la posibilidad de un falso comienzo de la temporada de crecimiento (Mupangwa, Walker and Twomlow, 2011).

El ILL es donde la cantidad de lluvia es igual o excede a la Eto. debe estar determinado en aquellos días julianos donde acontezca dicho evento; por ello a un 80% de probabilidad de no excedencia acontecerá el inicio de la temporada lluviosa.

4.3.3 Datos de Suelo

La textura del suelo es Franco-arcillo-arenoso con una capacidad de campo (CC) de 31.41%, un punto de marchitez permanente (PMP) de 22.98%, una densidad aparente (Da) de 1.14 g cm⁻³ y se consideró una profundidad efectiva (Pe) de 1 m. Con estos datos se calculó la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CA) mediante la siguiente ecuación (Méndez *et al.*, 2021):

$$CA = \frac{(CC - PMP)}{100} * Da * Pe \approx 100 \text{ mm} \quad (4.3)$$

4.3.4 Balance hídrico climático (BHC)

Con los datos históricos del registro de la estación 15210 San Juan Totolapan, se realizó el balance hídrico climático con el método descrito por Thornthwaite & Mather (1955) cuyo proceso se representa por la ecuación:

$$HA_i = HA_{i-1} + P_i - ETo_i \quad (4.4)$$

donde: HA_i = humedad almacenada del mes actual (mm); HA_{i-1} = humedad almacenada del mes anterior (mm); P_i = precipitación del mes actual (mm); ETo_i = evapotranspiración de referencia del mes actual (mm).

La variación de almacenaje se calculó como:

$$VA_i = HA_i - HA_{i-1} \quad (4.5)$$

Se calculó la evapotranspiración real con la siguiente expresión para el caso en que $P_i > ETo_i$:

$$ETR_i = ETo_i \quad (4.6)$$

Para el caso en que $P_i < ETo_i$, se calculó como:

$$ETR_i = P + |VA_i| \quad (4.7)$$

El déficit de humedad se calculó según:

$$DE = ETo_i - ETR_i \quad (4.8)$$

Hay excesos si se cumple la siguiente expresión:

$$EXC \rightarrow HA_{i-1} + P_i - ETo_i > CA \quad (4.9)$$

Si se diera el caso de haber excesos se puede estimar la escorrentía tal como:

$$ESC_i = (EXC_{i-1})/4 + (EXC_i)/2 \quad (4.10)$$

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Establecimiento del inicio de la estación de crecimiento (IEC)

Tabla 4.2 Días julianos (dj) del inicio de la estación de crecimiento (a) para diferentes probabilidades

F(Z)	Z	Xi
0.2	-0.84162	113
0.4	-0.25335	125
0.6	0.25335	136
0.8	0.84162	148

Tabla 4.3 Días julianos (dj) del término de la estación de crecimiento (d) para diferentes probabilidades

1-F(Z)	Z	Xi
0.2	0.84162	283
0.4	0.25335	273
0.6	-0.25335	264
0.8	-0.84162	254

Tabla 4.4 Días julianos (dj) de la duración de la estación de crecimiento para diferentes probabilidades

Probabilidad	Estación de crecimiento
20%	170
40%	148
60%	129
80%	107

4.4.2 Identificación del inicio de la temporada lluviosa (ILL)

Tabla 4.5 Días julianos (dj) del inicio de la temporada lluviosa (b) para diferentes probabilidades

F(Z)	Z	Xi
0.2	-0.84162	144
0.4	-0.25335	164
0.6	0.25335	180
0.8	0.84162	200

Tabla 4.6 Días julianos (dj) del término de la temporada lluviosa (c) para diferentes probabilidades

1-F(Z)	Z	Xi
0.2	0.84162	283
0.4	0.25335	273
0.6	-0.25335	264
0.8	-0.84162	255

Tabla 4.7 Días julianos (dj) de la duración del periodo de lluvia para diferentes probabilidades

Probabilidad	Temporada de lluvias
20%	111
40%	73
60%	40
80%	2

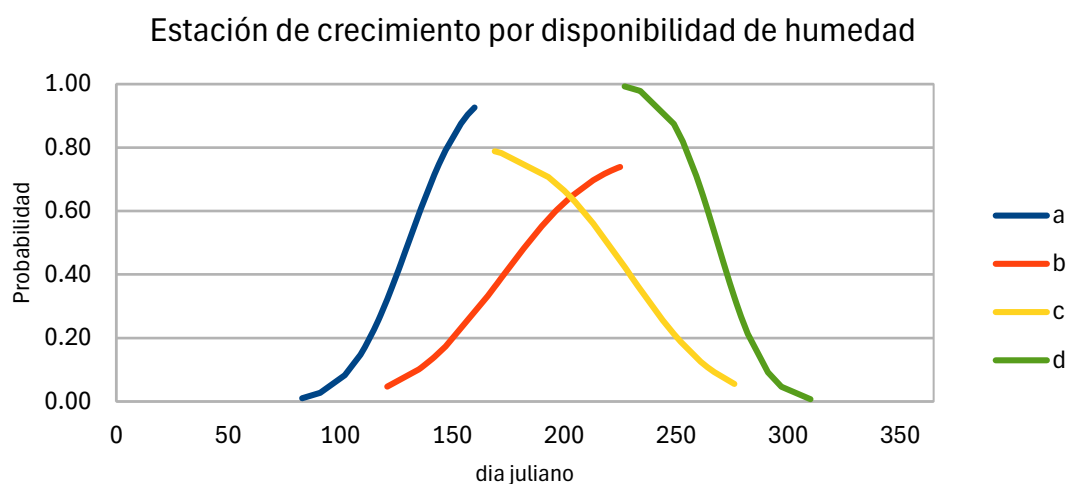


Figura 4.3 Estación de crecimiento por disponibilidad de humedad en Santo Tomás Apipilhuasco

La estación de crecimiento por disponibilidad de humedad en días julianos comienza aproximadamente el 148 (28 de mayo) y termina en 255 (12 de septiembre) a un 80% de probabilidad como se indica gráficamente. Estos resultados demuestran que los rangos de la DEC a un 80% es de 107 días, para interés de este estudio, se considera que son suficientes para establecer los cultivos de temporal como algunas variedades de maíz (*Zea mays*) de ciclo de 60 a 90 días; Frijol (*Phaseolus vulgaris*) de ciclo de 60 a 90 días; Calabacín (*Cucurbita pepo*) de ciclo de 50 a 60 días (Osorio et al., 2017).

4.4.3 Balance hídrico climático (BHC)

Se determinó el balance hídrico climático de la región tipo Thornthwaite, considerando una capacidad de almacenamiento del suelo de 100 mm posteriormente se elaboró un climodiagrama para su representación gráfica. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 4.8 Balance hídrico climático tipo Thornthwaite

BALANCE HIDRICO TIPO THORNTHWAIT CA: 100mm												
VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Ev	149	172	212	201	186	139	118	127	118	129	132	134
ET0	120	137	169	161	149	111	95	102	94	103	106	107
P	8	16	23	32	55	98	102	95	95	44	14	5
P-ET0	-111	-122	-147	-129	-93	-13	8	-7	1	-59	-91	-102
HA	1	1	1	1	1	1	9	9	10	6	2	1
VA	0	0	0	0	0	0	8	0	1	-4	-4	-1
ETR	8	16	23	32	55	98	95	95	94	48	18	6
DE	111	122	147	129	93	13	0	7	0	55	87	101
EXC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

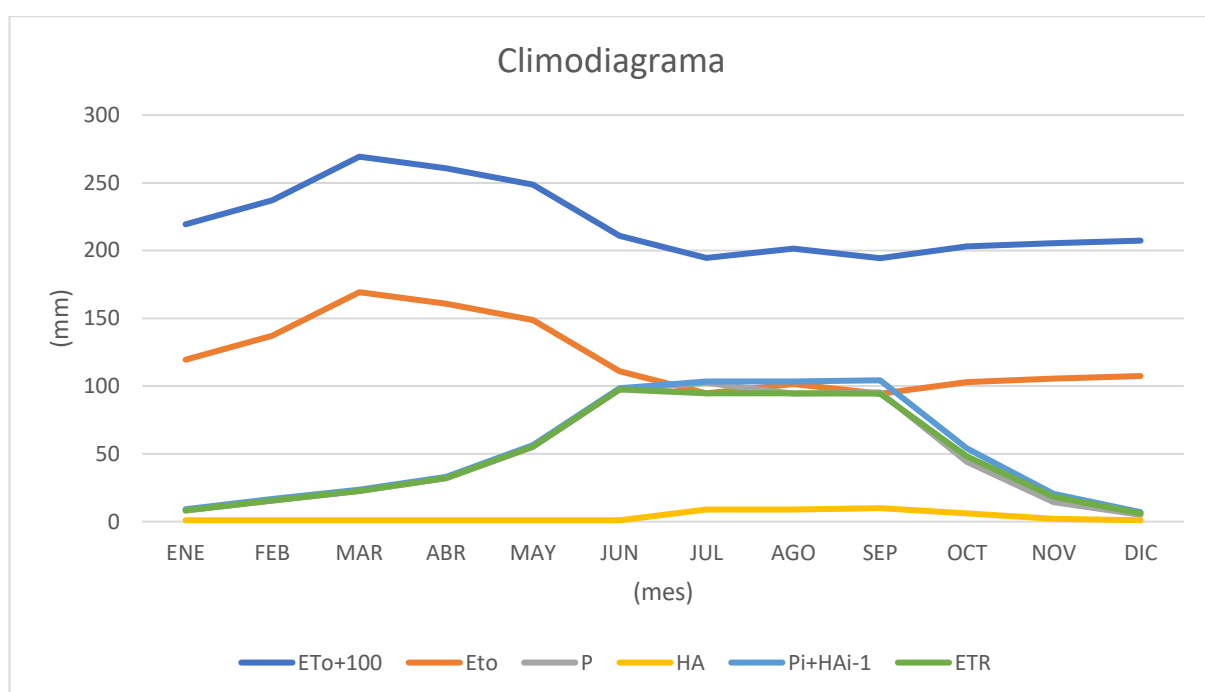


Figura 4.4 Climodiagrama obtenido con los resultados del balance hídrico climático

El climodiagrama de un balance hídrico tipo Thornthwaite ayuda a comprender el balance de agua en un área específica. Proporciona estimaciones sobre la disponibilidad de agua en el suelo, permitiendo entender la distribución estacional de la humedad y su relación con los ciclos de cultivo. Además, ayuda a identificar períodos de sequía o exceso de humedad, lo que es esencial para la planificación agrícola, la gestión del agua y la toma de decisiones en sectores que dependen del suministro hídrico. Claramente se observa la mayor disponibilidad de agua en el suelo de junio a octubre.

4.4.4 Periodo libre de heladas con bajo riesgo

Se realizó el análisis probabilístico del periodo libre de heladas con la información del registro histórico (ANEXO 2), los resultados se muestran a continuación.

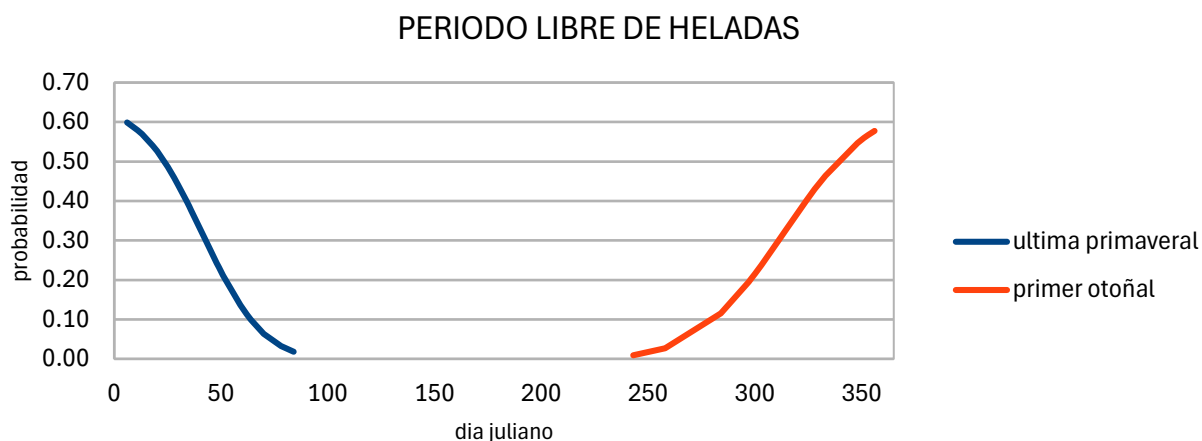


Figura 4.5 Periodo libre de heladas para Santo Tomás Apipilhuasco

4.5 Conclusión

Se concluye que el inicio de la temporada lluviosa y la duración de la estación de crecimiento se encuentran en el periodo libre de heladas los cuales permiten identificar los períodos adecuados para la siembra y la cosecha de los cultivos en la comunidad de Santo Tomás Apipilhuasco.

4.6 Literatura citada

- Abhijeet Abhishek, Mantha S. Phanikumar, Alicia Sendrowski, Konstantinos M. Andreadis, Mahya G.Z. Hashemi, Susantha Jayasinghe, P.V. Vara Prasad, Roberts J. Brent, Narendra N. Das. (2023). Dryspells and Minimum Air Temperatures Influence Rice Yields and their Forecast Uncertainties in Rainfed Systems, Agricultural and Forest Meteorology, Volume 341, 109683, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109683>.
- CNA-SMN. (s. f.). Información estadística climatológica. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Cochemé, J. y Franquin, P. (1967). An agroclimatology survey of a semiarid area in Africa south of the Sahara. Nota técnica núm. 86. Ginebra: Organización Mundial de Meteorología, 136 pp.
- Infante, S. y Zarate, L. (2001). Métodos estadísticos. Trillas México.
- Kuromiya, A. (2006). Salir adelante, Conflicto, armonía y la práctica local del progreso en Santo Tomás Apipilhuasco, Estado de México.

2023, abril 6, de Universidad Iberoamericana. Sitio web: <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/014743/014743.pdf>

- Méndez, Carlos Enrique & Lugo, Diana Marcela & Cortés-D, Diego. (2021). EL ALMACENAMIENTO Y LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA DETERMINACIÓN DEL USO POTENCIAL DE LAS TIERRAS. 36-48. 10.24133/geoespacial.v18i1.1996.
- Mupangwa, W., Walker, S. and Twomlow, S. (2011). Start, end and dry spells of the growing season in semi-arid southern Zimbabwe. *Journal of Arid* 93 *Environments*. 75(11), 1097 – 1104. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.011>.
- Osorio E., Humberto, Leyva G., Ángel, & Toledo T., Ernesto. (2017). Evaluación de cultivos de ciclo corto en rambután (*Nephelium lappaceum* L.) en México utilizando IET. *Cultivos Tropicales*, 38(3), 07-13. Recuperado en 14 de noviembre de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000300007&lng=es&tlng=es.
- Ruíz, O. Á., Arteaga, R.R., Vázquez, P.M.A., Ontiveros, C. R. E. y López, L. R. (2012). Inicio de la estación de crecimiento y periodos secos en Tabasco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 3 (2), 85-102.
- Sivakumar M.V.K. (1988). Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*. 42, 295 – 305
- Thornthwaite, CW; Mather, JR. (1955). *The water balance*. Publications in Climatology. New Jersey, Drexel Institute of Technology
- Valencia, J.N. Arteaga, R. R. 2020. Balance hídrico para la planeación agrícola del arroz en el valle del cauca, Colombia.
- Xu, J., Xiao, Y., Xie, G.D., (2019). Analysis on the spatio-temporal patterns of water conservation services in Beijing. *J. Resour. Ecol.* 10 (4), 362–372.
- Yao, J., Liu, H., Huang, J., Gao, Z., Wang, G., Li, D., Chen, X., (2020). Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production. *Nat. Commun.* 11 (1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15515-2>.

5. COMPARACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN DOS PARCELAS EXPERIMENTALES: UNA DE PASTIZAL NATURAL Y OTRA INTERVENIDA CON PLANTACION DE NOPAL

Iván Alejandro García Lemus¹; Ramon Arteaga Ramírez^{*1}; Laura Alicia Ibáñez Castillo¹; Mario Alberto Vázquez Peña¹;

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. (UACH). Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. Estado de México.

Autor para correspondencia: rarteagar@chapingo.mx

5.1 Resumen

El objetivo principal del estudio fue evaluar la variación estacional del contenido de agua en el suelo mediante un análisis comparativo del balance hídrico a nivel diario en dos parcelas de evaluación, una de pastizal natural y otra intervenida con plantación de nopal (*opuntia spp.*) en la comunidad de Santo Tomás Apipillhuasco, Tepetlaoxtoc, Edo. Méx., México. Para ello se midieron de manera directa las variables de precipitación (P), temperatura y humedad volumétrica del suelo (en 30 cm y 60 cm de profundidad). La escorrentía superficial (ES) se estimó mediante el método del número de curva (NC). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó mediante la ecuación Penman-Monteith. La evapotranspiración total (ET) se estimó con el coeficiente K_c de la cobertura vegetal. Durante la temporada de lluvias, la parcela intervenida con nopal retuvo más humedad en el suelo. En cambio, durante la época de estiaje, la parcela de pastizal natural mostró una mayor capacidad de almacenamiento de agua.

Palabras Clave: Erosión, Reforestación, Balance Hídrico, Humedad Volumétrica, Opuntia Spp.

5.2 Introducción

La degradación del suelo es un fenómeno global que afecta negativamente la capacidad de la tierra para mantener ecosistemas saludables y sustentar la vida humana y animal. Esto es preocupante, dado que más de una cuarta parte de la superficie terrestre libre de hielo de la Tierra ya está visiblemente degradada, y aproximadamente 1,300 millones de personas son directamente afectadas por esta problemática (Olsson L *et al.*, 2019), es evidente la urgencia de encontrar soluciones efectivas para rehabilitar los suelos degradados.

En este contexto, el nopal emerge como una planta con un potencial significativo para contribuir a la restauración de suelos degradados. Su capacidad para prosperar en condiciones ambientales desafiantes, características comunes en las regiones áridas y semiáridas, lo convierte en una opción atractiva para la agricultura en áreas marginales.

Los matorrales de *Opuntia* aumentan el contenido de materia orgánica (40%) y nitrógeno (200%) de los suelos en comparación con el campo abierto, lo que contribuye al mantenimiento de la fertilidad del suelo (Monjauze y Le Houérou, 1965). Además, se ha encontrado que estas plantas no solo juegan un papel importante en la retención del suelo, la regulación del agua y la mejora de la fertilidad del suelo (Le Houérou, 1996) sino que también previenen eventos drásticos de hambruna y los efectos de la sequía (Nefzoui y Salem, 2001). Investigaciones más recientes resaltan la capacidad del nopal para mejorar la estructura y la fertilidad del suelo, así como su resistencia a la sequía y su capacidad para mitigar la erosión (Bacarrillo-López *et al.*, 2021).

El objetivo principal del estudio fue evaluar la variación estacional del contenido de agua en el suelo mediante un análisis comparativo del balance hídrico a nivel diario en dos sitios de evaluación, una parcela de pastizal natural degradado mientras que el otro sitio contiguo fue intervenido con plantaciones de nopal. Este estudio se llevó a cabo en el poblado de Santo Tomás Apipilhuasco, municipio de Tepetlaoxtoc, Estado de México, México.

5.3 Materiales y métodos

5.3.1 Ubicación del área de estudio

El experimento se llevó a cabo en un terreno de propiedad privada ubicado en el poblado de Santo Tomás Apipilhuasco, en el municipio de Tepetlaoxtoc, al noreste del Estado de México, en las coordenadas 19° 32' 6.994" N y 98° 45' 6.109" W, a una altitud de 2,700 metros sobre el nivel del mar (figura 1). Esta zona se caracteriza por un clima seco templado, con precipitaciones moderadas tanto en verano como en invierno, aunque este último tiende a ser bastante seco. La temperatura media anual es de 13.8°C, mientras que la precipitación media anual alcanza los 600 mm, según datos de CNA-SMN (s.f.).

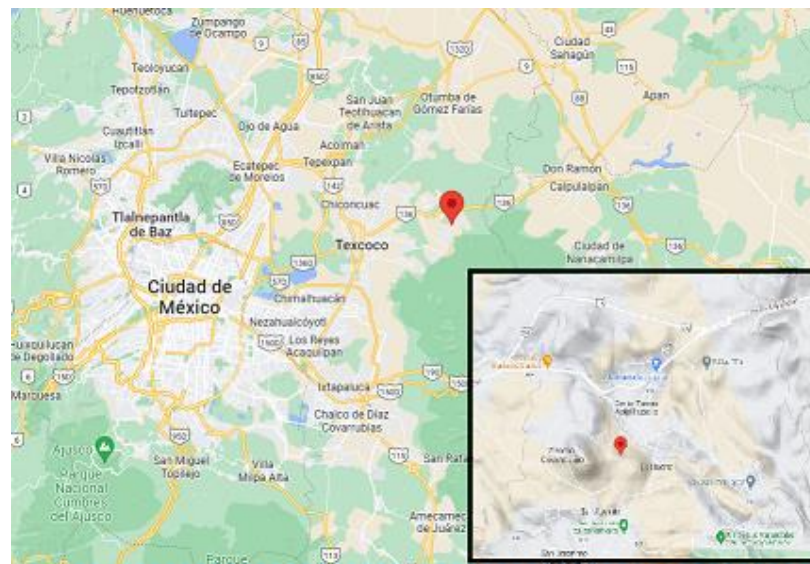


Figura 5.1 Ubicación del poblado Santo Tomás Apipilhuasco, fuente Google maps

5.3.2 Establecimiento del experimento

El estudio se llevó a cabo en el período comprendido entre julio de 2023 y septiembre de 2024, en un área con suelo franco arcilloso arenoso. Se utilizó la variedad de nopal *Opuntia* spp silvestre endémico de la región, caracterizado por cladodios grandes muy espinosos de color verde oscuro, con forma circular o de raqueta y un grosor de 1 a 2 cm.

Se implementó un diseño experimental completamente aleatorio para investigar el efecto de la plantación de nopal en dos parcelas contiguas de 20 m x 30 m (600 m²) cada una. La asignación de la cobertura vegetal (nopal o

ninguna) a cada parcela se realizó de manera aleatoria, garantizando así que se controlara la variabilidad inherente al máximo posible.

La plantación se realizó manualmente, excavando una cepa de aproximadamente 30 cm de profundidad y enterrando aproximadamente 1/3 del cladodio. Las plantas se distribuyeron a una distancia de 1.5 m entre sí, siguiendo un arreglo topológico 3 bolillo que seguía las curvas de nivel del terreno.



Figura 5.2 Vista de la plantación de nopal en la parcela intervenida

5.3.3 Materiales y equipos

Para la caracterización de suelos, se utilizaron herramientas estándar de campo, incluyendo herramientas para excavación, bolsas de polietileno tipo ziploc para muestras de suelo, espátula, bandeja, bolígrafo de tinta indeleble y fichas de campo. Para la determinación de la cobertura del suelo, se empleó un cuadrante de fierro corrugado de 1m x 1m, dividido para formar una rejilla con 100 subcuadrantes o espacios de 10cm x 10cm, además de una cinta métrica y fichas de campo.

Se utilizó una Microestación Vantage Pro 2 de la marca Davis, equipada con un sensor interno de temperatura y cuatro puertos externos para la instalación de más sensores según sea necesario. En este estudio, estos puertos se

utilizaron para el pluviómetro y los sensores de humedad, con un intervalo de medición configurado de 30 minutos.

También se empleó un pluviógrafo de auto-vaciado y resistente al congelamiento para la medición de la precipitación. Además, se utilizaron sensores de humedad Watermark de resistencia eléctrica de estado sólido, compatibles con la microestación Vantage Pro 2, para medir el contenido volumétrico de agua en el suelo.

5.3.4 Métodos y procedimientos

El desarrollo metodológico se centró en la medición y estimación de los componentes del balance hídrico del suelo, con un enfoque particular en su función como reservorio, mediante la determinación de su capacidad de almacenamiento. Se midieron de manera directa las variables de temperatura precipitación (P) y humedad volumétrica del suelo (en 30 cm y 60 cm de profundidad). La escorrentía superficial (ES) se estimó mediante el método del número de curva (NC). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó mediante la ecuación Penman-Monteith. La evapotranspiración total (ET) se estimó con el coeficiente K_c de la cobertura vegetal.

Se garantizó que los puntos de evaluación tanto en la parcela con plantación de nopal como en la parcela no intervenida estuvieran ubicados en proximidad, asegurando así condiciones meteorológicas similares. Además, se procuró que los suelos fueran comparables en términos de sus características, con el fin de aislar el efecto del tipo de cobertura o intervención como el único factor que podría influir en el contenido de agua del suelo. Se utilizó como base el método de Thornthwaite y Mather (1955) para el balance hídrico del suelo, realizando adaptaciones precisas debido a la medición directa de variables como el almacenamiento y la precipitación. Estas modificaciones permitieron ajustar las ecuaciones propuestas por estos autores a la situación específica del estudio, prescindiendo incluso de ciertos supuestos.

Es importante señalar que el modelo puede presentar discrepancias debido a la complejidad de los sistemas naturales y las limitaciones de los instrumentos

de medición. Mallqui (2022) señala que se pueden identificar tres tipos de incertidumbre en la modelización hídrica: la incertidumbre asociada a las variables hidrológicas observadas, los parámetros del modelo y la estructura del modelo. Esta naturaleza incierta de la hidrología resalta la importancia de medir y evaluar la incertidumbre en los resultados.

$$P - ET - ES - \Delta\theta = \mu \quad (5.1)$$

Donde: P, precipitación (mm); ET, evapotranspiración (mm); ES, escorrentía (mm); $\Delta\theta$, cambio en el almacenamiento de agua (mm); μ , discrepancia del modelo (mm).

5.3.5 Caracterización de suelos

Propiedades físicas:

La interacción del ciclo hidrológico y la dinámica del agua en el suelo está influenciada, principalmente, por propiedades como la textura, propiedades hidráulicas, contenidos de humedad, entre otros (Aguilar y Ortega, 2017). La caracterización se llevó a cabo mediante la exploración del suelo a través de muestras, tomadas en el perfil donde se instalaron los sensores de humedad. Se analizaron en el laboratorio central de la Universidad Autónoma Chapingo para relacionar los valores de humedad volumétrica del suelo (θ_v) con las propiedades del perfil. La capacidad de campo (CC) se estimó por el método olla de presión a 0.3 Atm, el punto de marchitez permanente (PMP) mediante membrana de presión a 15.0 Atm, y la curva de retención por membrana y olla de presión (Martínez & Aguilera, 1996).

Tabla 5.1 Valores de CC, PMP, Dap y Textura de las muestras de suelo tomadas en campo

MUESTRA	CC (%)	PMP (%)	Dap (g/cm ³)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Pastizal 30 cm	31.41	22.98	1.14	51.08	25.28	23.64	Franco-arcillo..arenoso
Pastizal 60 cm	31.81	22.40	1.12	50.70	25.13	24.14	Franco-arcillo..arenoso
Nopal 30 cm	31.27	22.97	1.16	51.51	25.01	24.21	Franco-arcillo..arenoso
Nopal 60 cm	32.30	23.05	1.11	51.61	24.96	24.07	Franco-arcillo..arenoso

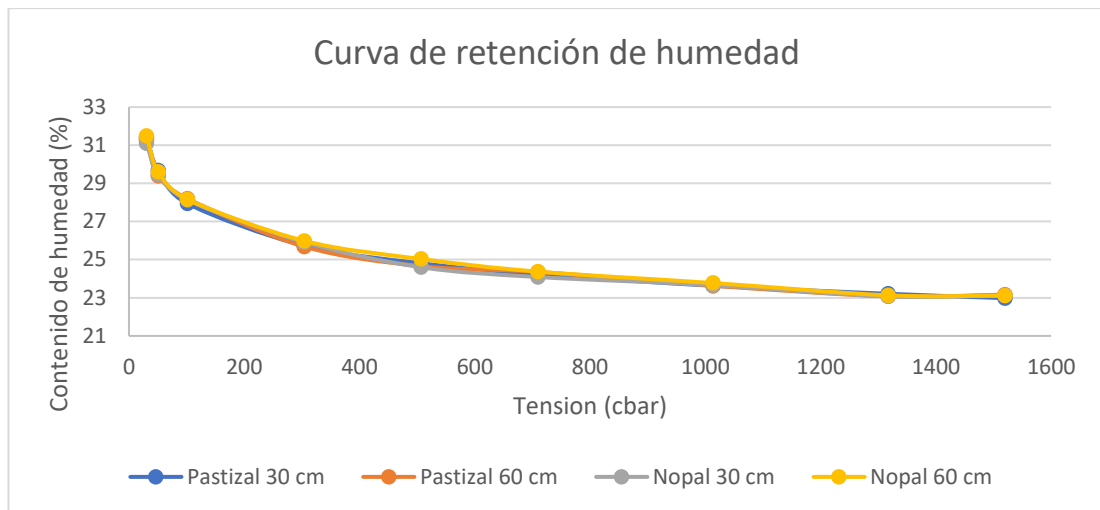


Figura 5.3 Curva de retención de humedad para cada muestra tomada

Humedad de suelo:

La humedad volumétrica del suelo se obtuvo mediante sensores Watermark ubicados en las parcelas de estudio que miden la tensión de humedad de suelo en un rango de 0 a 200 centibares, lo cual comparado con la figura 5.3 implica que los sensores sólo miden en el rango cercano a capacidad de campo. Se realizó un análisis del contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades del perfil de suelo (30 y 60 cm) para comparar la plantación de nopal con el pastizal natural.



Figura 5.4 Ubicación de sensores de humedad Watermark en la zona de plantación de nopal y pastizal natural

Cobertura del suelo:

La evaluación de la cobertura del suelo se realizó con la metodología de Mallqui (2022) empleando un cuadrante de fierro corrugado para determinar

el porcentaje de cobertura vegetal en cada área de estudio. Se realizaron conteos visuales de subcuadrantes para estimar la presencia de suelo desnudo, vegetación, mantillo y otros elementos.



Figura 5.5 Método de evaluación para cobertura fuente Mallqui (2022)

5.3.6 Caracterización climática

Precipitación total y temperatura:

Se utilizaron series de datos de sensores de temperatura y precipitación (pluviógrafo) instalados en la zona de estudio. Los datos se recopilaban cada 30 minutos y se generaron informes diarios y mensuales utilizando el programa Excel en Office 365.



Figura 5.6 Recolección de datos meteorológicos en la zona de estudio

Escorrentía superficial

La escorrentía superficial (ES), se determinó con el método del número de curva (NC) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (Chow *et al.*, 1994). Se tomaron en cuenta factores como el uso de la tierra, medidas de conservación, capacidad de infiltración del suelo y humedad previa del suelo. La ES se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$ES = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (5.2)$$

Donde: ES, escorrentía superficial (mm); P, lluvia total acumulada (mm); y, S, potencial máximo de retención (mm) donde:

$$S = 254 \left(\frac{100}{NC} - 1 \right) \quad (5.3)$$

Con la información de la caracterización del suelo y cobertura se eligieron los NC adecuados para cada una de las parcelas estudiadas. La condición previa de humedad del suelo se determinó a partir de los datos de precipitación diaria considerando una lluvia antecedente de cinco días.

Evapotranspiración de referencia

La Evapotranspiración de referencia (ET₀) se estimó a partir de los datos de los sensores en la parcela y el método Penman-Monteith mediante la ecuación mostrada a continuación (Allen *et al.*, 2006).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (5.4)$$

Donde:

ET₀, evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n, radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹)

G, flujo de calor de suelo (MJ m⁻² d⁻¹)

T, temperatura media del aire a 2m de altura (°C)

U₂, velocidad del viento a 2m de altura (m s⁻¹)

e_a , presión real de vapor (kpa)

e_s , presión de vapor a saturación (kpa)

Δ , pendiente de la curva de presión de vapor (KPa °C⁻¹)

γ , constante psicrométrica (KPa °C⁻¹)

Balance hídrico del suelo (BHS)

Se empleó el modelo propuesto por Thornthwaite y Mather (1955), para el balance hídrico del suelo, con adaptaciones para tener en cuenta la medición directa de variables como la precipitación y almacenamiento de agua en el suelo (La) (Mallqui, 2022).

En los siguientes ítems se describen las consideraciones sobre las cuales se sustentó el balance hídrico, y otras modificaciones en el cálculo, producto de tener un monitoreo diario de las variaciones del contenido de agua en el suelo. Para hacerlo se utilizó el programa Excel en Office 365. (ANEXO 3)

Descripción de las variables involucradas en el BHS

La capacidad de almacenamiento máxima de agua del suelo fue definida por la capacidad de campo (θ_{cc}). El análisis de la humedad fue realizado a diversas profundidades (0 cm a 30 cm y 30 cm a 60 cm). La humedad se calculó mediante la siguiente relación (Vásquez *et al.* 2017):

$$La = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\theta_i(\%)}{100} \right] * Prof_i \quad (5.5)$$

Donde: La , lámina almacenada (mm); θ_i (%), contenido de humedad de la capa i ; $Prof_i$, espesor de la capa i (mm); n , número de capas en que se divide el perfil de suelo analizado.

- Cuando las entradas de agua en un día superan las salidas ($P > ETo$), el exceso de agua aumenta las reservas del suelo, (θ_i) cuando el suelo se satura, se presenta escorrentía. En contraste, si las salidas son mayores que las entradas, las reservas de humedad del suelo disminuirán. La variación en las reservas del suelo ($\Delta\theta$) fue calculada

como la diferencia entre las reservas del suelo en el tiempo actual (θ_i) y las reservas del suelo en el tiempo anterior (θ_{i-1}).

- Se comparó la precipitación (P) con la evapotranspiración de referencia (ET_o), para identificar días a lo largo del año en los que la precipitación excedió la evapotranspiración ($P > ET_o$). En estos casos, se asumió que la ET era igual a la ET_o. Por otro lado, en días donde $P < ET_o$, se cumplió que $ET_o > ET$. La ET para estos casos se calculó con la siguiente expresión (Allen *et al.*, 2006):

$$ET = Kc * ET_o \quad (5.6)$$

Donde ET es la evaporación del cultivo (en mm/día); Kc, es el coeficiente del cultivo (sin unidades); ET_o, es la evapotranspiración de referencia (en mm/día).

Los valores aproximados de Kc considerados fueron, para pastizal natural (praderas) un Kc de 0.7 (Manis *et al.*, 2024) y para los cladodios de nopal recién plantados un Kc de 0.5 (Inglese *et al.*, 2018)

5.3.7 Análisis estadístico comparativo

El análisis estadístico se ha realizado básicamente entre los valores encontrados de humedad de suelo entre la parcela no intervenida (A) y la parcela intervenida con plantaciones de nopal (B), con la finalidad de determinar si existen diferencias estadísticas en estos valores y si estas son significativas. Se planteó el conjunto de hipótesis siguiente:

$$H_0: P(A > B) = P(B > A) \quad H_0: P(A > B) = 0.5 \quad (5.7)$$

$$H_1: P(A > B) \neq P(B > A) \quad H_1: P(A > B) \neq 0.5$$

Comparación de medianas

Se empleó la prueba U de Mann-Whitney, una prueba no paramétrica utilizada para evaluar si dos poblaciones o muestras independientes difieren en su posición, sin suponer normalidad en los datos. Primero, se ordenaron los

valores observados de humedad de suelo de ambas muestras de menor a mayor y se les asignaron rangos (por ejemplo, el valor más bajo recibió el rango 1, el siguiente el rango 2, y así sucesivamente). Posteriormente, se analizó si existía una diferencia significativa entre las medidas de tendencia central de los rangos correspondientes a cada muestra. Esta diferencia se presenta cuando los valores de las muestras tienden a ubicarse en distintas áreas de la jerarquía de rangos.

Para determinar la significancia, se calcularon los valores U_1 y U_2 , considerando el número de observaciones de cada muestra y la suma de sus rangos. El menor de estos dos valores utilizó para calcular un estadístico Z a partir de estos rangos. se comparó con el valor crítico de $Z_{(95\%)}$ (Palacios et al., 2019).

Es importante señalar que esta prueba no utiliza las mediciones originales, sino los rangos asignados. Todas las observaciones de ambas muestras se ranquearon conjuntamente, y luego se calculó un estadístico de prueba a partir de esos rangos. Por ser n_1 y n_2 grandes se realizó una aproximación normal para la estadística de Mann y Whitney por el Teorema central del límite (Infante & Zarate, 2001) según las siguientes ecuaciones:

$$\bullet \quad U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - S_1 \quad U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - S_2 \quad (5.8)$$

$$\bullet \quad U = \min(U_1, U_2)$$

$$\bullet \quad Z = \frac{U - \frac{n_1 n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}} \sim N(0, 1) \quad (5.9)$$

Donde: S_1 , es la suma de los rangos asignados a la muestra 1; S_2 , la suma de los rangos asignados a la muestra 2; n_1 , el tamaño de la muestra 1; n_2 , el tamaño de la muestra 2.

Tamaño del efecto

Esta prueba estadística evalúa la magnitud de una diferencia, ya que al aplicar una prueba de significancia y establecer el *p-valor*, este sólo puede proporcionar información sobre la presencia o ausencia de dicha diferencia,

dejando de lado su importancia. Para pruebas no paramétricas se calcula como:

$$r = \left| \frac{Z}{\sqrt{N}} \right| \quad (5.10)$$

Donde: Z, es el valor estandarizado para el U de Mann-Whitney; y, N, el número total de observaciones en las que se basa Z. Efecto pequeño de 0.1 – 0.3; efecto mediano de 0.3 – 0.5 y efecto grande mayor o igual 0.5 (Tomczak y Tomczak, 2014)

5.3.8 Índices estadísticos para evaluar la discrepancia en el cierre del balance hídrico

Se ha evaluado la discrepancia en el cierre del balance hídrico del suelo, comparando los valores diarios de sus componentes según la siguiente relación (Mallqui, 2022).

$$P_t = E_T + E_S + \Delta\theta \quad (5.11)$$

Donde: P_t (precipitación total) es la variable estimada a comparar con las mediciones en campo; E_S , escorrentía es una variable modelada; y E_T (evapotranspiración) y $\Delta\theta$ (cambio de almacenamiento de humedad) son variables calculadas a partir de datos de humedad del suelo y todas están en milímetros (mm). A continuación, se describen los índices estadísticos empleados.

Relación de la desviación estándar de las observaciones RMSE (RSR)

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) se utiliza para medir la magnitud de la desviación entre los valores simulados y los observados, siendo en este caso el valor observado la precipitación total (P_t). Generalmente, se considera que un RMSE más bajo indica un mejor desempeño del modelo. Singh *et al.*, citados por Moriasi *et al.* (2007), proponen una forma de calificar lo que se considera un RMSE bajo, en función de la desviación estándar de las observaciones (RSR). El RSR puede variar desde el valor ideal de cero, lo que implica un RMSE nulo y, por tanto, un ajuste perfecto del modelo, hasta valores positivos. Cuanto menor sea el RSR, menor será el RMSE, lo que sugiere una mejor simulación del modelo.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2} \right]} \quad (5.12)$$

Donde: RSR, relación del RMSE-desviación estándar de las observaciones; RMSE, raíz el error cuadrático medio, STEDEV obs, desviación estándar de las observaciones en este caso de las mediciones de P; Y_i^{obs} , mediciones de P; Y_i^{sim} , valores simulados de Pt.

Sesgo porcentual (PBIAS)

El sesgo porcentual (PBIAS) evalúa la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los valores observados. Un valor óptimo de PBIAS es cero, lo que indica una simulación precisa del modelo. Según Gupta *et al.* citados por Mallqui (2022), los valores positivos reflejan un sesgo de subestimación, mientras que los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación del modelo.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (5.13)$$

En la Tabla 5.2 se presenta la calificación de desempeño estadístico para evaluar la discrepancia en el cierre del balance hídrico propuesto por Moriasi *et al.* (2007).

Tabla 5.2 Calificación de desempeño para evaluar la discrepancia en el cierre del Balance hídrico

Clasificación del desempeño	RSR	PBIAS
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactorios	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
No satisfactorio	$RSR > 0.70$	$PBIAS \geq \pm 25$

5.4 Resultados y discusión

5.4.1 Caracterización de cobertura de suelo

El sitio en investigación con las parcelas experimentales ha presentado poca variación en los valores de cobertura vegetal en el área intervenida con nopal como la no intervenida. Principalmente se observó la presencia de vegetación natural siendo los pastos nativos la especie predominante y musgos que brotan entre rocas, hay porcentajes muy considerables de suelo desnudo y alta pedregosidad y/o afloramientos de roca por degradación del suelo. Los cladodios plantados inicialmente tuvieron pequeños brotes en la época de lluvias, sin embargo, en época de estiaje se observó la presencia de insectos que se alimentaban de estos brotes. De los cladodios plantados inicialmente sólo sobrevivió el 50% en la época de estiaje, mismos que fueron replantados para la segunda temporada de lluvias. También se observó la presencia de hierbas y pastos en la base de la planta de nopal en temporada de lluvias.

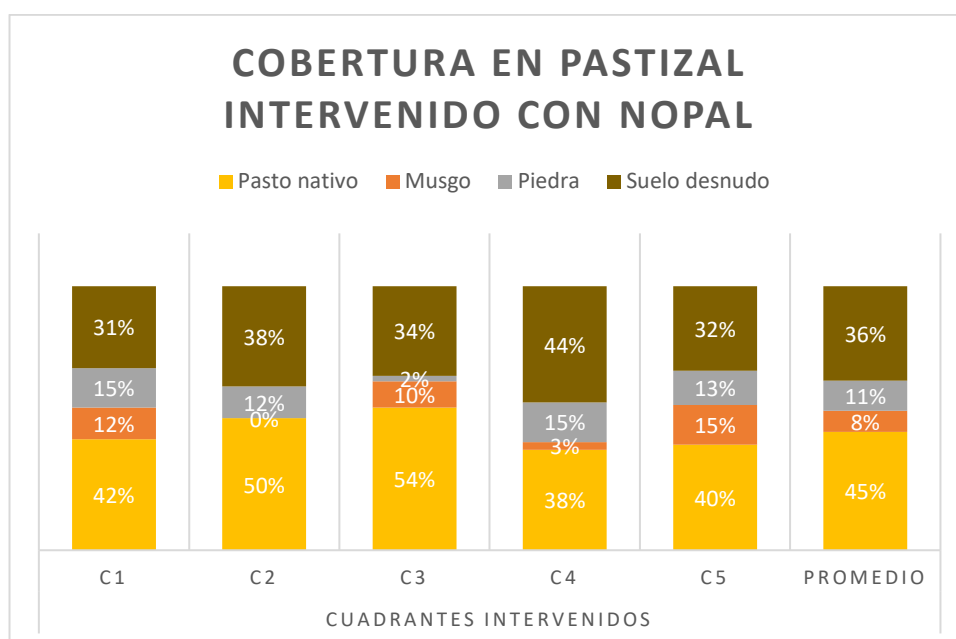


Figura 5.7 Cobertura del suelo en parcela intervenida con nopal

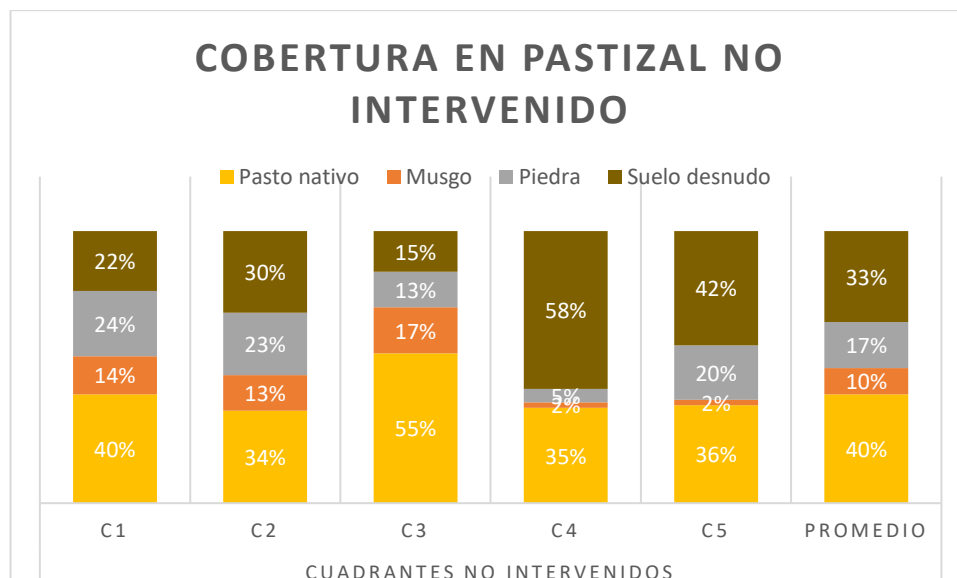


Figura 5.8 Cobertura del suelo en parcela de no intervenida

Tabla 5.3 Caracterización de la cobertura de la parcela intervenida con nopal

Parcela intervenida						
Mes	Pasto nativo	Musgo	Piedra	Suelo desnudo	Especie dominante	Observaciones
Jul-23	49%	8%	16%	27%	Pastos nativos	Presencia aromáticos que locatarios conocen como romeritos
Aug-23	46%	7%	19%	28%	Pastos nativos	Presencia de hierbas con flores y hierbas en la base del nopal
Sep-23	53%	10%	16%	22%	Pastos nativos	Pastos nativos y hierbas de altura promedio de 15 cm
Oct-23	46%	10%	19%	26%	Pastos nativos	Comienzan a secarse los primeros pastos y hierbas con semillas en flores
Nov-23	49%	8%	14%	30%	Pastos nativos	Aumentan pastos secos
Dec-23	47%	8%	13%	32%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Jan-24	46%	7%	16%	31%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Feb-24	51%	8%	15%	26%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Mar-24	43%	9%	13%	34%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Apr-24	44%	7%	18%	32%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
May-24	42%	7%	18%	33%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Jun-24	46%	9%	19%	27%	Pastos nativos	Reverdecen pastos con las primeras lluvias
Jul-24	45%	9%	19%	27%	Pastos nativos	Presencia de hierbas con flores y hierbas en la base del nopal
Aug-24	47%	9%	17%	27%	Pastos nativos	Pastos nativos y hierbas de altura promedio de 15 cm
Sep-24	53%	7%	14%	26%	Pastos nativos	Comienzan a secarse los primeros pastos y hierbas con semillas en flores

Tabla 5.4 Caracterización de la cobertura de la parcela no intervenida con nopal

Parcela no intervenida						
Mes	Pasto nativo	Musgo	Piedra	Suelo desnudo	Especie dominante	Observaciones
Jul-23	46%	7%	15%	31%	Pastos nativos	Presencia aromáticos que locatarios conocen como romeritos
Aug-23	47%	8%	14%	32%	Pastos nativos	Presencia de hierbas con flores pequeñas
Sep-23	44%	8%	16%	32%	Pastos nativos	Pastos nativos y hierbas de altura promedio de 15 cm
Oct-23	42%	6%	13%	40%	Pastos nativos	Comienzan a secarse los primeros pastos y hierbas con semillas en flores
Nov-23	49%	7%	17%	28%	Pastos nativos	Aumentan pastos secos
Dec-23	49%	7%	12%	31%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Jan-24	48%	8%	15%	29%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Feb-24	43%	8%	13%	35%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Mar-24	48%	9%	17%	27%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Apr-24	41%	7%	16%	36%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
May-24	49%	6%	13%	31%	Pastos nativos	Pastos completamente secos
Jun-24	41%	7%	13%	40%	Pastos nativos	Reverdecen pastos con las primeras lluvias
Jul-24	51%	7%	16%	26%	Pastos nativos	Presencia de hierbas con flores pequeñas
Aug-24	46%	6%	14%	34%	Pastos nativos	Pastos nativos y hierbas de altura promedio de 15 cm
Sep-24	50%	8%	16%	26%	Pastos nativos	Comienzan a secarse los primeros pastos y hierbas con semillas en flores

5.4.2 Caracterización climática

Precipitación

El estudio ha abarcado dos partes de la estación lluviosa, en el periodo de julio 2023 a septiembre 2024.

En la figura 5.9 se puede apreciar la variación de la precipitación en el periodo evaluado. La precipitación total fue de 837.14 mm. En el primer periodo comprendido de julio de 2023 a enero de 2024, la precipitación fue de 166.9 mm. En el segundo periodo comprendido entre febrero de 2024 a septiembre de 2024 fue de 633.4 mm.

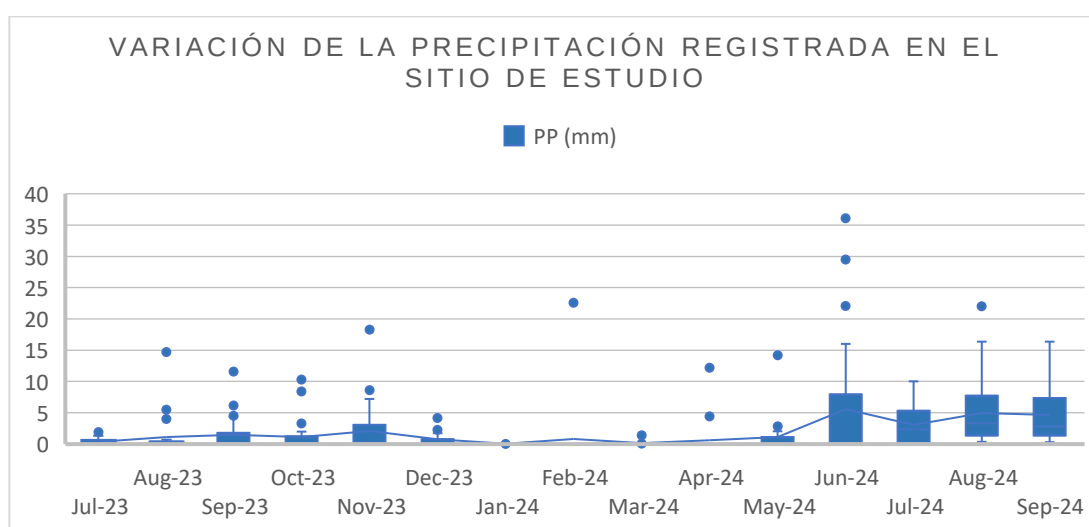


Figura 5.9 Variación de la precipitación registrada en el sitio de estudio

Temperaturas

La temperatura media en el sitio de estudio ha variado desde 6.6°C (diciembre 2023) hasta 23.2°C (mayo 2024) con un valor medio de 15.2°C.

La temperatura máxima ha variado desde 12.2°C (diciembre 2023) hasta 33°C (mayo 2024) con un valor medio de 23°C.

La temperatura mínima ha variado desde -0.42 °C (diciembre 2023) hasta 15.8°C (mayo 2024) con un valor medio de 9.4°C.

En la figura 5.10 se pueden apreciar las temperaturas registradas en el sitio en el periodo julio 2023 – septiembre 2024

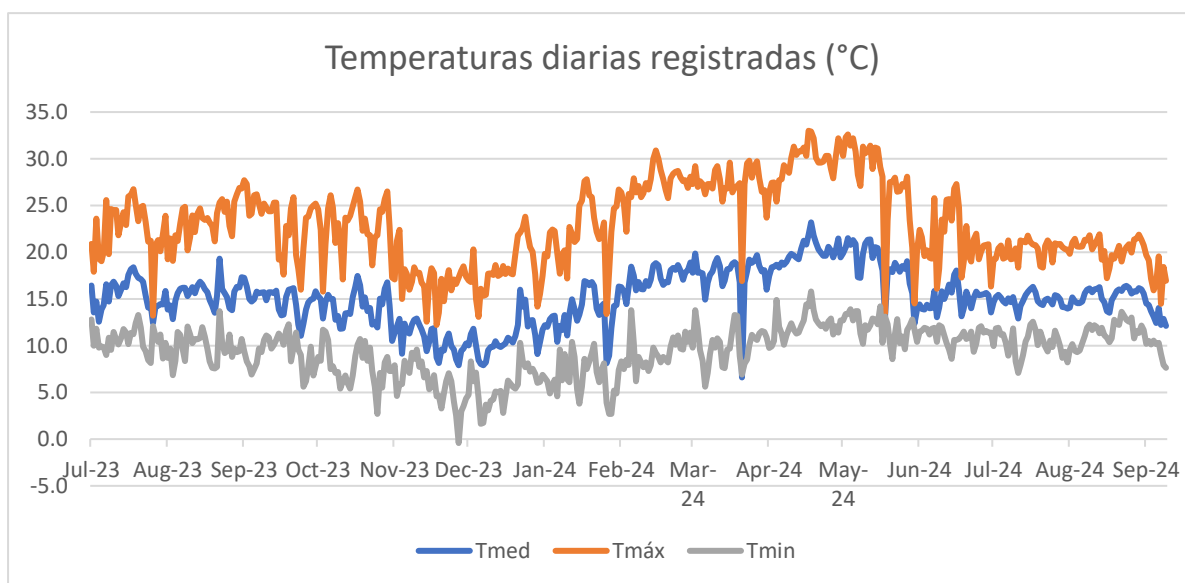


Figura 5.10 Temperaturas diarias registradas en el sitio de estudio

Escorrentía Superficial

El procedimiento utilizado para determinar la ES ha sido el método del número de curva (NC) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (Chow et al. 1994). Con la información de la caracterización del suelo y cobertura se eligió los NC adecuados para cada una de las zonas estudiadas. La condición previa de humedad del suelo se determinó a partir de los datos de precipitación diaria considerando una lluvia antecedente de cinco días.

Tabla 5.5 Parámetros para la estimación de ES según el SCS

Parcela	Uso del suelo	Condición hidrológica para la infiltración	Grupo hidrológico de suelo	Número de curva
No Intervenido	Pasto natural	mala	B	79
Intervenido	Pasto natural-cultivo en curva	mala	B	74

Tabla 5.6 Parámetros para la condición previa de humedad del suelo

Condición antecedente	P mm acumulada 5 días	
I	<	12.7
II	12.7	38.1
III	>	38.1

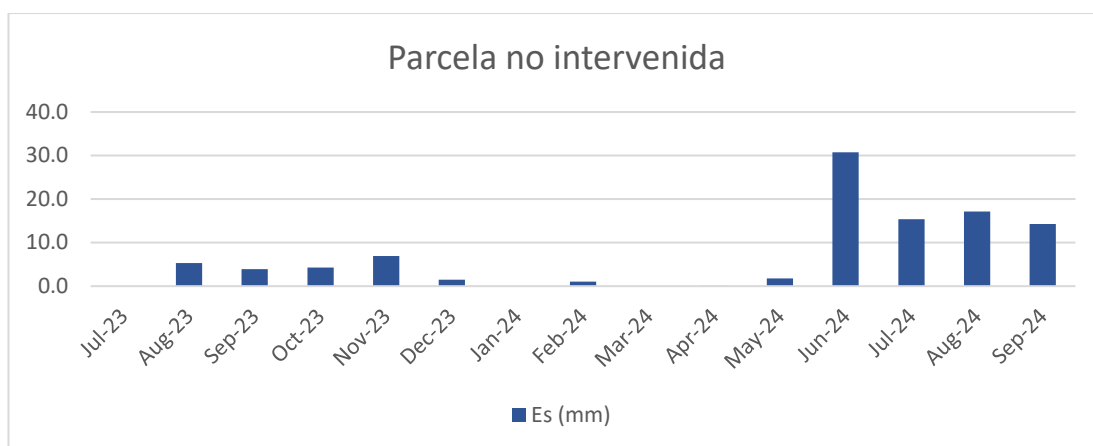


Figura 5.11 Escorrentía superficial en el área no intervenida con nopal

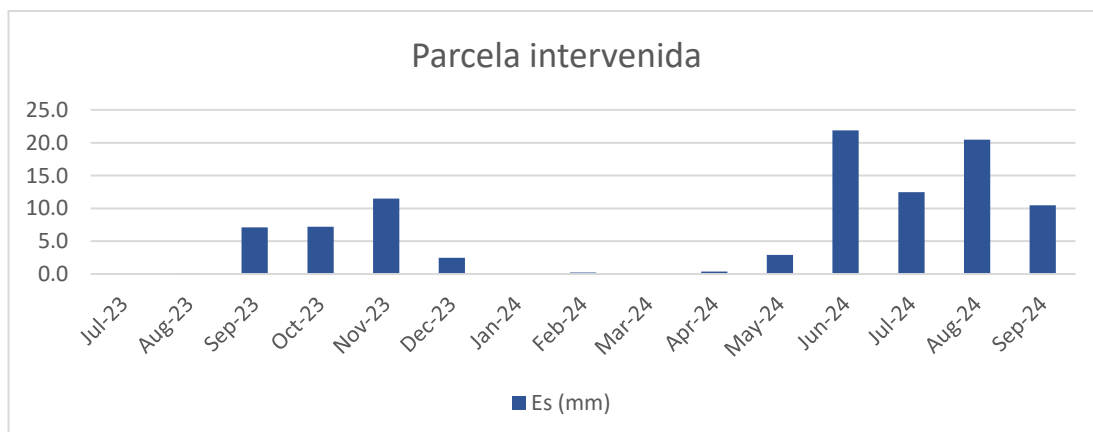


Figura 5.12 Escorrentía superficial en el área intervenida con nopal

Evapotranspiración de referencia

En el área de estudio se estimó una evapotranspiración de referencia (ET_o) para el periodo de julio 2023 a septiembre 2024 de 2,316 mm, lo cual es significativamente mayor que la lámina precipitada. (diagrama de cajas con el total de datos diarios de cada mes)

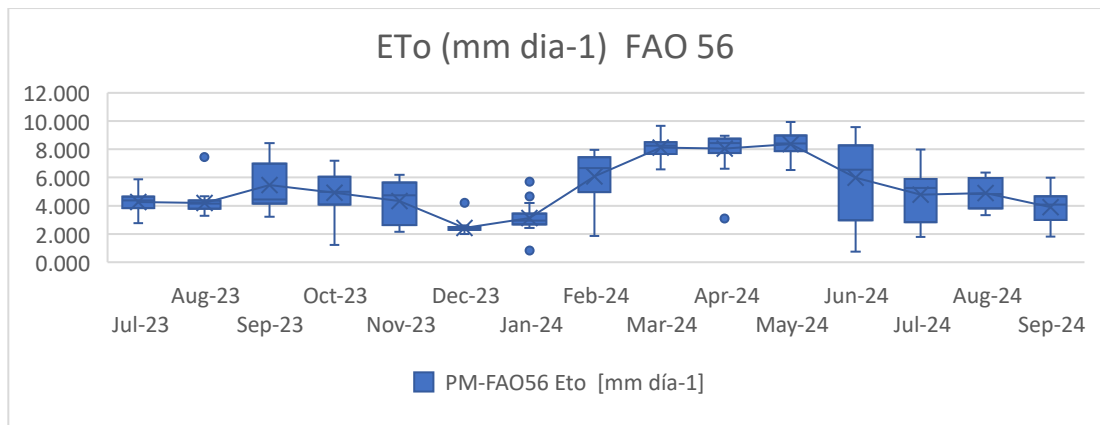


Figura 5.13 Variación de la Evapotranspiración de referencia en el sitio de estudio

Almacenamiento del agua en el suelo

En la figura de 5.14 se ve la variación del almacenamiento del agua en el suelo a la profundidad estudiada en relación con la ocurrencia de precipitación en las parcelas de estudio. Los valores se expresan lámina almacenada (mm). Los gráficos están elaborados a un intervalo de tiempo diario.

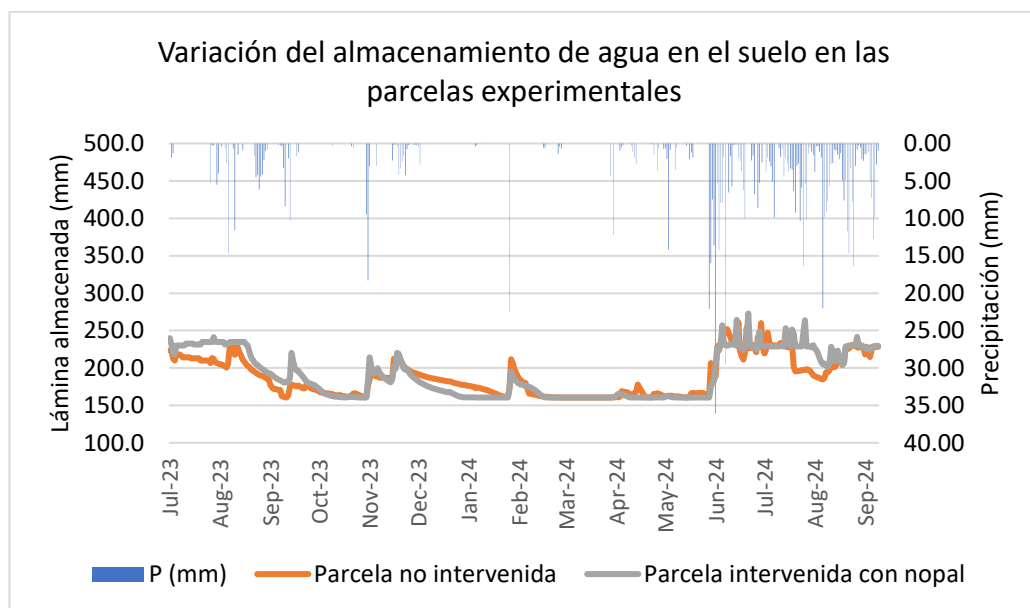


Figura 5.14 Variación en el almacenamiento de agua en el suelo en relación con la precipitación

En la figura 5.15 se presenta gráficamente la comparación del almacenamiento de agua en la parcela intervenida como la no intervenida con plantaciones de nopal.

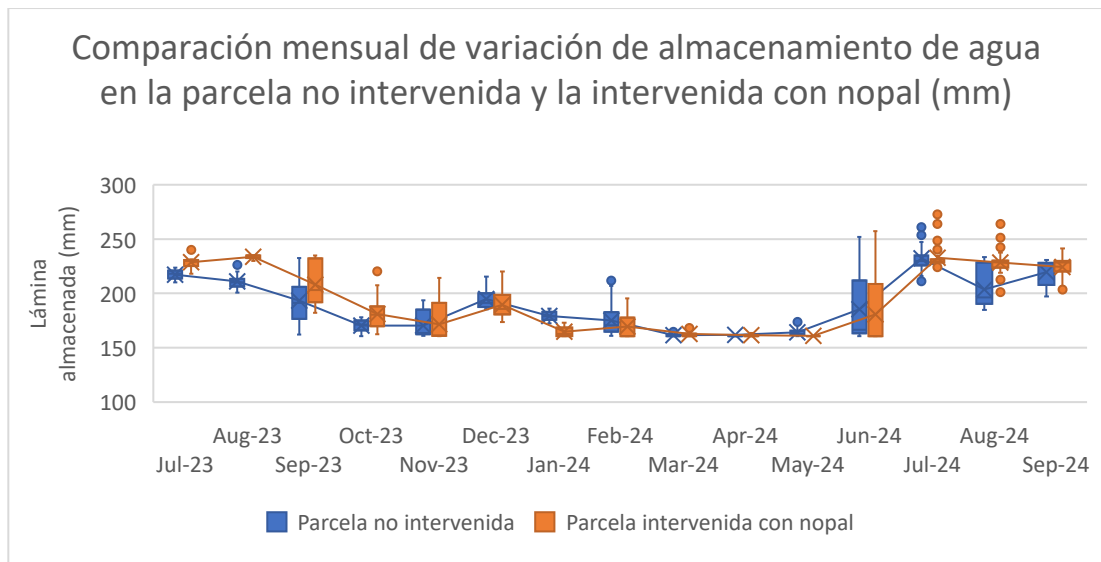


Figura 5.15 Comparación de la variación de almacenamiento de agua en el suelo de la parcela no intervenida con nopal y la intervenida.

Se observa que, en la parcela intervenida con nopal, los valores de almacenamiento de agua en el suelo son mayores durante varios meses en el periodo de estudio, como se muestra en la figura 5.15. Además, en la figura 5.16 y 5.17 se nota que estos valores no siguen una distribución normal, ya que están sesgados hacia un lado.

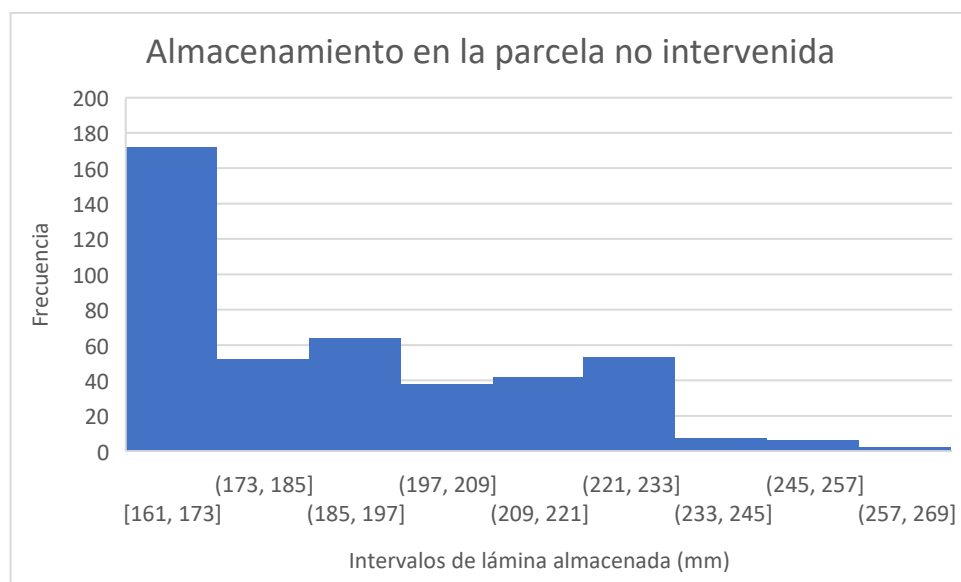


Figura 5.16 Histograma de frecuencias de los intervalos de la lámina almacenada en la parcela no intervenida

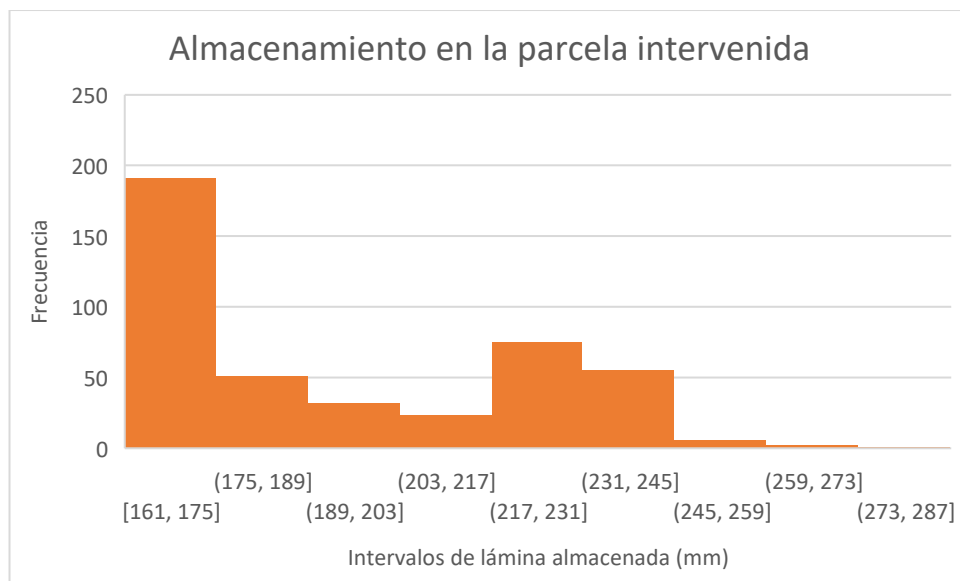


Figura 5.17 Histograma de frecuencias de los intervalos de la lámina almacenada en la parcela intervenida con plantación de nopal

A continuación, se realizó la prueba U de Mann-Whitney para cada mes con el fin de determinar en qué mes específico se presentan diferencias significativas entre los datos de la parcela no intervenida y la parcela intervenida con plantaciones de nopal.

Tabla 5.7 Resultados de la Prueba U de Mann-Whitney para evaluar la significancia estadística de las diferencias entre dos conjuntos mensuales de datos

Mes	U	Z_{calc}	$Z_{(95\%)}$	p-valor	Decision	Tamaño del efecto r	
Jul-23	25	-1.369	1.96	0.0855	No se rechaza Ho	0.3226	Efecto mediano
Aug-23	42	-6.180	1.96	0.0000	Se rechaza Ho	0.7849	Efecto grande
Sep-23	279	-2.528	1.96	0.0057	Se rechaza Ho	0.3264	Efecto mediano
Oct-23	281	-2.809	1.96	0.0025	Se rechaza Ho	0.3567	Efecto mediano
Nov-23	280	-2.521	1.96	0.0059	Se rechaza Ho	0.3254	Efecto mediano
Dec-23	298	-2.569	1.96	0.0051	Se rechaza Ho	0.3263	Efecto mediano
Jan-24	1	-6.751	1.96	0.0000	Se rechaza Ho	0.8573	Efecto grande
Feb-24	266	-2.403	1.96	0.0081	Se rechaza Ho	0.3155	Efecto mediano
Mar-24	446	-0.486	1.96	0.3136	No se rechaza Ho	0.0617	Sin efecto
Apr-24	421	-0.436	1.96	0.3314	No se rechaza Ho	0.0563	Sin efecto
May-24	69	-5.800	1.96	0.0000	Se rechaza Ho	0.7366	Efecto grande
Jun-24	276	-2.572	1.96	0.0050	Se rechaza Ho	0.3321	Efecto mediano
Jul-24	490	0.134	1.96	0.5532	No se rechaza Ho	0.0170	Sin efecto
Aug-24	217	-3.710	1.96	0.0001	Se rechaza Ho	0.4711	Efecto mediano
Sep-24	300	-2.225	1.96	0.0130	Se rechaza Ho	0.287 3	Efecto pequeño

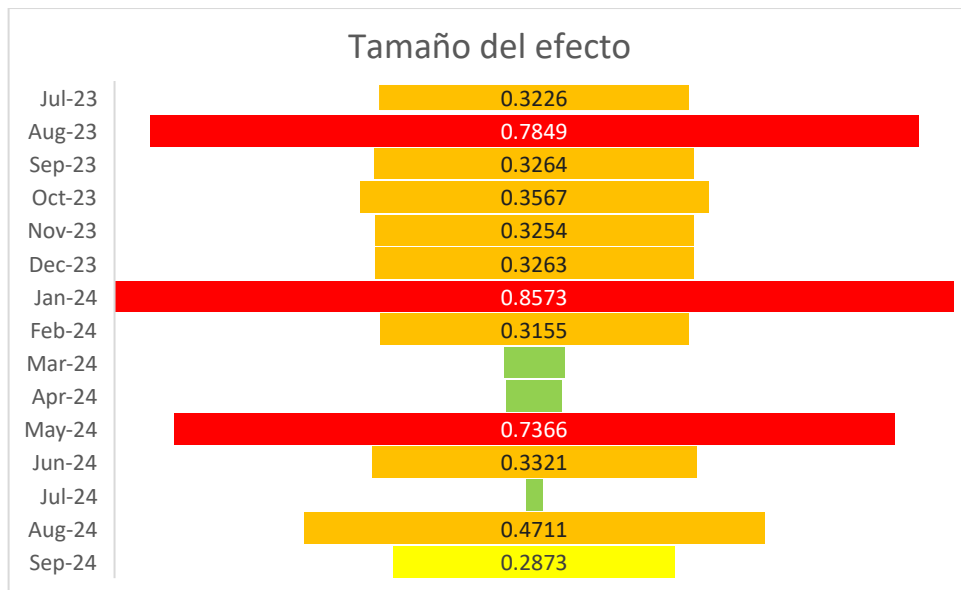


Figura 5.18 Tamaño del efecto mensual de la Prueba U de Mann-Whitney

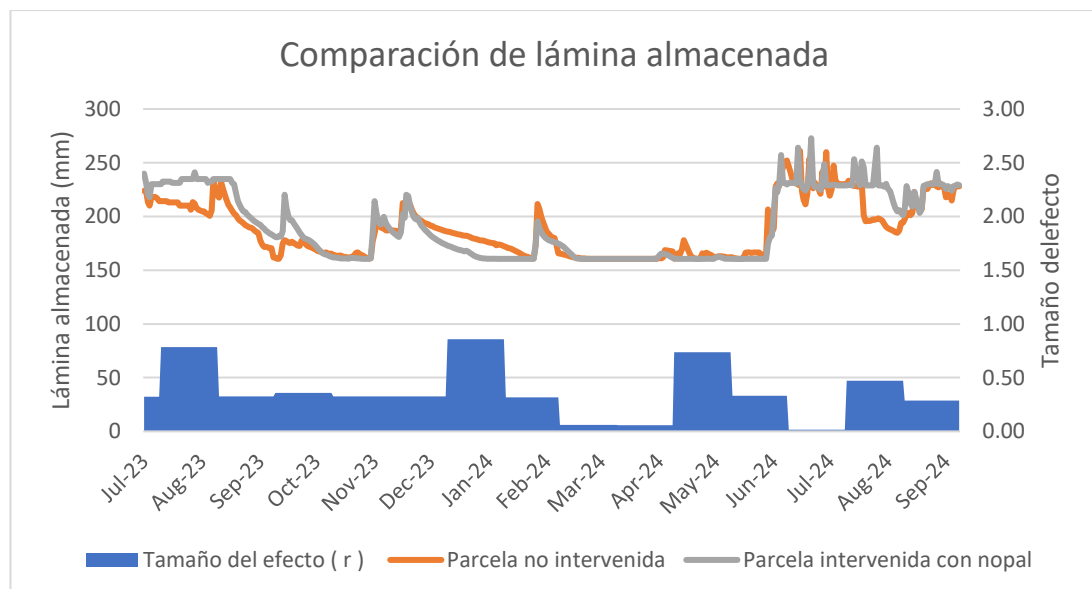


Figura 5.19 Tamaño del efecto mensual de la Prueba U de Mann-Whitney comparado con la lámina almacenada en la parcela intervenida y no intervenida con plantaciones de nopal

El análisis de los resultados muestra que existen diferencias en las láminas almacenadas, siendo más notorias en los meses de agosto. En este mes, la parcela intervenida con nopal presenta mayores láminas almacenadas, lo que coincide con la temporada de lluvias. Este fenómeno podría explicarse por la presencia de cajetes alrededor de la base de la planta de nopal, los cuales ayudan a retener el agua.



Figura 5.20 Vista de los cajetes de la base de la planta de nopal

Por otro lado, en los meses de enero y mayo, la parcela no intervenida mostró mayores almacenamientos de láminas. Estos aumentos se corresponden con episodios aislados de lluvia durante el periodo de estiaje, lo que sugiere que los pastizales naturales son más eficientes en la retención de humedad cuando los niveles de agua en el suelo son bajos.

Este hallazgo respalda lo señalado por Mallqui (2022), quien destaca la importancia de conservar los pastizales naturales debido a su alta eficiencia en la retención de humedad.



Figura 5.21 Vista de los Pastizales naturales de la región

5.4.3 Balance hídrico

El balance hídrico del suelo se realizó a nivel diario, pero para efectos de mostrar los resultados, se acumuló los valores de los principales componentes a nivel mensual.

Tabla 5.8 Componentes del balance hídrico en la parcela intervenida con plantación de nopal

MES	P (mm)	ES (mm)	ET (mm)	$\Delta\theta$ (mm)	μ (mm)
Jul-23	3.2	0.0	19.2	-10.0	-6.0
Aug-23	34.3	0.1	65.2	4.8	-35.8
Sep-23	44.1	7.1	81.8	-25.6	-19.3
Oct-23	27.2	7.2	37.4	-22.9	5.4
Nov-23	33.9	9.0	27.7	-1.6	-1.1
Dec-23	23.6	2.5	37.7	5.9	-22.4
Jan-24	0.7	0.0	48.7	-24.7	-23.2
Feb-24	22.6	0.2	88.2	4.7	-70.4
Mar-24	3.7	0.0	125.7	-6.7	-115.4
Apr-24	18.4	0.4	120.7	-1.2	-101.5
May-24	34.4	2.9	129.7	-0.7	-97.5
Jun-24	167.5	21.9	89.9	19.9	35.7
Jul-24	94.4	12.4	74.2	52.0	-44.3
Aug-24	152.8	20.5	75.9	-4.3	60.8
Sep-24	139.8	10.5	58.4	-4.2	75.1

Tabla 5.9 Evaluación de la discrepancia del balance hídrico en la parcela intervenida con plantación de nopal

Pmedida	Pt	Error cuadrado
3.2	9.2	36.6
34.3	70.1	1283.7
44.1	63.4	373.0
27.2	21.8	29.1
33.9	35.0	1.2
23.6	46.0	503.5
0.7	24.0	539.9
22.6	93.1	4962.9
3.7	119.1	13311.5
18.4	119.8	10300.7
34.4	131.9	9513.9
167.5	131.7	1277.1
94.4	138.6	1961.0
152.8	92.0	3693.6
139.8	64.7	5642.2
suma error ²		3562.0
RMSE		59.7
STDEV		54.6
RSR		1.1
PBIAS		-45.0

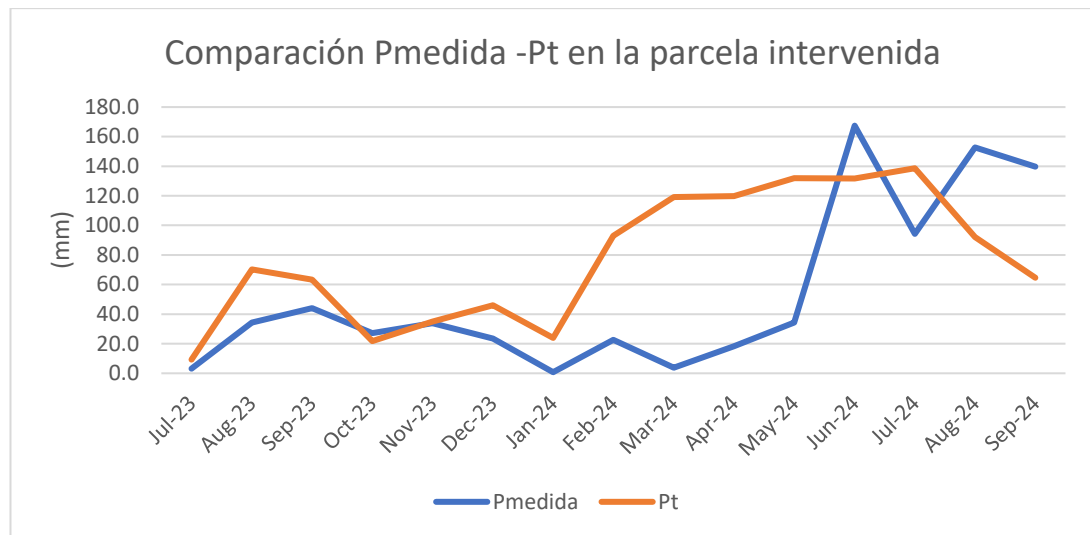


Figura 5.22 Comparación gráfica de la Pmedida y la Pt (simulada) en la parcela intervenida con nopal.

Tabla 5.10 Componentes del balance hídrico en la parcela NO intervenida con plantación de nopal

MES	P (mm)	ES (mm)	ET (mm)	$\Delta\theta$ (mm)	μ (mm)
Jul-23	3.2	0.0	26.9	-9.4	-14.3
Aug-23	34.3	5.3	91.3	-6.2	-56.1
Sep-23	44.1	3.9	114.6	-17.8	-56.6
Oct-23	27.2	4.3	52.4	-23.9	-5.6
Nov-23	33.9	5.9	38.7	9.0	-19.7
Dec-23	23.6	1.5	52.7	16.3	-46.9
Jan-24	0.7	0.0	68.2	-15.5	-51.9
Feb-24	22.6	1.1	123.4	-4.1	-97.8
Mar-24	3.7	0.0	176.0	-13.6	-158.7
Apr-24	18.4	0.0	169.0	0.4	-151.0
May-24	34.4	1.7	181.6	2.3	-151.3
Jun-24	167.5	30.8	125.9	21.2	-10.5
Jul-24	94.4	15.4	103.8	46.7	-71.6
Aug-24	152.8	17.2	106.3	-28.5	57.8
Sep-24	139.8	14.3	81.8	15.7	28.0

Tabla 5.11 Evaluación de la discrepancia del balance hídrico en la parcela NO intervenida con plantación de nopal

Pmedida	Pt	Error cuadrado
3.2	17.5	203.2
34.3	90.4	3148.2
44.1	100.7	3204.8
27.2	32.8	31.6
33.9	53.6	388.7
23.6	70.5	2204.0
0.7	52.7	2697.9
22.6	120.4	9570.5
3.7	162.4	25181.5
18.4	169.4	22801.6
34.4	185.6	22888.8
167.5	177.9	109.3
94.4	166.0	5126.5
152.8	95.0	3343.9
139.8	111.8	785.1
suma error ²		6779.0
RMSE		82.3
STDEV		54.6
RSR		1.5
PBIAS		-100.7

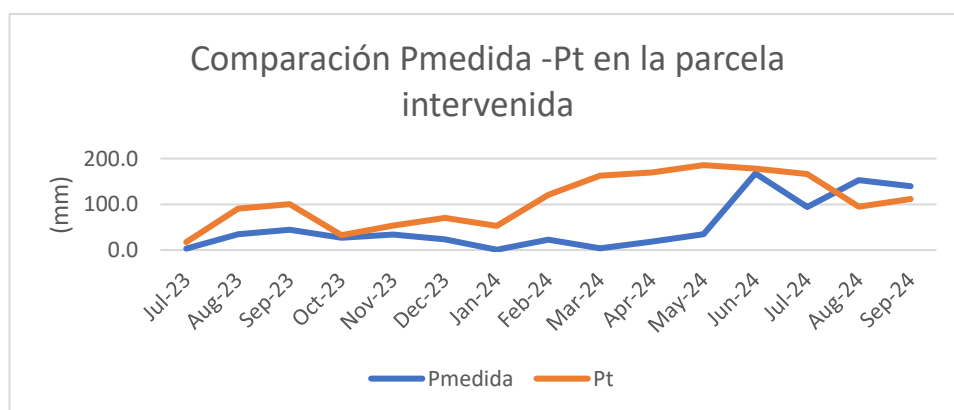


Figura 5.23 Comparación gráfica de la Pmedida y la Pt (simulada) en la parcela No intervenida con nopal.

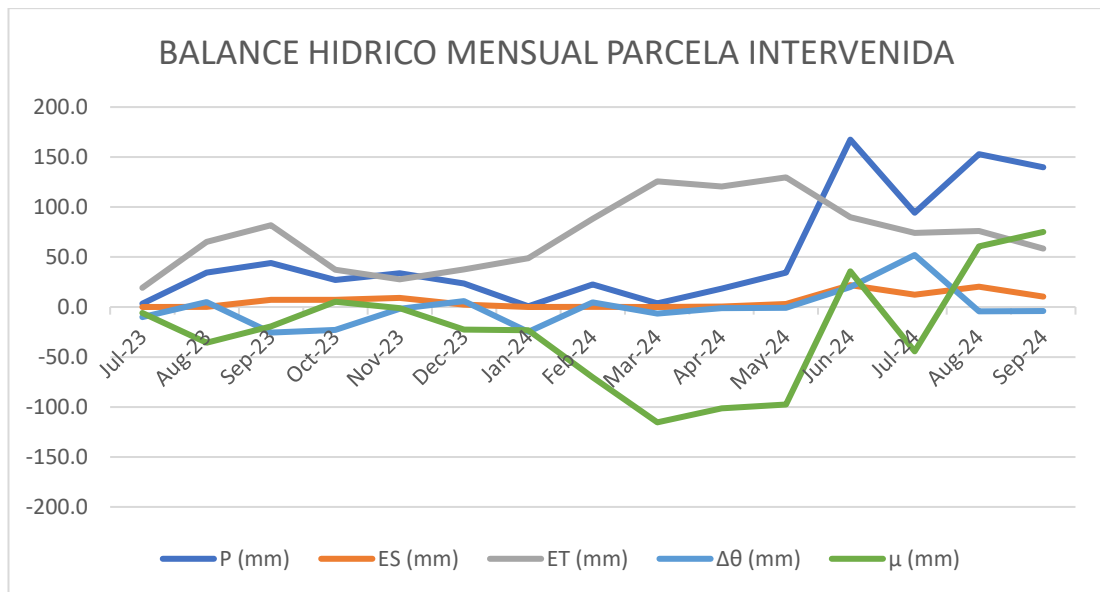


Figura 5.24 Climodiagrama de la parcela intervenida con plantaciones de nopal donde P, precipitación; ES, Escorrentía superficial; ET, Evapotranspiración; $\Delta\theta$, Cambio de almacenamiento de suelo; μ , discrepancia del modelo.

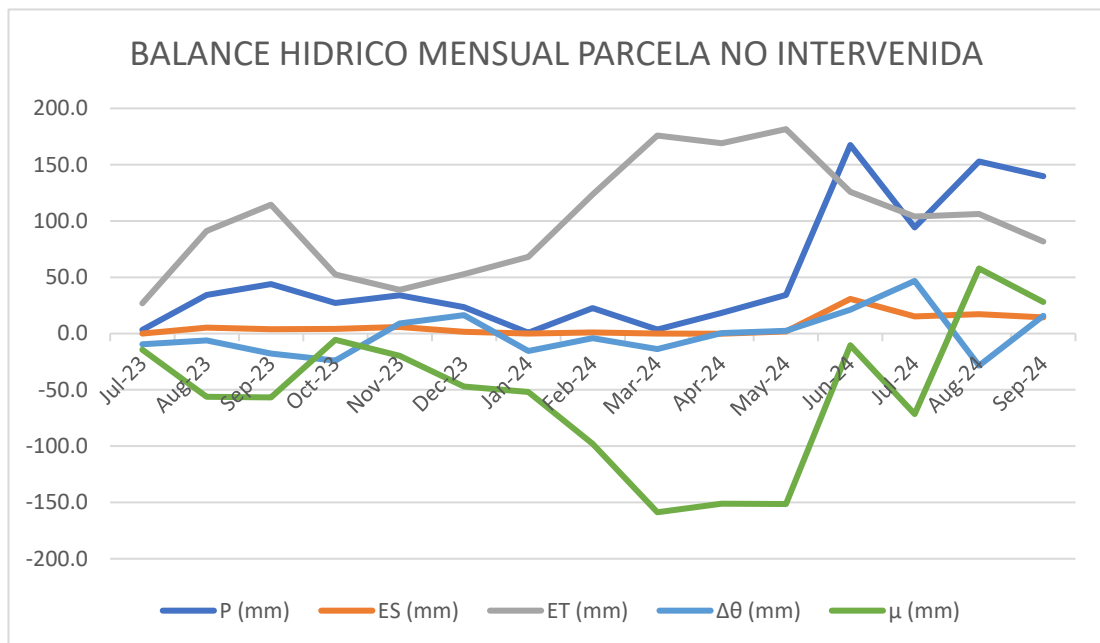


Figura 5.25 Diagrama de la parcela NO intervenida con plantaciones de nopal donde P, precipitación; ES, Escorrentía superficial; ET, Evapotranspiración; $\Delta\theta$, Cambio de almacenamiento de suelo; μ discrepancia del modelo.

Los resultados de la evaluación de la discrepancia del modelo de balance hídrico entre la parcela intervenida con plantaciones de nopal y la no intervenida indican que el modelo “no es satisfactorio”, según la clasificación de Moriasi et al. (2007), que se presenta en la tabla 5.2. Esta falta de precisión

puede atribuirse, en parte, a la complejidad de los sistemas naturales, las limitaciones de los instrumentos de medición y, posiblemente, a los componentes limitados del balance hídrico considerados en el modelo.

Por ejemplo, durante los meses de la temporada lluviosa se observa una discrepancia significativa en el modelo, lo que podría deberse a la falta de consideración del flujo subsuperficial, el cual podría aportar flujos adicionales al modelo. Esto se evidenció en el capítulo 3 (Figura 3.11), donde el modelo hidrológico de la subcuenca muestra la existencia de importantes flujos laterales. Asimismo, en los meses de estiaje, se registran discrepancias notables, lo que podría estar relacionado con la capacidad limitada de los sensores de humedad Watermark, que miden la tensión de humedad del suelo en un rango de 0 a 200 centibares. Según la curva de retención de humedad del suelo, el punto de marchitez permanente se alcanza a una tensión de aproximadamente 1,519.88 centibares, lo que indica que el rango de medición de los sensores es insuficiente para capturar adecuadamente las salidas de humedad de la lámina almacenada.

Entre los aspectos destacados de la comparativa de los diagramas de balance hídrico para ambas situaciones, se observa que el nopal podría reducir las salidas por evapotranspiración en el balance hídrico. Además, podría incrementar la percolación durante la temporada de lluvias, lo que potencialmente aportaría beneficios ecosistémicos, al mejorar la infiltración del agua y la disponibilidad hídrica en el suelo.

5.5 Conclusión

Durante la temporada de lluvias, la parcela intervenida con nopal retuvo más humedad en el suelo. En cambio, durante la época de estiaje, la parcela de pastizal natural mostró una mayor capacidad de almacenamiento de agua.

5.6 Recomendaciones

- El establecimiento de plantaciones de nopal en pastizales naturales degradados podría tener un efecto beneficioso al aumentar los aportes de agua gravitacional al subsuelo, lo que potencialmente podría contribuir a la recarga de los acuíferos.

- Podría reducir las salidas de agua del sistema durante las épocas de estiaje, debido a su alta capacidad de almacenar agua en sus tejidos. Este atributo también sería beneficioso como fuente de agua y alimento para la fauna silvestre.
- Es fundamental promover entre los ejidatarios la reforestación con nopal como parte de un proyecto que no solo les permita generar ingresos para sus familias, sino que también sea sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Asimismo, es importante destacar el papel crucial de los pastizales naturales en la retención de humedad del suelo, por lo que se debe garantizar su protección frente al sobrepastoreo, permitiendo su regeneración natural en conjunto con las plantaciones de nopal.
- Los resultados de este estudio no se pueden generalizar, ya que obedecen a condiciones locales, por eso hace falta evaluaciones similares en otras áreas con condiciones distintas, con sensores de mayor precisión y más sitios que permitan conocer con mayor detalle el comportamiento de las variables analizadas de acuerdo con la variabilidad espaciotemporal de las propiedades físicas del suelo, la vegetación y el clima.

5.7 Literatura citada

- Aguilar, R; Ortega, A. (2017). Análisis de la dinámica del agua en la zona no saturada en un suelo sujeto a prácticas de conservación: implicaciones en la gestión de acuíferos y adaptación al cambio climático. Revista mexicana de ciencias geológicas, 34(2), 91- 104. Consultado 24 mar. 2023. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742017000200091&lng=es&tlng=es.
- Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos - FAO Riego y drenaje Boletín 56. FAO. Roma. ISBN 92-5-304219-2.
- Chow, VT; Maidment, D; Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Santa Fe de Bogotá, Colombia. Mc GrawHill. 584 p.

- Farfán, R; Farfán, E. (2012). Producción de pasturas cultivadas y manejo de pastos naturales altoandino. Convenio INIA – Gobierno Regional de Moquegua. p. 191-199.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (1978). Effective rainfall in irrigated agricultura. Project coordinator Indian agricultural research institute New Delhi. ISBN 92-5-100272-X. Disponible en <https://www.fao.org/3/X5560E/X5560E00.htm#Contents>
- Herweg, K; Ludi, E. (1999). The performance of selected soil and water conservation measures case studies from Ethiopia and Eritrea. CATENA. 36(1): p. 99-114.
- Infante, S. y Zarate, L. (2001). Métodos estadísticos. Trillas México.
- Inglese Paolo, Mondragon Candelario, Nefzaoui Ali, Saenz Carmen, Taguchi Makiko, Makkar Harinder, Louhaichi Mounir. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Kuromiya, A. (2006). Salir adelante, Conflicto, armonía y la práctica local del progreso en Santo Tomás Apipilhuasco, Estado de México. 2023, abril 6, de Universidad Iberoamericana. Sitio web: <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/014743/014743.pdf>
- Locatelli B; Homberger, JM; Ochoa-Tocachi, BF; Bonnesoeur, V; Román, F; Drenkhan, F; Buytaert, W. (2020). Impactos de las zanjas de infiltración en el agua y los suelos de los Andes: ¿Qué sabemos? Resumen de políticas, Proyecto “Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica”. Forest Trends, Lima, Perú.
- Mallqui, H. (2022). Variación estacional del contenido de agua en el suelo en ecosistemas de pajonal natural e intervenido, Huaraz, Áncash. 2023, abril 6, de Universidad Nacional Agraria La Molina Lima Perú. Sitio web: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5495>
- Manis, Esteban & Rosa, Raúl & Denegri, Gerardo & Gaspari, Fernanda. (2024). Estimación del coeficiente de cultivo Kc para los cultivos de invierno y pastizales en la cuenca alta del río Sauce Chico de la

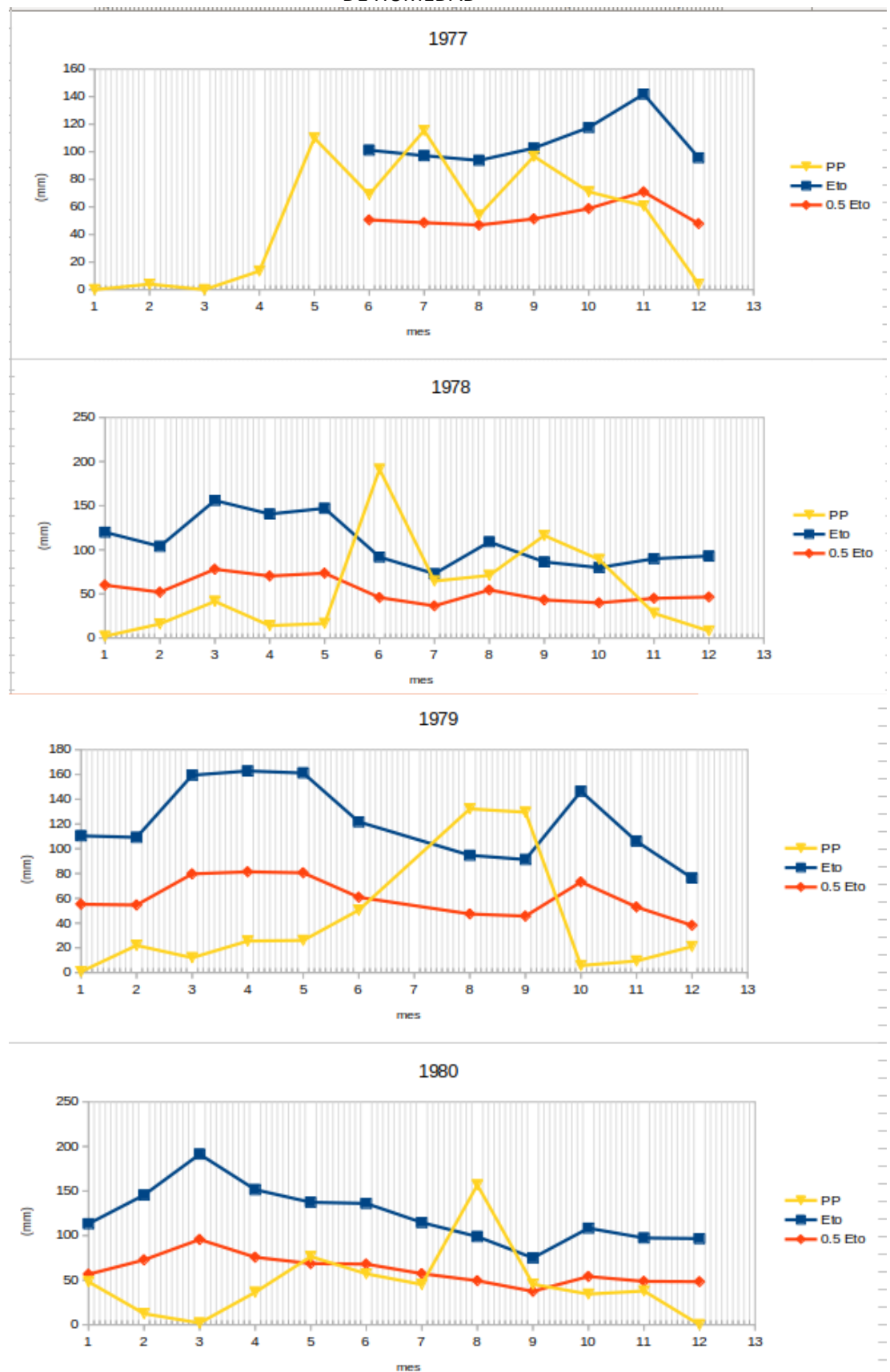
Provincia de Buenos Aires a partir de sensores remotos. Revista de la Facultad de Agronomía. 123. 136. 10.24215/16699513e136.

- Martínez E.R., & Aguilera C.M. (1996). Relaciones agua, suelo, planta, atmósfera (4th ed.). Texcoco, Estado de México, México: Universidad Autónoma Chapingo. <https://doi.org/9688843687>.
- Martínez, F; Sosa, F; Ortiz, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la cuenca La Esperanza. Tecnología y ciencias del agua, 1(4), 89-103. Consultado 25 de mar. 2023. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000400005&lng=es&tlng=es.
- Moriasi, D; Arnold, J; Van Liew, M; Bingner, R; Harmel, R.D; Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE. 50. 10.13031/2013.23153.
- Palacios M.I., Alonso A.R., Cal V.Y., Fernandez X.F. Gómez G.L., López R.P., Rodríguez R.Y., Varela P. J. (2019). Diccionario electrónico de enseñanza y aprendizaje de lenguas. ISBN 978-84-09-10971-5.
- Pizarro, R; Flores, JP; Sangüesa, C; Martínez, E; León, L. (2008). Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile. Bosque (Valdivia). 29(2): p. 136-145.
- Thornthwaite, CW; Mather, JR. (1955). The water balance. Publications in Climatology. New Jersey, Drexel Institute of Technology
- Tomczak, M; Tomczak, E. 2014. The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size
- Van Genuchten, M; Simunek, J; Leij, F; Sejna, M. (2009). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, [en línea], no. RECT versión 6.2, Inst. US Salinity Laboratory, USDA, ARS., SEPA, Riverside, California, USA, Disponible en: <http://www.hydrus3d.com>.

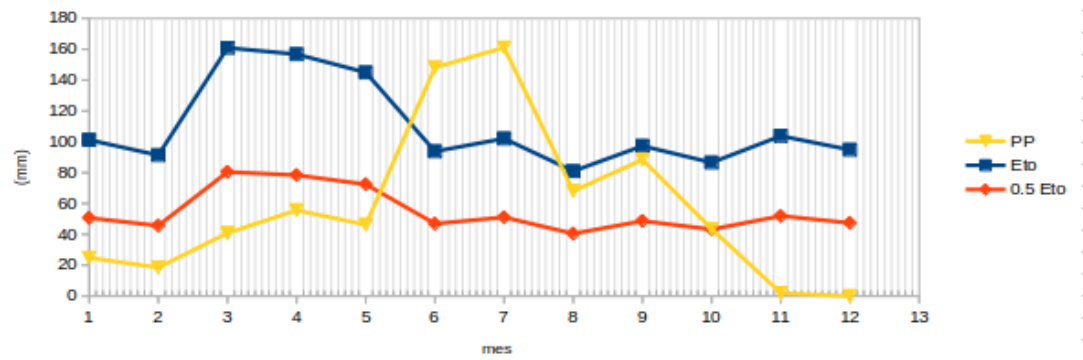
- Vásquez, A; Vásquez, I; Vásquez, C; Cañamero, M. (2017). Fundamentos de la ingeniería de riegos. Universidad Nacional Agraria la Molina. Perú.

ANEXO 1

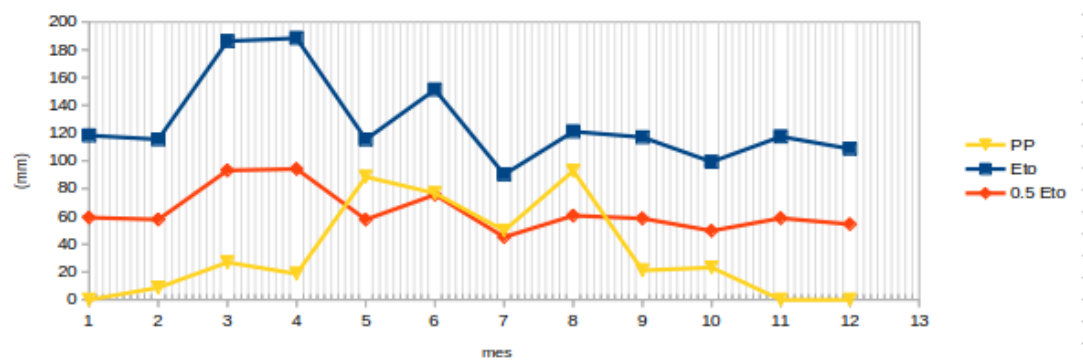
- DETERMINACIÓN GRÁFICA DE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO POR DISPONIBILIDAD DE HUMEDAD



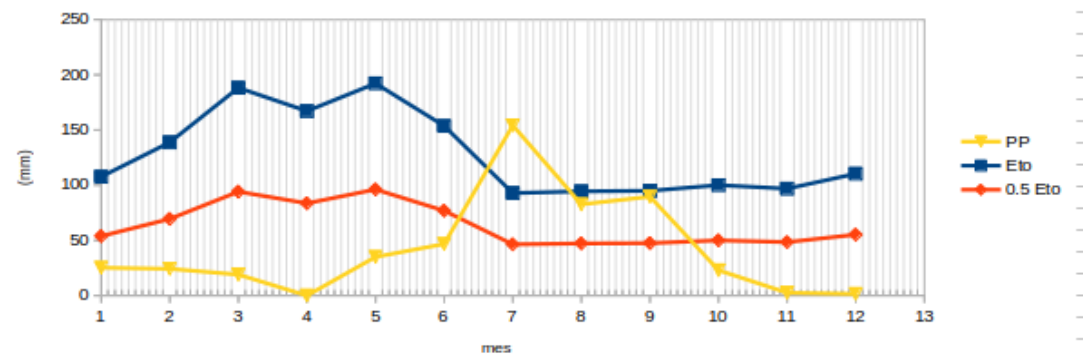
1981



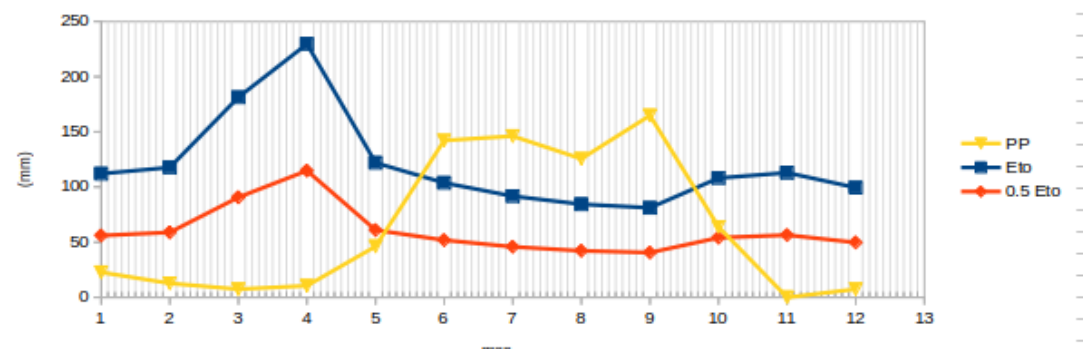
1982

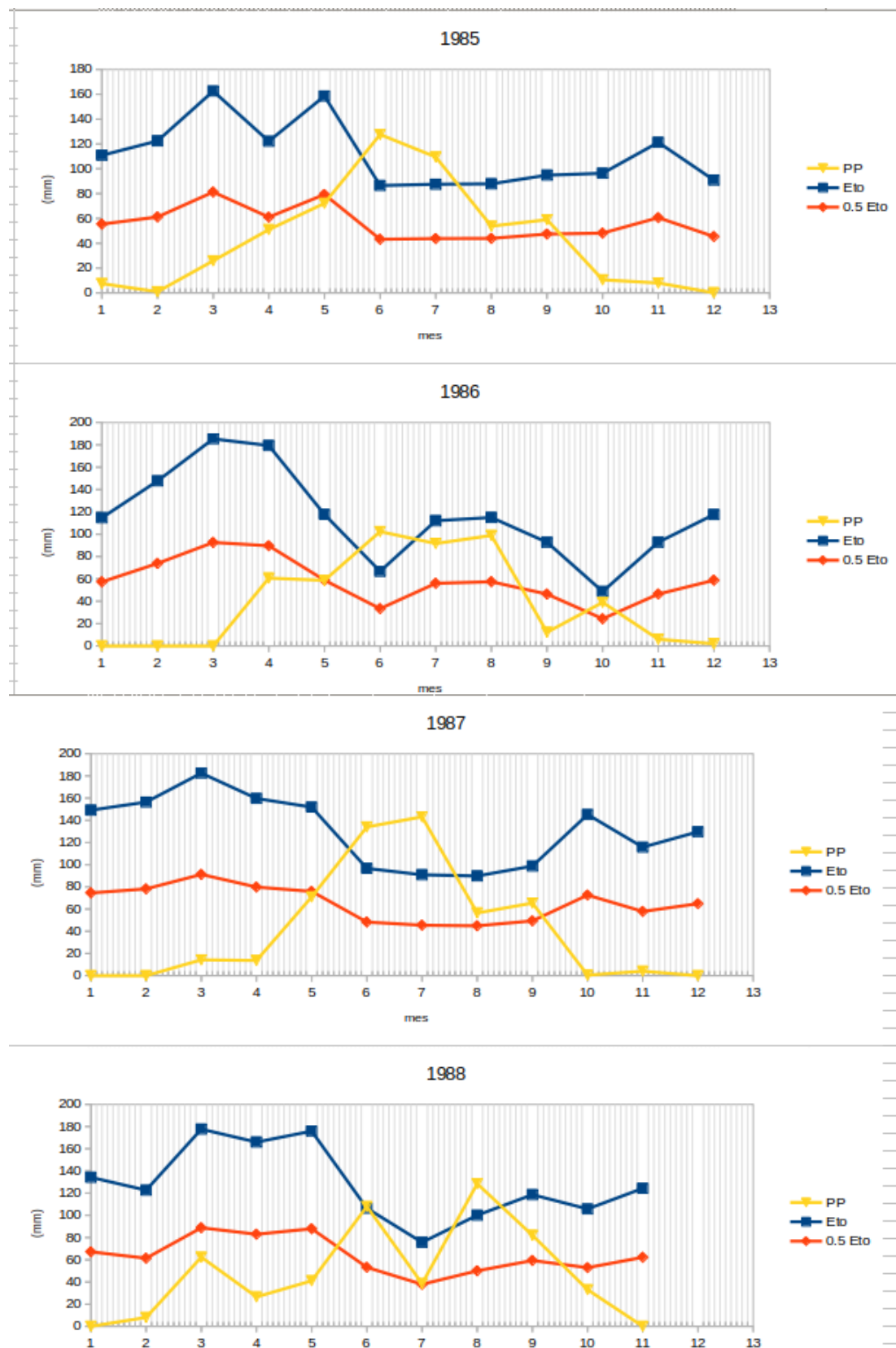


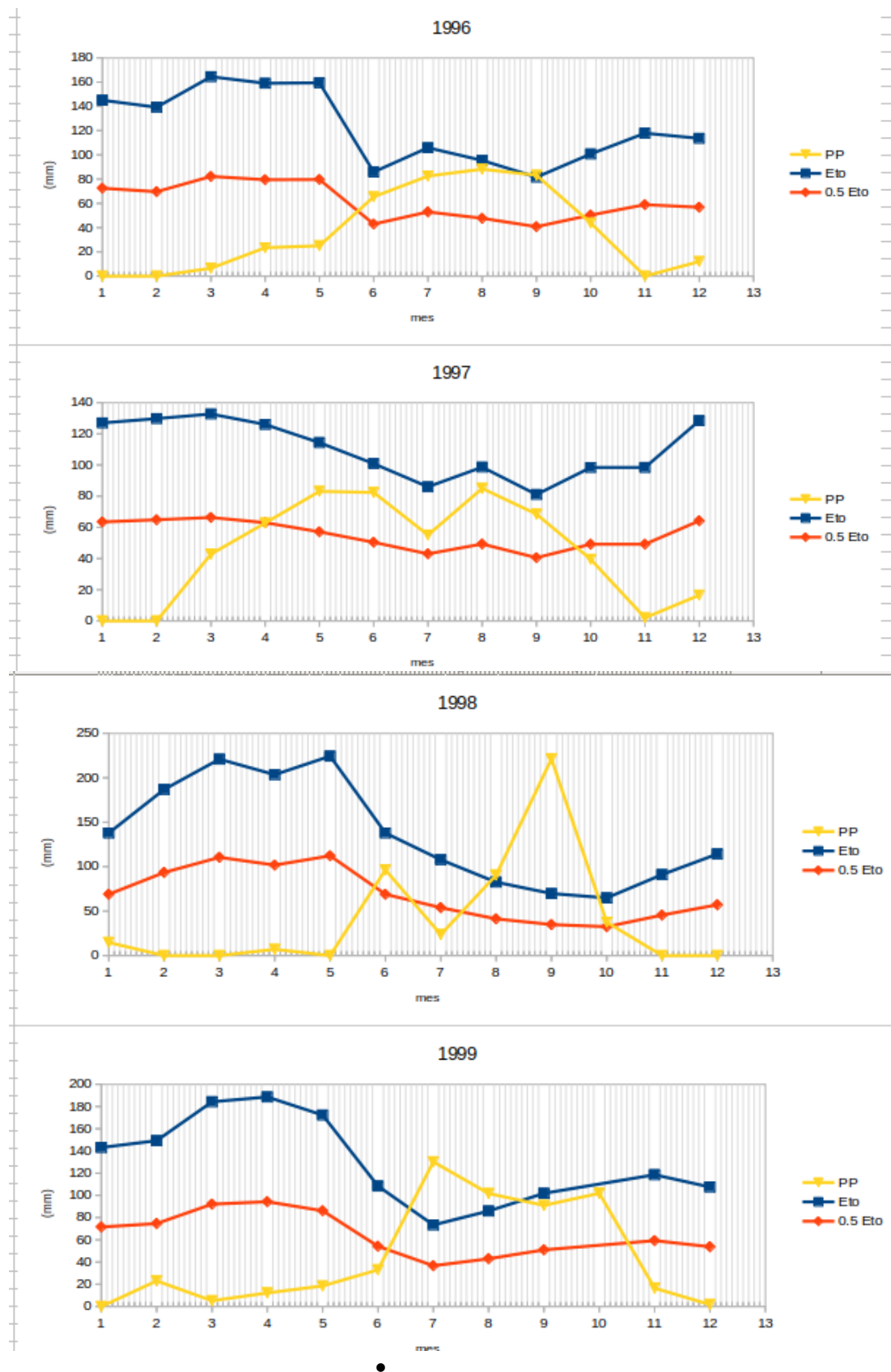
1983

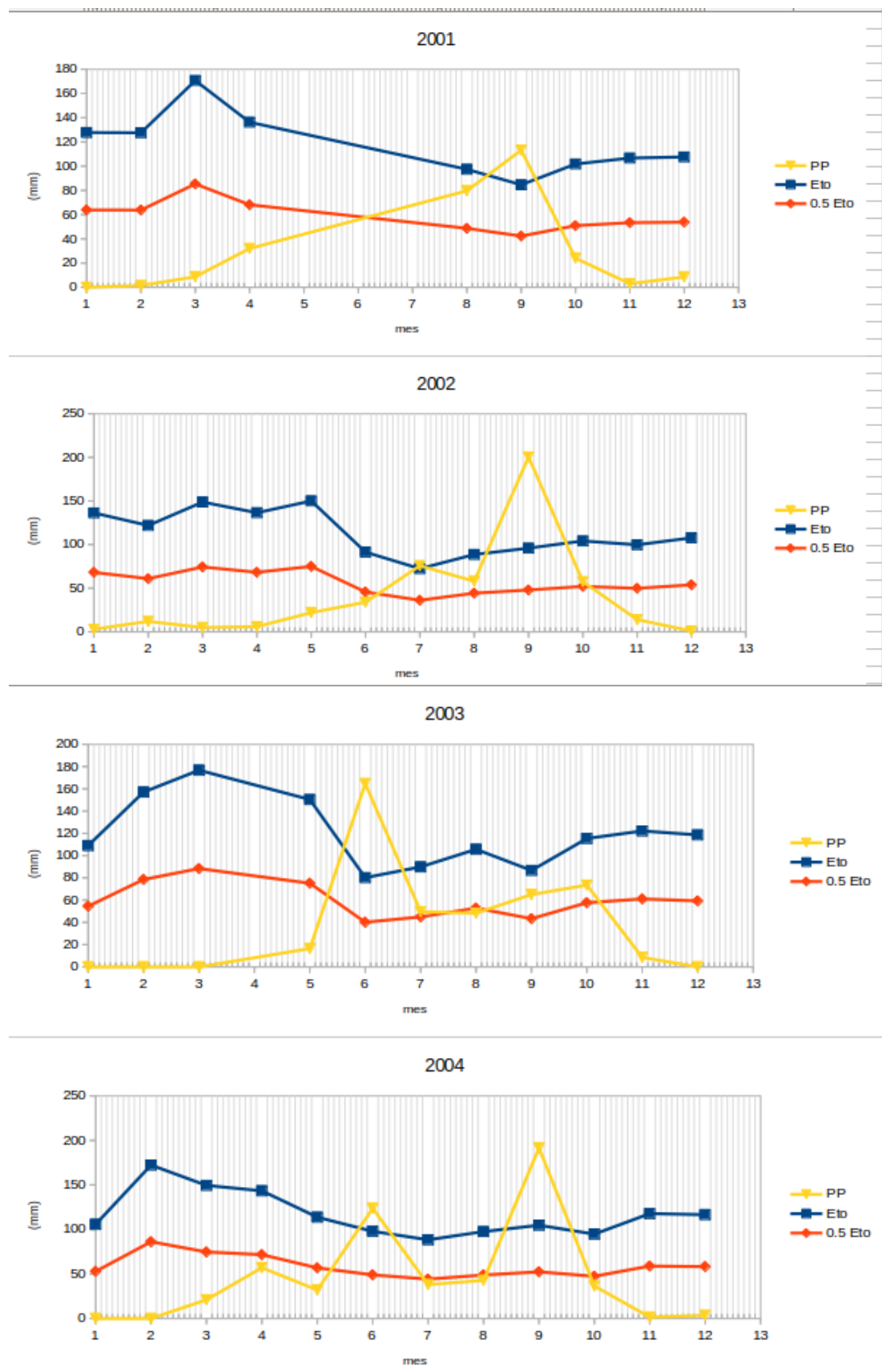


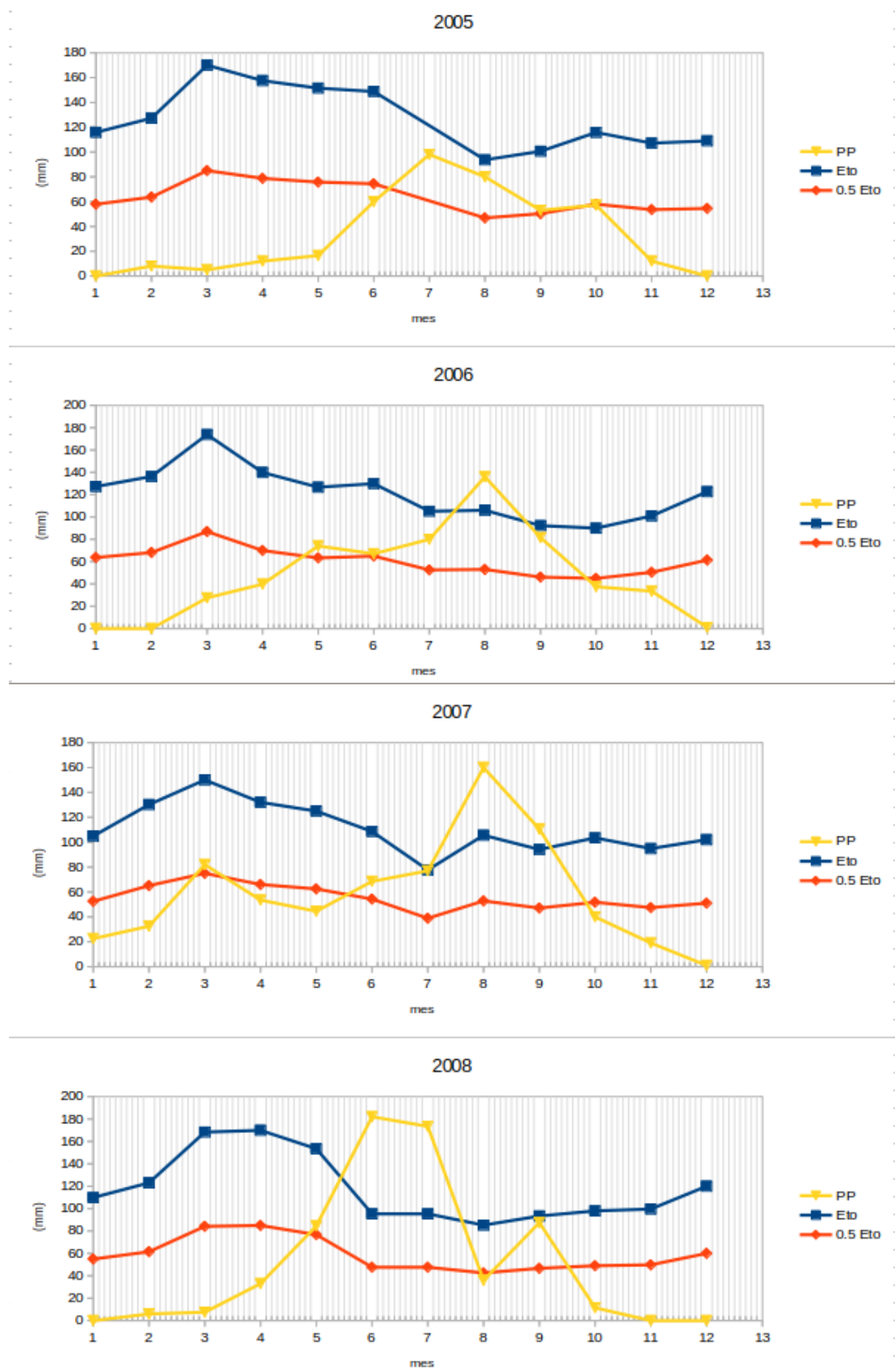
1984

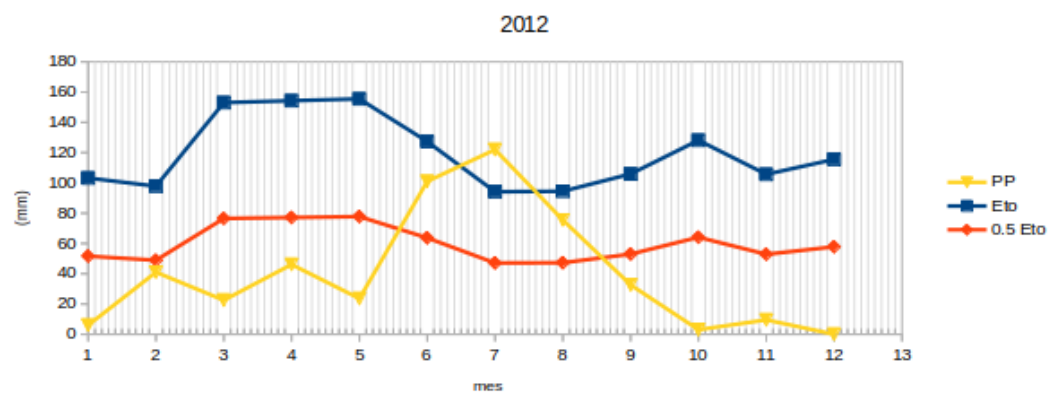
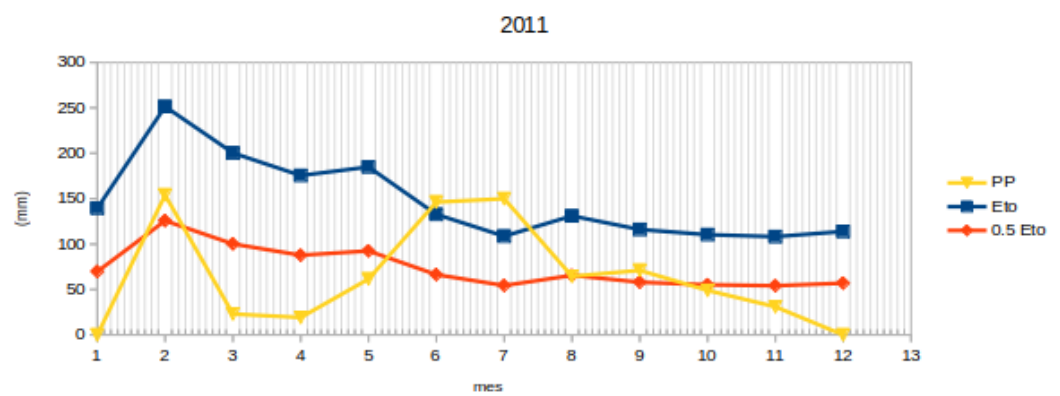
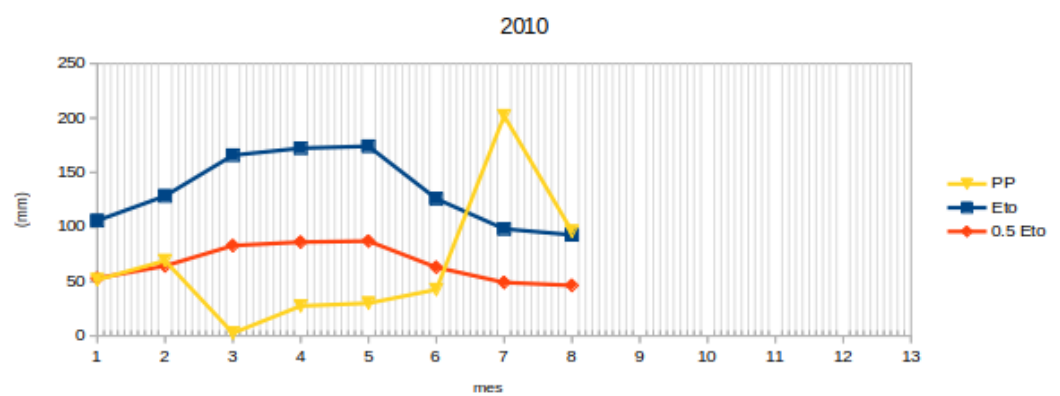
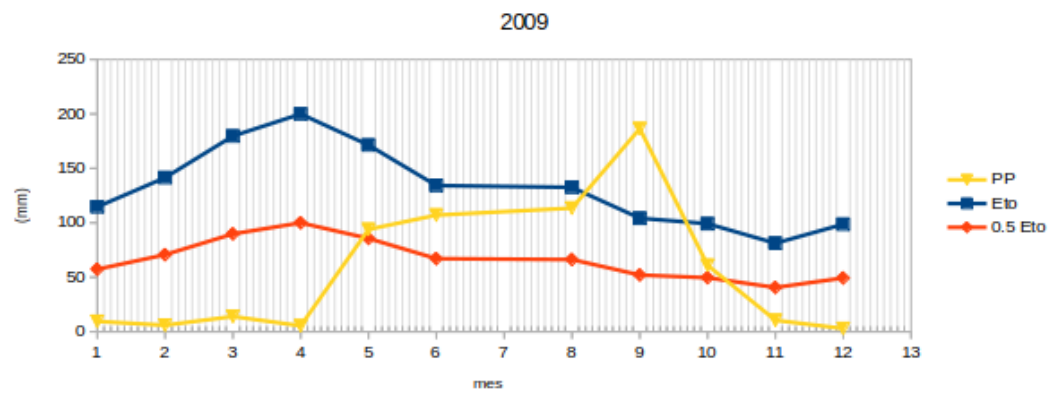


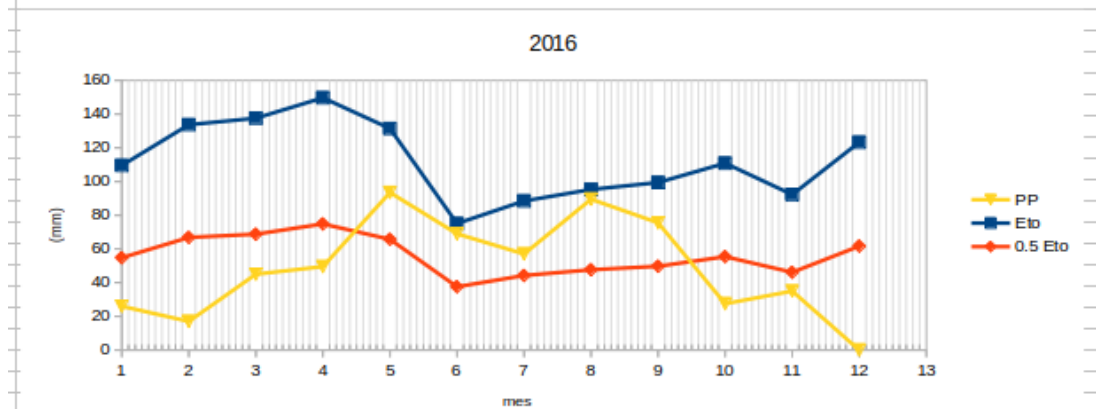
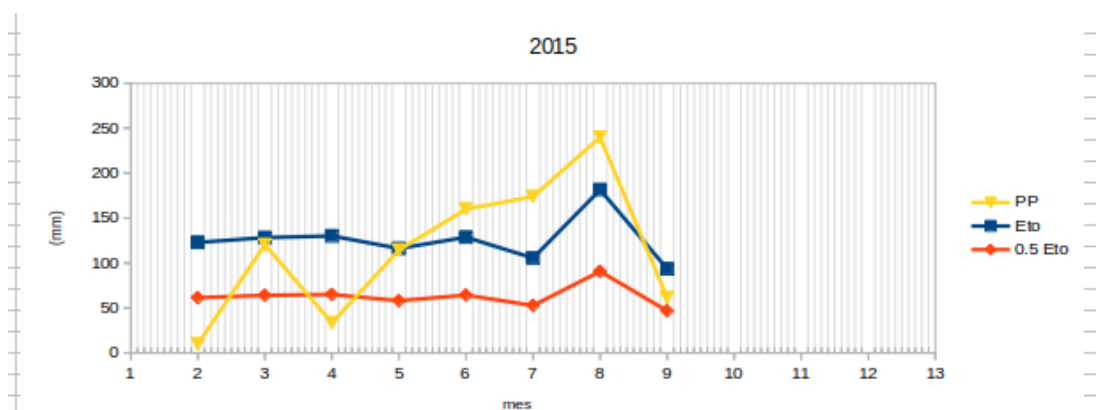
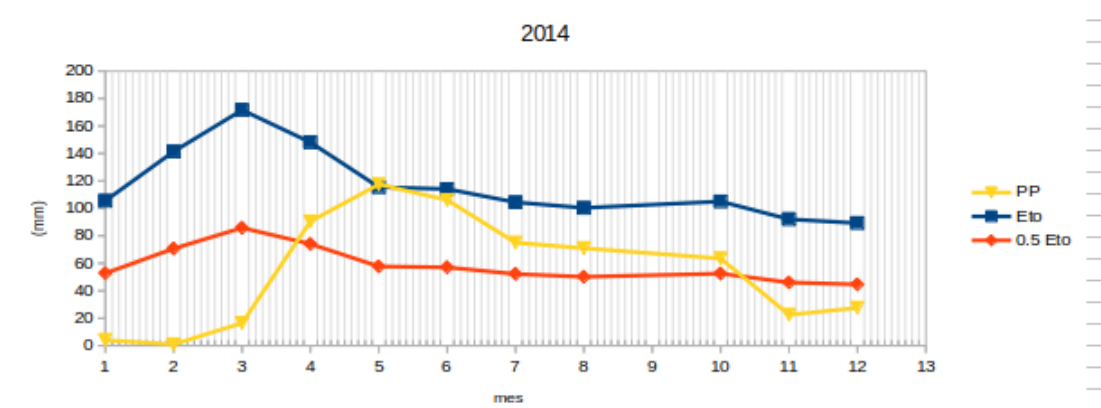
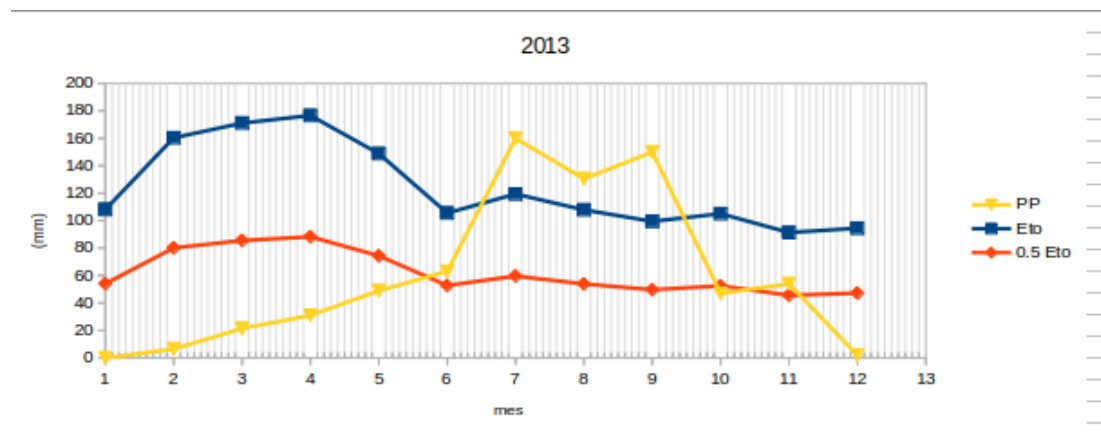












Cuadro 1 Estación de crecimiento probabilística por disponibilidad de humedad probabilística

año	a (fecha)	b (fecha)	c (fecha)	d (fecha)	a	xi	z	F(z)
1977	-	-	07/12/77	10/18/77	-	-		
1978	05/09/78	05/18/78	10/03/78	10/24/78	129	83	- 2.32	0.0102
1979	06/06/79	07/09/79	09/06/79	09/18/79	157	91	- 1.93	0.0270
1980	04/24/80	07/15/80	08/18/80	09/09/80	115	102	- 1.39	0.0825
1981	05/06/81	05/27/81	07/24/81	10/01/81	126	109	- 1.05	0.1478
1982	04/21/82	-	-	08/15/82	111	111	- 0.95	0.1715
1983	06/06/83	06/21/83	09/01/83	09/21/83	157	111	- 0.95	0.1715
1984	05/06/84	05/21/84	09/21/84	10/03/84	127	115	- 0.75	0.2259
1985	05/03/85	05/21/85	07/12/85	09/06/85	123	117	- 0.65	0.2563
1986	05/01/86	05/18/86	06/21/86	09/24/86	121	118	- 0.61	0.2723
1987	05/03/87	05/21/87	07/21/87	09/06/87	123	121	- 0.46	0.3231
1988	05/15/88	07/21/88	08/15/88	09/18/88	136	123	- 0.36	0.3590
1996	05/21/96	-	-	09/27/96	142	123	- 0.36	0.3590
1997	04/01/97	-	-	09/24/97	91	126	- 0.21	0.4151
1998	05/27/98	08/01/98	09/24/98	10/01/98	147	127	- 0.17	0.4342
1999	06/06/99	06/18/99	08/21/99	10/18/99	157	129	- 0.07	0.4730
2001	06/03/01	08/12/01	09/09/01	09/21/01	154	129	- 0.07	0.4730
2002	06/09/02	08/09/02	09/21/02	10/01/02	160	129	- 0.07	0.4730
2003	05/09/03	05/15/03	06/18/03	10/03/03	129	130	- 0.02	0.4924
2004	05/09/04	08/12/04	09/21/04	09/27/04	130	135	- 0.23	0.5892
2005	06/09/05	-	-	10/01/05	160	136	- 0.27	0.6081
2006	04/21/06	07/15/06	08/18/06	09/24/06	111	142	- 0.57	0.7150
2007	05/15/07	07/01/07	09/06/07	09/24/07	135	142	- 0.57	0.7150
2008	04/27/08	05/15/08	07/18/08	09/15/08	118	144	- 0.67	0.7472
2009	04/27/09	08/06/09	09/21/09	10/06/09	117	147	- 0.81	0.7917
2010	06/06/10	06/15/10	08/01/10	-	157	154	- 1.15	0.8759
2011	05/09/11	05/27/11	07/12/11	09/18/11	129	157	- 1.30	0.9035
2012	05/21/12	06/18/12	07/21/12	08/21/12	142	157	- 1.30	0.9035
2013	05/24/13	06/21/13	09/18/13	11/06/13	144	157	- 1.30	0.9035
2014	03/24/14	-	-	10/09/14	83	157	- 1.30	0.9035
2015	04/12/15	05/01/15	08/15/15	-	102	160	- 1.45	0.9262
2016	04/18/16	-	-	09/18/16	109	160	- 1.45	0.9262
					x media	130.39		
					desv	20.45		

b	xi	z	F(z)	c	xi	z	F(z)	d	xi	z	F(z)
-	-	-	-	193	169	- 1.89	0.7884	291	227	- 2.44	0.9927
138	121	- 1.55	0.0469	276	172	- 1.79	0.7827	297	234	- 2.03	0.9789
190	135	- 1.13	0.1011	249	193	- 1.13	0.7073	261	249	- 1.15	0.8743
197	136	- 1.10	0.1062	231	193	- 1.13	0.7073	253	249	- 1.15	0.8743
147	138	- 1.04	0.1169	205	193	- 1.13	0.7073	274	253	- 0.91	0.8190
-	138	- 1.04	0.1169	-	200	- 0.91	0.6646	227	259	- 0.56	0.7115
172	141	- 0.95	0.1343	244	202	- 0.84	0.6507	264	261	- 0.44	0.6700
142	141	- 0.95	0.1343	265	203	- 0.81	0.6434	277	261	- 0.44	0.6700
141	142	- 0.92	0.1404	193	205	- 0.75	0.6284	249	262	- 0.38	0.6484
138	147	- 0.76	0.1737	172	213	- 0.50	0.5611	267	262	- 0.38	0.6484
141	147	- 0.76	0.1737	202	227	- 0.06	0.4243	249	264	- 0.26	0.6038
203	166	- 0.19	0.3326	228	228	- 0.02	0.4141	262	264	- 0.26	0.6038
-	169	- 0.10	0.3607	-	230	- 0.04	0.3937	271	267	- 0.09	0.5344
-	170	- 0.07	0.3702	-	231	- 0.07	0.3835	267	267	- 0.09	0.5344
213	172	- 0.00	0.3891	267	233	- 0.13	0.3631	274	267	- 0.09	0.5344
169	172	- 0.00	0.3891	233	244	- 0.48	0.2563	291	267	- 0.09	0.5344
224	182	- 0.30	0.4824	252	249	- 0.64	0.2126	264	271	- 0.15	0.4407
221	190	- 0.54	0.5517	264	249	- 0.64	0.2126	274	271	- 0.15	0.4407
135	196	- 0.72	0.5981	169	252	- 0.73	0.1883	276	274	- 0.33	0.3722
225	197	- 0.75	0.6053	265	261	- 1.02	0.1256	271	274	- 0.33	0.3722
-	203	- 0.94	0.6450	-	264	- 1.11	0.1082	274	274	- 0.33	0.3722
196	213	- 1.24	0.6974	230	264	- 1.11	0.1082	267	274	- 0.33	0.3722
182	218	- 1.39	0.7173	249	265	- 1.14	0.1028	267	276	- 0.44	0.3286
136	221	- 1.48	0.7274	200	265	- 1.14	0.1028	259	277	- 0.50	0.3075
218	224	- 1.58	0.7362	264	267	- 1.21	0.0925	279	279	- 0.62	0.2674
166	225	- 1.61	0.7389	213	276	- 1.49	0.0553	-	282	- 0.80	0.2126
147	-	-	-	193	-	-	-	261	291	- 1.33	0.0921
170	-	-	-	203	-	-	-	234	291	- 1.33	0.0921
172	-	-	-	261	-	-	-	310	297	- 1.68	0.0463
-	-	-	-	-	-	-	-	282	310	- 2.45	0.0072
121	-	-	-	227	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	262	-	-	-
x media	172.16			x media	228.77			x media	268.47		
desv	32.91			desv	31.69			desv	16.97		

NP	32
MP	25
Cp	0.78

NP	32
MP	26
Cp	0.81

ANEXO 2

DETERMINACIÓN DEL PERIODO LIBRE DE HELADAS

Cuadro 2 Datos de heladas en Santo Tomás Apipilhuasco

A ñ o	u l t i m a p r i m a v e r a l	p r i m e r o t o ñ a l
1977		12/22/77
1978	03/19/78	
1979	02/28/79	
1980	02/04/80	
1981		11/20/81
1982		
1983	01/25/83	
1984		11/06/84
1985	01/06/85	10/27/85
1986	03/25/86	10/30/86
1987	03/05/87	
1988	01/28/88	09/14/88
1996	03/10/96	11/09/96
1997	02/17/97	12/14/97
1998	02/03/98	
1999		10/24/99
2001	01/20/01	
2002		08/31/02
2003		12/19/03
2004	02/18/04	
2005		
2006	01/11/06	11/22/06
2007	02/20/07	10/25/07
2008	01/30/08	11/23/08
2009	02/05/09	
2010		
2011	01/13/11	11/29/11
2012		
2013	03/03/13	10/11/13
2014	01/18/14	12/17/14
2015		
2016	02/13/16	
2017		

Cuadro 3 Probabilidad de ocurrencia de heladas tardías primaverales

Año	ultima primaveral	dia juliano	xi ordenado	Z	F (Z P)	F (P) = CP (1 - F (Z P))
1977 -		-	6 -	1.57	0.0588	0.5990
1978	03/19/78	78	11 -	1.34	0.0897	0.5793
1979	02/28/79	59	13 -	1.25	0.1049	0.5696
1980	02/04/80	35	18 -	1.03	0.1512	0.5402
1981 -		-	20 -	0.94	0.1730	0.5263
1982 -		-	25 -	0.72	0.2357	0.4864
1983	01/25/83	25	28 -	0.59	0.2787	0.4590
1984 -		-	30 -	0.50	0.3093	0.4395
1985	01/06/85	6	34 -	0.32	0.3746	0.3980
1986	03/25/86	84	35 -	0.28	0.3915	0.3872
1987	03/05/87	64	36 -	0.23	0.4087	0.3763
1988	01/28/88	28	44	0.12	0.5497	0.2865
1996	03/10/96	70	48	0.30	0.6190	0.2424
1997	02/17/97	48	49	0.35	0.6358	0.2317
1998	02/03/98	34	51	0.44	0.6687	0.2108
1999 -		-	59	0.79	0.7859	0.1363
2001	01/20/01	20	62	0.93	0.8227	0.1128
2002 -		-	64	1.01	0.8448	0.0987
2003 -		-	70	1.28	0.9000	0.0637
2004	02/18/04	49	78	1.64	0.9492	0.0323
2005 -		-	84	1.90	0.9716	0.0181
2006	01/11/06	11 -				
2007	02/20/07	51 -				
2008	01/30/08	30 -				
2009	02/05/09	36 -				
2010 -		-	-			
2011	01/13/11	13 -				
2012 -		-	-			
2013	03/03/13	62 -				
2014	01/18/14	18 -				
2015 -		-	-			
2016	02/13/16	44 -				
2017 -		-	-			
NP	3 3	x media	41.19			
MP	2 1	desv est.	22.48			
Cp	0.6 4					

Cuadro 4 Probabilidad de ocurrencia de primeras heladas otoñales

Año	primer otoñal	día juliano	xi ordenado	Z	F(Z P)	F(P) = CP(F(Z P))
1977	12/22/77	356	243 -	2.19	0.0144	0.0091
1978 -	-	-	258 -	1.72	0.0426	0.0271
1979 -	-	-	284 -	0.91	0.1807	0.1150
1980 -	-	-	297 -	0.51	0.3056	0.1945
1981	11/20/81	324	298 -	0.48	0.3166	0.2014
1982 -	-	-	300 -	0.42	0.3390	0.2157
1983 -	-	-	303 -	0.32	0.3738	0.2379
1984	11/06/84	311	311 -	0.07	0.4708	0.2996
1985	10/27/85	300	314	0.02	0.5080	0.3233
1986	10/30/86	303	324	0.33	0.6297	0.4007
1987 -	-	-	326	0.39	0.6529	0.4155
1988	09/14/88	258	328	0.46	0.6756	0.4299
1996	11/09/96	314	333	0.61	0.7294	0.4641
1997	12/14/97	348	348	1.08	0.8593	0.5468
1998 -	-	-	351	1.17	0.8791	0.5594
1999	10/24/99	297	353	1.23	0.8912	0.5671
2001 -	-	-	356	1.33	0.9076	0.5775
2002	08/31/02	243 -	-	-	-	-
2003	12/19/03	353 -	-	-	-	-
2004 -	-	-	-	-	-	-
2005 -	-	-	-	-	-	-
2006	11/22/06	326 -	-	-	-	-
2007	10/25/07	298 -	-	-	-	-
2008	11/23/08	328 -	-	-	-	-
2009 -	-	-	-	-	-	-
2010 -	-	-	-	-	-	-
2011	11/29/11	333 -	-	-	-	-
2012 -	-	-	-	-	-	-
2013	10/11/13	284 -	-	-	-	-
2014	12/17/14	351 -	-	-	-	-
2015 -	-	-	-	-	-	-
2016 -	-	-	-	-	-	-
2017 -	-	-	-	-	-	-
NP	33	x media	313.35	-	-	-
MP	17	desv est.	32.16	-	-	-
Cp	0.52	-	-	-	-	-

ANEXO 3

BALANCE HÍDRICO DIARIO

Cuadro 5 Balance hídrico diario en la parcela no intervenida donde P, precipitación; ES, Escorrentía superficial; ET, Evapotranspiración; $\Delta\theta$, Cambio de almacenamiento de suelo.

FECHA	P (mm)	ES (mm)	ET (mm)	$\Delta\theta$ (mm)
7/23/2023	0.00	0.00		
7/24/2023	1.90	0.00	1.94	-0.02
7/25/2023	1.30	0.00	3.19	-10.67
7/26/2023	0.00	0.00	4.11	-2.95
7/27/2023	0.00	0.00	2.69	8.18
7/28/2023	0.00	0.00	2.68	0.00
7/29/2023	0.00	0.00	3.24	0.00
7/30/2023	0.00	0.00	2.70	-1.51
7/31/2023	0.00	0.00	3.07	-2.46
8/1/2023	0.00	0.00	3.13	0.00
8/2/2023	0.00	0.00	3.26	0.00
8/3/2023	0.00	0.00	2.86	0.00
8/4/2023	0.00	0.00	2.89	0.00
8/5/2023	0.00	0.00	3.00	-1.26
8/6/2023	0.00	0.00	2.94	0.00
8/7/2023	0.00	0.00	3.28	0.00
8/8/2023	0.00	0.00	3.09	0.00
8/9/2023	0.00	0.00	3.17	0.00
8/10/2023	0.00	0.00	2.91	0.00
8/11/2023	0.00	0.00	2.85	-2.95
8/12/2023	0.00	0.00	3.08	0.00
8/13/2023	0.00	0.00	3.07	0.00
8/14/2023	0.00	0.00	3.02	0.00
8/15/2023	0.00	0.00	2.89	0.00
8/16/2023	0.00	0.00	2.68	0.00
8/17/2023	5.20	0.00	2.31	-3.70
8/18/2023	0.30	0.00	2.64	7.10
8/19/2023	0.20	0.00	3.01	-1.52
8/20/2023	0.00	0.00	5.22	-4.32
8/21/2023	5.50	5.30	2.86	-1.26
8/22/2023	4.00	0.00	2.96	-0.83
8/23/2023	0.00	0.00	2.62	-0.75
8/24/2023	0.40	0.00	2.92	0.00
8/25/2023	0.00	0.00	2.62	-1.76
8/26/2023	0.70	0.00	2.64	-0.94
8/27/2023	2.60	0.00	2.49	-1.45

8/28/2023	14.70	0.02	2.74	4.90
8/29/2023	0.00	0.00	2.93	26.98
8/30/2023	0.00	0.00	2.65	-6.36
8/31/2023	0.70	0.00	2.50	-6.03
9/1/2023	11.60	0.06	2.65	-2.46
9/2/2023	0.00	0.00	3.00	14.86
9/3/2023	1.50	0.00	2.66	-6.36
9/4/2023	0.00	0.00	2.89	-6.03
9/5/2023	0.00	0.00	2.92	-4.34
9/6/2023	0.90	0.00	2.77	-4.89
9/7/2023	0.00	0.00	2.87	-2.51
9/8/2023	0.00	0.00	3.02	-3.09
9/9/2023	0.00	0.00	3.08	-2.61
9/10/2023	0.00	0.00	3.13	-1.50
9/11/2023	0.00	0.00	2.92	-3.08
9/12/2023	0.00	0.00	2.93	-1.57
9/13/2023	1.65	0.00	2.98	-1.41
9/14/2023	4.52	0.00	4.18	-1.28
9/15/2023	4.23	0.00	3.76	-1.94
9/16/2023	6.14	0.90	2.96	-1.02
9/17/2023	4.40	1.42	2.58	-0.95
9/18/2023	4.14	1.51	2.26	-0.50
9/19/2023	2.23	0.00	4.21	-0.85
9/20/2023	1.01	0.00	4.92	-1.68
9/21/2023	0.76	0.00	4.87	-1.20
9/22/2023	0.08	0.00	5.37	-1.19
9/23/2023	0.00	0.00	5.76	-6.91
9/24/2023	0.00	0.00	5.91	-3.91
9/25/2023	0.08	0.00	5.55	-1.89
9/26/2023	0.02	0.00	5.48	0.00
9/27/2023	0.00	0.00	4.88	-0.55
9/28/2023	0.19	0.00	5.10	-0.67
9/29/2023	0.22	0.00	4.86	-0.16
9/30/2023	0.38	0.00	4.10	-8.47
10/1/2023	3.28	0.00	4.23	-0.53
10/2/2023	8.40	4.12	3.49	-0.78
10/3/2023	0.00	0.00	3.77	-0.09
10/4/2023	2.00	0.00	3.84	3.33
10/5/2023	10.30	0.16	4.01	11.12
10/6/2023	0.00	0.00	5.03	2.86
10/7/2023	0.00	0.00	3.21	-0.83
10/8/2023	0.00	0.00	2.13	-1.06
10/9/2023	1.70	0.00	1.39	-0.64
10/10/2023	1.20	0.00	3.09	1.26

10/11/2023	0.00	0.00	2.73	-1.40
10/12/2023	0.00	0.00	4.64	-1.20
10/13/2023	0.00	0.00	3.46	-1.08
10/14/2023	0.00	0.00	2.94	-0.30
10/15/2023	0.50	0.00	2.02	4.94
10/16/2023	0.00	0.00	1.90	0.59
10/17/2023	0.00	0.00	4.15	-3.16
10/18/2023	0.00	0.00	4.23	-2.02
10/19/2023	0.00	0.00	4.02	-0.96
10/20/2023	0.00	0.00	3.87	-0.70
10/21/2023	0.00	0.00	4.43	-0.77
10/22/2023	0.00	0.00	4.51	-0.84
10/23/2023	0.00	0.00	3.40	-1.08
10/24/2023	4.00	0.00	3.06	-1.23
10/25/2023	0.00	0.00	0.86	0.53
10/26/2023	1.90	0.00	2.05	-1.68
10/27/2023	0.40	0.00	4.73	-0.42
10/28/2023	0.00	0.00	4.69	0.71
10/29/2023	0.00	0.00	4.61	-0.75
10/30/2023	0.00	0.00	2.85	-0.57
10/31/2023	0.28	0.00	3.31	0.14
11/1/2023	0.18	0.00	3.57	-1.33
11/2/2023	3.40	0.00	1.64	-0.20
11/3/2023	0.12	0.00	3.18	-0.67
11/4/2023	0.60	0.00	4.06	0.45
11/5/2023	0.31	0.00	4.02	-0.05
11/6/2023	0.15	0.00	4.14	-1.13
11/7/2023	0.25	0.00	3.45	0.00
11/8/2023	0.01	0.00	3.60	-0.33
11/9/2023	1.46	0.00	3.12	-0.28
11/10/2023	4.75	0.00	2.69	-0.11
11/11/2023	1.31	0.00	3.54	0.94
11/12/2023	8.62	0.38	2.48	0.37
11/13/2023	7.19	0.65	2.80	3.08
11/14/2023	0.42	0.00	2.33	0.41
11/15/2023	0.28	0.00	3.93	-1.21
11/16/2023	0.00	0.00	3.95	-0.95
11/17/2023	0.00	0.00	4.33	-1.03
11/18/2023	0.00	0.00	4.29	-1.00
11/19/2023	0.00	0.00	4.11	-0.71
11/20/2023	0.00	0.00	3.95	-0.60
11/21/2023	9.50	3.72	2.62	0.31
11/22/2023	18.30	0.32	1.86	15.40
11/23/2023	3.10	1.90	1.63	7.87
11/24/2023	0.00	0.00	3.94	9.07

11/25/2023	0.00	0.00	3.78	-1.91
11/26/2023	0.00	0.00	1.52	-1.33
11/27/2023	3.00	0.00	1.78	-1.19
11/28/2023	0.00	0.00	1.73	-0.60
11/29/2023	0.00	0.00	1.61	-1.35
11/30/2023	0.00	0.00	1.56	-0.33
12/1/2023	0.00	0.00	1.82	0.87
12/2/2023	0.00	0.00	1.82	-0.54
12/3/2023	0.00	0.00	1.69	-0.64
12/4/2023	0.00	0.00	1.73	0.12
12/5/2023	0.00	0.00	1.75	-0.50
12/6/2023	0.00	0.00	1.40	-0.75
12/7/2023	2.26	0.00	1.60	3.28
12/8/2023	0.18	0.00	1.69	23.88
12/9/2023	0.16	0.00	1.71	-7.85
12/10/2023	0.44	0.00	1.45	10.70
12/11/2023	4.13	0.00	1.46	-4.48
12/12/2023	3.33	0.00	1.70	0.00
12/13/2023	2.42	0.00	1.54	-4.96
12/14/2023	1.70	0.00	1.70	-3.63
12/15/2023	4.22	1.48	1.75	-2.35
12/16/2023	0.76	0.00	1.66	-1.28
12/17/2023	0.20	0.00	1.83	-1.79
12/18/2023	0.03	0.00	1.77	-1.03
12/19/2023	0.00	0.00	1.58	-1.45
12/20/2023	0.11	0.00	1.70	-0.87
12/21/2023	0.15	0.00	1.81	-0.43
12/22/2023	0.19	0.00	1.64	-0.79
12/23/2023	0.44	0.00	1.61	-1.11
12/24/2023	2.84	0.00	1.42	-0.35
12/25/2023	0.00	0.00	2.94	-1.00
12/26/2023	0.00	0.00	1.63	-0.63
12/27/2023	0.00	0.00	1.52	-0.60
12/28/2023	0.00	0.00	1.68	-0.58
12/29/2023	0.00	0.00	1.69	-0.82
12/30/2023	0.00	0.00	1.67	-0.52
12/31/2023	0.00	0.00	1.76	-0.50
1/1/2024	0.00	0.00	1.78	-0.24
1/2/2024	0.00	0.00	1.87	-0.47
1/3/2024	0.00	0.00	1.96	-0.46
1/4/2024	0.00	0.00	1.93	-0.65
1/5/2024	0.00	0.00	2.04	-0.42
1/6/2024	0.00	0.00	2.06	-0.41
1/7/2024	0.00	0.00	1.87	-0.40
1/8/2024	0.00	0.00	2.00	-0.39

1/9/2024	0.00	0.00	1.91	-0.37
1/10/2024	0.00	0.00	1.99	-0.53
1/11/2024	0.00	0.00	2.15	0.00
1/12/2024	0.00	0.00	2.23	-0.35
1/13/2024	0.00	0.00	1.77	-0.67
1/14/2024	0.00	0.00	2.79	-0.95
1/15/2024	0.00	0.00	3.99	-0.44
1/16/2024	0.00	0.00	3.27	-0.58
1/17/2024	0.00	0.00	2.18	-0.42
1/18/2024	0.00	0.00	2.26	-0.53
1/19/2024	0.00	0.00	2.14	-0.39
1/20/2024	0.00	0.00	1.69	-0.12
1/21/2024	0.00	0.00	1.72	-0.37
1/22/2024	0.00	0.00	1.86	-0.84
1/23/2024	0.00	0.00	2.05	-0.34
1/24/2024	0.00	0.00	2.22	-0.30
1/25/2024	0.00	0.00	2.67	-0.36
1/26/2024	0.00	0.00	2.94	-0.39
1/27/2024	0.44	0.00	2.20	-1.79
1/28/2024	0.22	0.00	2.42	1.06
1/29/2024	0.06	0.00	0.58	-0.58
1/30/2024	0.00	0.00	2.75	-0.56
1/31/2024	0.01	0.00	2.86	-0.64
2/1/2024	0.02	0.00	1.91	-0.73
2/2/2024	0.00	0.00	4.24	-0.85
2/3/2024	0.00	0.00	4.67	-0.32
2/4/2024	0.00	0.00	4.63	-0.64
2/5/2024	0.00	0.00	4.67	-0.91
2/6/2024	0.00	0.00	5.21	-0.94
2/7/2024	0.00	0.00	4.43	-0.89
2/8/2024	0.00	0.00	4.82	-0.84
2/9/2024	0.00	0.00	5.00	-0.94
2/10/2024	0.00	0.00	5.16	-1.06
2/11/2024	0.00	0.00	5.21	-0.89
2/12/2024	0.00	0.00	4.01	-0.71
2/13/2024	0.00	0.00	2.73	-0.67
2/14/2024	0.00	0.00	3.11	-0.56
2/15/2024	0.00	0.00	3.68	-0.39
2/16/2024	0.00	0.00	3.92	-0.03
2/17/2024	22.60	1.08	1.31	11.49
2/18/2024	0.00	0.00	4.04	39.15
2/19/2024	0.00	0.00	4.76	-4.73
2/20/2024	0.00	0.00	5.48	-7.59
2/21/2024	0.00	0.00	5.16	-5.09
2/22/2024	0.00	0.00	5.57	-4.67

2/23/2024	0.00	0.00	5.29	-3.97
2/24/2024	0.00	0.00	5.32	-1.65
2/25/2024	0.00	0.00	3.26	-2.28
2/26/2024	0.00	0.00	3.13	-1.30
2/27/2024	0.00	0.00	1.84	-0.47
2/28/2024	0.00	0.00	5.47	-6.25
2/29/2024	0.00	0.00	5.41	-7.97
3/1/2024	0.00	0.00	5.16	-0.27
3/2/2024	0.00	0.00	5.26	-0.33
3/3/2024	0.00	0.00	5.25	-0.46
3/4/2024	0.00	0.00	5.46	-0.55
3/5/2024	0.00	0.00	5.41	-0.56
3/6/2024	0.00	0.00	5.48	-0.51
3/7/2024	0.00	0.00	6.02	-0.51
3/8/2024	0.00	0.00	6.24	-0.39
3/9/2024	0.55	0.00	5.98	-0.22
3/10/2024	0.54	0.00	5.92	-0.28
3/11/2024	0.07	0.00	4.97	-0.22
3/12/2024	0.01	0.00	5.07	-0.35
3/13/2024	0.00	0.00	5.36	-0.05
3/14/2024	0.00	0.00	5.87	-0.16
3/15/2024	0.00	0.00	5.79	-0.16
3/16/2024	0.00	0.00	5.96	-0.12
3/17/2024	0.00	0.00	5.90	-0.03
3/18/2024	1.38	0.00	5.78	0.00
3/19/2024	0.44	0.00	5.26	0.00
3/20/2024	0.67	0.00	4.61	0.00
3/21/2024	0.03	0.00	5.61	0.00
3/22/2024	0.00	0.00	6.13	0.00
3/23/2024	0.00	0.00	5.94	0.00
3/24/2024	0.00	0.00	6.77	0.00
3/25/2024	0.00	0.00	5.62	0.00
3/26/2024	0.00	0.00	6.21	0.00
3/27/2024	0.00	0.00	6.20	0.00
3/28/2024	0.00	0.00	5.47	0.00
3/29/2024	0.00	0.00	5.91	0.00
3/30/2024	0.00	0.00	5.90	0.00
3/31/2024	0.00	0.00	5.47	0.00
4/1/2024	0.00	0.00	6.27	0.00
4/2/2024	0.00	0.00	5.99	0.00
4/3/2024	0.00	0.00	5.99	0.00
4/4/2024	0.00	0.00	4.72	0.00
4/5/2024	0.00	0.00	5.89	0.00
4/6/2024	0.00	0.00	6.01	0.00
4/7/2024	0.00	0.00	6.24	0.00

4/8/2024	0.00	0.00	5.43	0.00
4/9/2024	0.00	0.00	6.21	0.00
4/10/2024	0.00	0.00	6.11	0.00
4/11/2024	0.00	0.00	5.92	0.00
4/12/2024	0.00	0.00	4.85	0.00
4/13/2024	0.00	0.00	6.02	0.00
4/14/2024	0.00	0.00	5.49	0.00
4/15/2024	0.00	0.00	6.16	0.00
4/16/2024	0.00	0.00	6.08	0.00
4/17/2024	0.00	0.00	6.20	0.00
4/18/2024	0.00	0.00	6.10	0.00
4/19/2024	4.40	0.00	5.85	0.00
4/20/2024	0.00	0.00	4.99	0.15
4/21/2024	12.20	0.03	5.71	-0.15
4/22/2024	0.00	0.00	5.36	0.11
4/23/2024	0.00	0.00	5.81	1.43
4/24/2024	0.12	0.00	5.03	-1.21
4/25/2024	0.93	0.00	5.58	0.83
4/26/2024	0.52	0.00	2.17	7.06
4/27/2024	0.18	0.00	4.63	-0.41
4/28/2024	0.00	0.00	6.26	-0.36
4/29/2024	0.00	0.00	6.25	-0.30
4/30/2024	0.00	0.00	5.68	-0.31
5/1/2024	0.02	0.00	5.57	-6.66
5/2/2024	0.30	0.00	6.00	0.47
5/3/2024	1.10	0.00	6.11	4.42
5/4/2024	1.80	0.00	6.46	-0.77
5/5/2024	2.80	0.00	5.75	4.33
5/6/2024	0.00	0.00	6.18	8.82
5/7/2024	0.00	0.00	6.84	-4.36
5/8/2024	0.00	0.00	4.84	-3.05
5/9/2024	0.00	0.00	5.94	-4.27
5/10/2024	0.00	0.00	6.58	-3.60
5/11/2024	0.00	0.00	6.29	-1.04
5/12/2024	0.00	0.00	5.44	-0.71
5/13/2024	0.00	0.00	5.59	-0.40
5/14/2024	0.07	0.00	5.57	-0.01
5/15/2024	0.07	0.00	5.97	0.35
5/16/2024	1.40	0.00	5.33	4.72
5/17/2024	0.02	0.00	5.51	-1.31
5/18/2024	3.59	0.00	5.64	2.13
5/19/2024	0.59	0.00	5.06	-1.05
5/20/2024	0.00	0.00	6.03	-0.86
5/21/2024	0.01	0.00	6.96	-1.03
5/22/2024	0.73	0.00	6.29	-1.18

5/23/2024	0.66	0.00	5.88	-0.25
5/24/2024	2.04	0.00	5.84	0.60
5/25/2024	14.18	0.01	6.27	0.34
5/26/2024	0.87	0.00	5.26	0.02
5/27/2024	0.00	0.00	6.53	-0.28
5/28/2024	0.00	0.00	5.89	-0.38
5/29/2024	3.50	1.74	4.57	-0.44
5/30/2024	0.60	0.00	4.68	-0.03
5/31/2024	0.00	0.00	6.71	0.12
6/1/2024	0.00	0.00	6.70	-0.20
6/2/2024	0.00	0.00	6.61	-0.43
6/3/2024	0.00	0.00	6.44	-0.41
6/4/2024	0.00	0.00	4.39	-0.37
6/5/2024	0.30	0.00	6.06	-0.05
6/6/2024	0.00	0.00	6.35	0.00
6/7/2024	2.10	0.00	5.72	1.47
6/8/2024	1.20	0.00	5.79	4.22
6/9/2024	1.90	0.00	3.76	0.49
6/10/2024	0.00	0.00	5.08	-0.25
6/11/2024	0.00	0.00	5.48	-0.38
6/12/2024	0.00	0.00	5.80	0.23
6/13/2024	0.00	0.00	4.61	0.28
6/14/2024	0.00	0.00	5.54	-0.41
6/15/2024	0.00	0.00	5.25	0.36
6/16/2024	0.00	0.00	4.41	-1.06
6/17/2024	0.00	0.00	4.56	-1.24
6/18/2024	0.00	0.00	6.06	-0.70
6/19/2024	22.08	0.97	5.49	0.44
6/20/2024	16.00	0.09	2.32	42.63
6/21/2024	7.47	0.08	0.52	-17.59
6/22/2024	13.60	1.61	2.68	-3.57
6/23/2024	36.10	15.34	2.11	3.57
6/24/2024	5.30	0.01	1.96	38.88
6/25/2024	14.30	1.88	1.70	2.69
6/26/2024	7.90	0.13	1.84	-2.38
6/27/2024	7.90	0.13	1.77	13.79
6/28/2024	1.80	0.00	1.68	3.44
6/29/2024	29.50	10.54	3.83	5.42
6/30/2024	0.00	0.00	1.38	1.20
7/1/2024	6.55	0.02	1.84	-5.63
7/2/2024	1.71	0.69	5.47	-4.99
7/3/2024	5.74	0.00	2.89	-6.47
7/4/2024	0.17	0.00	3.68	-1.46
7/5/2024	0.12	0.00	5.58	-2.20
7/6/2024	0.12	0.00	3.69	-1.87

7/7/2024	1.92	0.00	5.31	31.63
7/8/2024	2.35	0.00	5.22	-37.29
7/9/2024	3.70	0.00	3.85	-7.86
7/10/2024	6.25	0.87	1.25	-4.66
7/11/2024	10.01	0.19	1.90	10.19
7/12/2024	0.00	0.00	4.13	32.07
7/13/2024	0.00	0.00	2.83	-24.76
7/14/2024	0.00	0.00	4.92	-2.49
7/15/2024	2.26	0.00	3.73	5.44
7/16/2024	1.64	0.00	1.47	-3.81
7/17/2024	6.75	4.77	1.98	-2.16
7/18/2024	0.00	0.00	3.97	-4.56
7/19/2024	8.65	0.38	2.90	20.59
7/20/2024	5.28	1.14	4.87	-13.65
7/21/2024	2.56	2.12	3.76	31.87
7/22/2024	2.52	2.13	1.26	-32.97
7/23/2024	0.00	0.00	1.93	-7.63
7/24/2024	3.72	1.66	3.89	5.78
7/25/2024	1.90	0.00	2.90	22.07
7/26/2024	2.44	0.00	4.80	-14.61
7/27/2024	3.06	0.00	3.61	-1.53
7/28/2024	5.09	1.20	1.43	-1.04
7/29/2024	9.87	0.21	2.03	0.00
7/30/2024	0.00	0.00	3.86	0.00
7/31/2024	0.00	0.00	2.86	0.00
8/1/2024	0.60	0.00	4.39	0.00
8/2/2024	1.81	0.00	4.08	3.30
8/3/2024	0.67	0.00	3.69	-3.89
8/4/2024	4.43	0.00	2.44	0.09
8/5/2024	1.96	0.00	3.25	-1.26
8/6/2024	2.69	0.00	4.32	0.86
8/7/2024	3.78	1.63	4.34	-1.46
8/8/2024	3.33	1.80	3.38	1.42
8/9/2024	3.51	1.74	3.63	1.70
8/10/2024	6.33	0.85	2.38	-29.77
8/11/2024	9.23	0.29	2.61	-5.43
8/12/2024	2.98	1.94	2.38	0.37
8/13/2024	2.68	2.07	2.67	-0.02
8/14/2024	10.34	0.16	3.09	0.29
8/15/2024	5.90	0.97	3.07	0.91
8/16/2024	16.34	2.75	2.68	-0.11
8/17/2024	5.40	0.01	2.67	0.56
8/18/2024	10.17	0.55	4.05	0.65
8/19/2024	1.36	0.82	4.40	-0.85
8/20/2024	0.54	0.00	4.45	-1.34

8/21/2024	1.05	0.00	4.43	-2.96
8/22/2024	1.48	0.00	3.67	-2.64
8/23/2024	3.79	0.00	2.33	-1.63
8/24/2024	0.32	0.00	3.26	-0.81
8/25/2024	0.40	0.00	4.28	-0.59
8/26/2024	1.11	0.00	4.18	-0.89
8/27/2024	1.87	0.00	3.32	-1.29
8/28/2024	22.02	0.95	2.68	-0.38
8/29/2024	9.84	0.21	2.66	2.02
8/30/2024	9.13	0.32	3.53	7.18
8/31/2024	7.73	0.11	3.95	0.19
9/1/2024	5.67	0.00	3.02	3.04
9/2/2024	2.80	2.02	3.25	4.50
9/3/2024	2.62	2.09	3.04	1.46
9/4/2024	0.81	0.00	2.97	-2.22
9/5/2024	0.95	0.00	2.77	2.13
9/6/2024	1.46	0.00	3.46	19.77
9/7/2024	2.10	0.00	1.56	-8.58
9/8/2024	1.27	0.00	2.10	-6.11
9/9/2024	4.91	0.00	1.45	-3.58
9/10/2024	7.60	0.57	1.68	2.00
9/11/2024	4.90	1.26	2.08	19.34
9/12/2024	11.74	0.05	2.35	0.29
9/13/2024	14.70	2.04	3.10	-0.64
9/14/2024	3.33	0.24	4.19	3.43
9/15/2024	7.77	0.12	4.15	1.80
9/16/2024	16.39	2.77	3.31	-1.80
9/17/2024	3.01	0.31	2.69	0.85
9/18/2024	0.83	0.00	2.64	-1.96
9/19/2024	0.27	0.00	3.53	-0.97
9/20/2024	0.54	0.00	3.93	3.63
9/21/2024	2.03	0.00	3.13	-2.81
9/22/2024	2.33	0.00	3.32	-0.38
9/23/2024	1.47	0.00	2.95	-9.47
9/24/2024	1.37	0.00	2.73	0.78
9/25/2024	1.13	0.00	2.66	1.97
9/26/2024	5.12	0.00	3.19	-5.88
9/27/2024	7.29	0.63	1.52	10.20
9/28/2024	12.73	0.01	2.10	2.72
9/29/2024	9.85	0.21	1.27	0.38
9/30/2024	2.84	2.00	1.64	-0.14
10/1/2024	0.95	0.00	1.86	0.14

Cuadro 6 Balance hídrico diario en la parcela intervenida donde P, precipitación; ES, Escorrentía superficial; ET, Evapotranspiración; $\Delta\theta$, Cambio de almacenamiento de suelo.

FECHA	P (mm)	ES (mm)	ET (mm)	$\Delta\theta$ (mm)
7/23/2023	0.00	0.00		
7/24/2023	1.90	0.00	1.39	-8.71
7/25/2023	1.30	0.00	2.28	-10.99
7/26/2023	0.00	0.00	2.93	-2.33
7/27/2023	0.00	0.00	1.92	12.08
7/28/2023	0.00	0.00	1.91	0.00
7/29/2023	0.00	0.00	2.32	0.00
7/30/2023	0.00	0.00	1.93	0.00
7/31/2023	0.00	0.00	2.19	0.00
8/1/2023	0.00	0.00	2.24	0.00
8/2/2023	0.00	0.00	2.33	2.46
8/3/2023	0.00	0.00	2.05	0.00
8/4/2023	0.00	0.00	2.07	0.00
8/5/2023	0.00	0.00	2.14	0.00
8/6/2023	0.00	0.00	2.10	0.00
8/7/2023	0.00	0.00	2.34	-1.22
8/8/2023	0.00	0.00	2.21	0.00
8/9/2023	0.00	0.00	2.27	0.00
8/10/2023	0.00	0.00	2.08	0.00
8/11/2023	0.00	0.00	2.04	0.00
8/12/2023	0.00	0.00	2.20	3.57
8/13/2023	0.00	0.00	2.19	0.00
8/14/2023	0.00	0.00	2.16	0.00
8/15/2023	0.00	0.00	2.07	0.00
8/16/2023	0.00	0.00	1.91	0.00
8/17/2023	5.20	0.00	1.65	0.00
8/18/2023	0.30	0.00	1.89	0.00
8/19/2023	0.20	0.00	2.15	6.36
8/20/2023	0.00	0.00	3.73	-6.36
8/21/2023	5.50	0.00	2.05	0.00
8/22/2023	4.00	0.00	2.12	0.00
8/23/2023	0.00	0.00	1.87	0.00
8/24/2023	0.40	0.00	2.08	0.00
8/25/2023	0.00	0.00	1.87	0.00
8/26/2023	0.70	0.00	1.89	-3.57
8/27/2023	2.60	0.00	1.78	1.22
8/28/2023	14.70	0.12	1.96	0.00
8/29/2023	0.00	0.00	2.09	2.35

8/30/2023	0.00	0.00	1.90	0.00
8/31/2023	0.70	0.00	1.78	0.00
9/1/2023	11.60	0.47	1.89	0.00
9/2/2023	0.00	0.00	2.14	0.00
9/3/2023	1.50	0.00	1.90	0.00
9/4/2023	0.00	0.00	2.07	0.00
9/5/2023	0.00	0.00	2.09	0.00
9/6/2023	0.90	0.00	1.98	0.00
9/7/2023	0.00	0.00	2.05	0.00
9/8/2023	0.00	0.00	2.16	-3.57
9/9/2023	0.00	0.00	2.20	-1.24
9/10/2023	0.00	0.00	2.24	-8.24
9/11/2023	0.00	0.00	2.08	-7.41
9/12/2023	0.00	0.00	2.10	-3.40
9/13/2023	1.65	0.00	2.13	-3.46
9/14/2023	4.52	0.00	2.99	-2.81
9/15/2023	4.23	0.00	2.69	-0.57
9/16/2023	6.14	1.77	2.12	-2.28
9/17/2023	4.40	2.39	1.84	-1.97
9/18/2023	4.14	2.49	1.62	-1.35
9/19/2023	2.23	0.00	3.01	-1.58
9/20/2023	1.01	0.00	3.52	-1.42
9/21/2023	0.76	0.00	3.48	-1.29
9/22/2023	0.08	0.00	3.83	-1.18
9/23/2023	0.00	0.00	4.12	-0.77
9/24/2023	0.00	0.00	4.22	-2.21
9/25/2023	0.08	0.00	3.97	-1.44
9/26/2023	0.02	0.00	3.91	-1.72
9/27/2023	0.00	0.00	3.49	-1.39
9/28/2023	0.19	0.00	3.65	-1.25
9/29/2023	0.22	0.00	3.47	-0.90
9/30/2023	0.38	0.00	2.93	-1.35
10/1/2023	3.28	0.00	3.02	-1.22
10/2/2023	8.40	6.52	2.49	-0.34
10/3/2023	0.00	0.00	2.69	1.17
10/4/2023	2.00	0.00	2.74	-0.37
10/5/2023	10.30	0.70	2.86	4.98
10/6/2023	0.00	0.00	3.60	34.02
10/7/2023	0.00	0.00	2.30	-12.76
10/8/2023	0.00	0.00	1.52	-7.67
10/9/2023	1.70	0.00	0.99	-3.26
10/10/2023	1.20	0.00	2.21	-0.29
10/11/2023	0.00	0.00	1.95	-2.95
10/12/2023	0.00	0.00	3.32	-2.63
10/13/2023	0.00	0.00	2.47	-2.79

10/14/2023	0.00	0.00	2.10	-2.78
10/15/2023	0.50	0.00	1.44	-2.44
10/16/2023	0.00	0.00	1.36	-2.13
10/17/2023	0.00	0.00	2.97	-1.06
10/18/2023	0.00	0.00	3.02	-0.87
10/19/2023	0.00	0.00	2.87	-0.81
10/20/2023	0.00	0.00	2.76	-1.05
10/21/2023	0.00	0.00	3.17	-1.46
10/22/2023	0.00	0.00	3.22	-1.61
10/23/2023	0.00	0.00	2.43	-1.91
10/24/2023	4.00	0.00	2.19	-2.00
10/25/2023	0.00	0.00	0.62	-1.94
10/26/2023	1.90	0.00	1.46	-1.66
10/27/2023	0.40	0.00	3.38	-1.06
10/28/2023	0.00	0.00	3.35	-0.75
10/29/2023	0.00	0.00	3.29	-0.63
10/30/2023	0.00	0.00	2.04	-0.74
10/31/2023	0.28	0.00	2.37	-0.73
11/1/2023	0.18	0.00	2.55	-0.39
11/2/2023	3.40	0.00	1.17	-0.23
11/3/2023	0.12	0.00	2.27	-0.22
11/4/2023	0.60	0.00	2.90	-0.22
11/5/2023	0.31	0.00	2.87	-0.21
11/6/2023	0.15	0.00	2.96	-0.10
11/7/2023	0.25	0.00	2.46	-0.13
11/8/2023	0.01	0.00	2.57	-0.03
11/9/2023	1.46	0.00	2.23	-0.06
11/10/2023	4.75	0.00	1.92	0.51
11/11/2023	1.31	0.00	2.53	0.33
11/12/2023	8.62	1.06	1.77	-0.18
11/13/2023	7.19	1.45	2.00	-0.21
11/14/2023	0.42	0.00	1.66	-0.14
11/15/2023	0.28	0.00	2.81	-0.23
11/16/2023	0.00	0.00	2.82	-0.19
11/17/2023	0.00	0.00	3.09	-0.06
11/18/2023	0.00	0.00	3.07	0.00
11/19/2023	0.00	0.00	2.94	0.00
11/20/2023	0.00	0.00	2.82	0.00
11/21/2023	9.50	6.07	1.87	0.39
11/22/2023	18.30	0.00	1.33	23.19
11/23/2023	3.10	2.92	1.17	30.16
11/24/2023	0.00	0.00	2.81	-11.60
11/25/2023	0.00	0.00	2.70	-6.79
11/26/2023	0.00	0.00	1.08	-3.47
11/27/2023	3.00	0.00	1.27	0.75

11/28/2023	0.00	0.00	1.24	6.35
11/29/2023	0.00	0.00	1.15	-5.65
11/30/2023	0.00	0.00	1.11	-2.88
12/1/2023	0.00	0.00	1.30	-2.45
12/2/2023	0.00	0.00	1.30	-2.03
12/3/2023	0.00	0.00	1.21	-1.46
12/4/2023	0.00	0.00	1.23	-1.55
12/5/2023	0.00	0.00	1.25	-1.38
12/6/2023	0.00	0.00	1.00	-1.38
12/7/2023	2.26	0.00	1.15	4.39
12/8/2023	0.18	0.00	1.21	17.26
12/9/2023	0.16	0.00	1.22	-3.62
12/10/2023	0.44	0.00	1.04	21.52
12/11/2023	4.13	0.00	1.05	-1.26
12/12/2023	3.33	0.00	1.21	-8.88
12/13/2023	2.42	0.00	1.10	-6.68
12/14/2023	1.70	0.00	1.21	-4.44
12/15/2023	4.22	2.46	1.25	-1.64
12/16/2023	0.76	0.00	1.19	1.37
12/17/2023	0.20	0.00	1.30	-3.88
12/18/2023	0.03	0.00	1.26	-3.39
12/19/2023	0.00	0.00	1.13	-2.06
12/20/2023	0.11	0.00	1.22	-2.11
12/21/2023	0.15	0.00	1.29	-1.52
12/22/2023	0.19	0.00	1.17	-1.79
12/23/2023	0.44	0.00	1.15	-1.62
12/24/2023	2.84	0.00	1.02	-1.39
12/25/2023	0.00	0.00	2.10	-1.42
12/26/2023	0.00	0.00	1.17	-1.15
12/27/2023	0.00	0.00	1.09	-1.04
12/28/2023	0.00	0.00	1.20	-1.08
12/29/2023	0.00	0.00	1.21	-0.99
12/30/2023	0.00	0.00	1.19	-0.72
12/31/2023	0.00	0.00	1.26	-0.87
1/1/2024	0.00	0.00	1.27	-0.81
1/2/2024	0.00	0.00	1.33	-0.68
1/3/2024	0.00	0.00	1.40	-0.64
1/4/2024	0.00	0.00	1.38	-0.69
1/5/2024	0.00	0.00	1.46	-0.65
1/6/2024	0.00	0.00	1.47	-0.55
1/7/2024	0.00	0.00	1.34	-0.59
1/8/2024	0.00	0.00	1.43	-0.50
1/9/2024	0.00	0.00	1.37	-0.48
1/10/2024	0.00	0.00	1.42	-0.52
1/11/2024	0.00	0.00	1.54	0.52

1/12/2024	0.00	0.00	1.59	-0.85
1/13/2024	0.00	0.00	1.27	-1.25
1/14/2024	0.00	0.00	2.00	-1.19
1/15/2024	0.00	0.00	2.85	-1.16
1/16/2024	0.00	0.00	2.33	-0.87
1/17/2024	0.00	0.00	1.55	-0.70
1/18/2024	0.00	0.00	1.62	-0.65
1/19/2024	0.00	0.00	1.53	-0.33
1/20/2024	0.00	0.00	1.21	-0.17
1/21/2024	0.00	0.00	1.23	-0.13
1/22/2024	0.00	0.00	1.33	-0.10
1/23/2024	0.00	0.00	1.46	-0.10
1/24/2024	0.00	0.00	1.59	0.00
1/25/2024	0.00	0.00	1.90	0.00
1/26/2024	0.00	0.00	2.10	-0.06
1/27/2024	0.44	0.00	1.57	-0.04
1/28/2024	0.22	0.00	1.73	0.00
1/29/2024	0.06	0.00	0.42	0.00
1/30/2024	0.00	0.00	1.96	0.00
1/31/2024	0.01	0.00	2.04	0.00
2/1/2024	0.02	0.00	1.37	0.00
2/2/2024	0.00	0.00	3.03	0.00
2/3/2024	0.00	0.00	3.33	0.00
2/4/2024	0.00	0.00	3.31	0.00
2/5/2024	0.00	0.00	3.34	0.00
2/6/2024	0.00	0.00	3.72	0.00
2/7/2024	0.00	0.00	3.16	0.00
2/8/2024	0.00	0.00	3.44	0.00
2/9/2024	0.00	0.00	3.57	0.00
2/10/2024	0.00	0.00	3.69	0.00
2/11/2024	0.00	0.00	3.72	0.00
2/12/2024	0.00	0.00	2.87	0.00
2/13/2024	0.00	0.00	1.95	0.00
2/14/2024	0.00	0.00	2.22	0.00
2/15/2024	0.00	0.00	2.63	0.00
2/16/2024	0.00	0.00	2.80	0.00
2/17/2024	22.60	0.24	0.94	13.08
2/18/2024	0.00	0.00	2.89	21.85
2/19/2024	0.00	0.00	3.40	-6.44
2/20/2024	0.00	0.00	3.92	-3.68
2/21/2024	0.00	0.00	3.69	-2.88
2/22/2024	0.00	0.00	3.98	-2.09
2/23/2024	0.00	0.00	3.78	-1.39
2/24/2024	0.00	0.00	3.80	-1.00
2/25/2024	0.00	0.00	2.33	-0.75

2/26/2024	0.00	0.00	2.24	-0.69
2/27/2024	0.00	0.00	1.31	-0.56
2/28/2024	0.00	0.00	3.90	-0.55
2/29/2024	0.00	0.00	3.86	-0.72
3/1/2024	0.00	0.00	3.69	-0.82
3/2/2024	0.00	0.00	3.76	-1.01
3/3/2024	0.00	0.00	3.75	-1.31
3/4/2024	0.00	0.00	3.90	-1.63
3/5/2024	0.00	0.00	3.86	-1.79
3/6/2024	0.00	0.00	3.92	-1.82
3/7/2024	0.00	0.00	4.30	-1.65
3/8/2024	0.00	0.00	4.46	-1.65
3/9/2024	0.55	0.00	4.27	-1.42
3/10/2024	0.54	0.00	4.23	-0.77
3/11/2024	0.07	0.00	3.55	-0.22
3/12/2024	0.01	0.00	3.62	-0.09
3/13/2024	0.00	0.00	3.83	0.00
3/14/2024	0.00	0.00	4.19	0.00
3/15/2024	0.00	0.00	4.13	0.00
3/16/2024	0.00	0.00	4.25	0.00
3/17/2024	0.00	0.00	4.22	0.00
3/18/2024	1.38	0.00	4.13	0.00
3/19/2024	0.44	0.00	3.76	0.00
3/20/2024	0.67	0.00	3.29	0.00
3/21/2024	0.03	0.00	4.01	0.00
3/22/2024	0.00	0.00	4.38	0.00
3/23/2024	0.00	0.00	4.24	0.00
3/24/2024	0.00	0.00	4.83	0.00
3/25/2024	0.00	0.00	4.01	0.00
3/26/2024	0.00	0.00	4.44	0.00
3/27/2024	0.00	0.00	4.43	0.00
3/28/2024	0.00	0.00	3.90	0.00
3/29/2024	0.00	0.00	4.22	0.00
3/30/2024	0.00	0.00	4.22	0.00
3/31/2024	0.00	0.00	3.91	0.00
4/1/2024	0.00	0.00	4.48	0.00
4/2/2024	0.00	0.00	4.28	0.00
4/3/2024	0.00	0.00	4.28	0.00
4/4/2024	0.00	0.00	3.37	0.00
4/5/2024	0.00	0.00	4.21	0.00
4/6/2024	0.00	0.00	4.29	0.00
4/7/2024	0.00	0.00	4.45	0.00
4/8/2024	0.00	0.00	3.88	0.00
4/9/2024	0.00	0.00	4.44	0.00
4/10/2024	0.00	0.00	4.36	0.00

4/11/2024	0.00	0.00	4.23	0.00
4/12/2024	0.00	0.00	3.46	0.00
4/13/2024	0.00	0.00	4.30	0.00
4/14/2024	0.00	0.00	3.92	0.00
4/15/2024	0.00	0.00	4.40	0.00
4/16/2024	0.00	0.00	4.34	0.00
4/17/2024	0.00	0.00	4.43	0.00
4/18/2024	0.00	0.00	4.36	0.00
4/19/2024	4.40	0.00	4.18	0.00
4/20/2024	0.00	0.00	3.57	0.00
4/21/2024	12.20	0.38	4.08	0.00
4/22/2024	0.00	0.00	3.83	1.02
4/23/2024	0.00	0.00	4.15	2.37
4/24/2024	0.12	0.00	3.59	1.57
4/25/2024	0.93	0.00	3.99	0.00
4/26/2024	0.52	0.00	1.55	-0.45
4/27/2024	0.18	0.00	3.31	-0.72
4/28/2024	0.00	0.00	4.47	-0.85
4/29/2024	0.00	0.00	4.47	-0.96
4/30/2024	0.00	0.00	4.06	-0.84
5/1/2024	0.02	0.00	3.98	-0.61
5/2/2024	0.30	0.00	4.28	-0.37
5/3/2024	1.10	0.00	4.36	-0.15
5/4/2024	1.80	0.00	4.61	0.00
5/5/2024	2.80	0.00	4.10	0.00
5/6/2024	0.00	0.00	4.42	0.00
5/7/2024	0.00	0.00	4.88	0.00
5/8/2024	0.00	0.00	3.46	0.00
5/9/2024	0.00	0.00	4.25	0.00
5/10/2024	0.00	0.00	4.70	0.00
5/11/2024	0.00	0.00	4.50	0.00
5/12/2024	0.00	0.00	3.89	0.00
5/13/2024	0.00	0.00	4.00	0.00
5/14/2024	0.07	0.00	3.98	0.00
5/15/2024	0.07	0.00	4.26	0.00
5/16/2024	1.40	0.00	3.81	0.00
5/17/2024	0.02	0.00	3.93	0.00
5/18/2024	3.59	0.00	4.03	0.04
5/19/2024	0.59	0.00	3.61	0.04
5/20/2024	0.00	0.00	4.31	-0.08
5/21/2024	0.01	0.00	4.97	0.00
5/22/2024	0.73	0.00	4.49	0.00
5/23/2024	0.66	0.00	4.20	1.10
5/24/2024	2.04	0.00	4.17	0.93
5/25/2024	14.18	0.16	4.48	-0.28

5/26/2024	0.87	0.00	3.76	-0.57
5/27/2024	0.00	0.00	4.67	-0.55
5/28/2024	0.00	0.00	4.21	-0.42
5/29/2024	3.50	2.75	3.26	-0.19
5/30/2024	0.60	0.00	3.34	0.02
5/31/2024	0.00	0.00	4.79	-0.03
6/1/2024	0.00	0.00	4.78	0.00
6/2/2024	0.00	0.00	4.72	0.00
6/3/2024	0.00	0.00	4.60	0.00
6/4/2024	0.00	0.00	3.13	0.00
6/5/2024	0.30	0.00	4.33	0.00
6/6/2024	0.00	0.00	4.54	0.00
6/7/2024	2.10	0.00	4.09	0.00
6/8/2024	1.20	0.00	4.14	0.00
6/9/2024	1.90	0.00	2.68	0.00
6/10/2024	0.00	0.00	3.63	0.00
6/11/2024	0.00	0.00	3.91	0.00
6/12/2024	0.00	0.00	4.14	0.00
6/13/2024	0.00	0.00	3.30	0.00
6/14/2024	0.00	0.00	3.96	0.00
6/15/2024	0.00	0.00	3.75	0.00
6/16/2024	0.00	0.00	3.15	0.00
6/17/2024	0.00	0.00	3.26	0.00
6/18/2024	0.00	0.00	4.33	0.00
6/19/2024	22.08	0.19	3.92	0.00
6/20/2024	16.00	0.04	1.65	14.07
6/21/2024	7.47	0.00	0.37	5.97
6/22/2024	13.60	0.76	1.92	1.41
6/23/2024	36.10	11.96	1.51	21.85
6/24/2024	5.30	0.17	1.40	23.06
6/25/2024	14.30	0.94	1.22	-4.20
6/26/2024	7.90	0.00	1.32	7.55
6/27/2024	7.90	0.00	1.27	26.95
6/28/2024	1.80	0.00	1.20	-25.90
6/29/2024	29.50	7.81	2.74	0.00
6/30/2024	0.00	0.00	0.99	-1.53
7/1/2024	6.55	0.04	1.32	1.53
7/2/2024	1.71	1.12	3.91	0.00
7/3/2024	5.74	0.11	2.06	0.00
7/4/2024	0.17	0.00	2.63	0.00
7/5/2024	0.12	0.00	3.99	-0.64
7/6/2024	0.12	0.00	2.63	33.44
7/7/2024	1.92	0.00	3.80	-29.69
7/8/2024	2.35	0.00	3.73	-5.88
7/9/2024	3.70	0.00	2.75	-2.83

7/10/2024	6.25	1.73	0.90	-1.56
7/11/2024	10.01	0.76	1.35	3.36
7/12/2024	0.00	0.00	2.95	12.85
7/13/2024	0.00	0.00	2.02	32.45
7/14/2024	0.00	0.00	3.52	-41.47
7/15/2024	2.26	0.00	2.67	-3.97
7/16/2024	1.64	0.00	1.05	0.52
7/17/2024	6.75	0.00	1.42	-1.00
7/18/2024	0.00	0.00	2.84	-2.23
7/19/2024	8.65	1.06	2.07	10.01
7/20/2024	5.28	2.06	3.48	14.08
7/21/2024	2.56	0.00	2.69	-19.77
7/22/2024	2.52	0.00	0.90	0.18
7/23/2024	0.00	0.00	1.38	-0.31
7/24/2024	3.72	2.66	2.78	0.50
7/25/2024	1.90	0.00	2.07	0.09
7/26/2024	2.44	0.00	3.43	0.00
7/27/2024	3.06	0.00	2.58	-0.55
7/28/2024	5.09	2.13	1.02	-0.04
7/29/2024	9.87	0.78	1.45	0.00
7/30/2024	0.00	0.00	2.75	0.00
7/31/2024	0.00	0.00	2.04	0.00
8/1/2024	0.60	0.00	3.14	0.00
8/2/2024	1.81	0.00	2.91	0.74
8/3/2024	0.67	0.00	2.64	-0.38
8/4/2024	4.43	0.00	1.75	-0.36
8/5/2024	1.96	0.00	2.32	24.54
8/6/2024	2.69	0.00	3.08	-10.99
8/7/2024	3.78	2.63	3.10	-4.74
8/8/2024	3.33	2.82	2.41	-8.81
8/9/2024	3.51	2.75	2.59	22.51
8/10/2024	6.33	1.71	1.70	-5.55
8/11/2024	9.23	0.92	1.86	-16.95
8/12/2024	2.98	2.97	1.70	0.00
8/13/2024	2.68	0.00	1.91	0.00
8/14/2024	10.34	0.69	2.21	0.00
8/15/2024	5.90	1.85	2.19	0.00
8/16/2024	16.34	1.55	1.91	18.08
8/17/2024	5.40	0.15	1.91	17.14
8/18/2024	10.17	0.14	2.89	-35.22
8/19/2024	1.36	1.26	3.14	0.00
8/20/2024	0.54	0.00	3.18	0.00
8/21/2024	1.05	0.00	3.17	-1.18
8/22/2024	1.48	0.00	2.62	2.70
8/23/2024	3.79	0.00	1.67	-4.61

8/24/2024	0.32	0.00	2.33	-1.90
8/25/2024	0.40	0.00	3.06	-4.92
8/26/2024	1.11	0.00	2.99	-6.16
8/27/2024	1.87	0.00	2.37	-4.99
8/28/2024	22.02	0.19	1.91	-3.05
8/29/2024	9.84	0.79	1.90	1.23
8/30/2024	9.13	0.05	2.52	-2.80
8/31/2024	7.73	0.00	2.82	-1.97
9/1/2024	5.67	0.12	2.16	5.41
9/2/2024	2.80	0.00	2.32	21.77
9/3/2024	2.62	0.00	2.17	-7.02
9/4/2024	0.81	0.00	2.12	-9.43
9/5/2024	0.95	0.00	1.98	-2.77
9/6/2024	1.46	0.00	2.47	13.89
9/7/2024	2.10	0.00	1.11	-6.73
9/8/2024	1.27	0.00	1.50	-6.97
9/9/2024	4.91	0.00	1.04	-5.96
9/10/2024	7.60	1.33	1.20	3.43
9/11/2024	4.90	2.20	1.48	21.90
9/12/2024	11.74	0.45	1.68	0.34
9/13/2024	14.70	1.05	2.22	0.99
9/14/2024	3.33	0.57	2.99	0.00
9/15/2024	7.77	0.00	2.97	0.00
9/16/2024	16.39	1.57	2.36	0.00
9/17/2024	3.01	0.66	1.92	0.61
9/18/2024	0.83	0.00	1.89	10.87
9/19/2024	0.27	0.00	2.52	-11.48
9/20/2024	0.54	0.00	2.81	0.00
9/21/2024	2.03	0.00	2.23	-0.19
9/22/2024	2.33	0.00	2.37	-0.91
9/23/2024	1.47	0.00	2.11	-3.39
9/24/2024	1.37	0.00	1.95	2.62
9/25/2024	1.13	0.00	1.90	-1.16
9/26/2024	5.12	0.00	2.28	-3.06
9/27/2024	7.29	1.42	1.08	4.32
9/28/2024	12.73	0.31	1.50	0.25
9/29/2024	9.85	0.79	0.90	1.22
9/30/2024	2.84	0.00	1.17	-0.61
10/1/2024	0.95	0.00	1.33	0.44