

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**DETERMINACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO 2021 DEL SITIO DE
RESTAURACIÓN LAGUNA GRANDE DEL DELTA DEL RÍO COLORADO COMO
ELEMENTO DE MANEJO ADAPTATIVO**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
DEUS DEDIT HERNÁNDEZ LÓPEZ

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. JESÚS ELIANA RODRÍGUEZ
BURGUEÑO

CODIRECTOR DE TESIS:
DR. JORGE RAMÍREZ HERNÁNDEZ

Mexicali, Baja California, enero de 2023

Agradecimientos

A mi madre **María Consuelo** y a mi padre **Elmer**, por su apoyo incondicional.

A la **Dra. Eliana** por su dedicación en la dirección de esta tesis y su calidad humana. Mi grata experiencia en el posgrado se debe en gran parte a que tuve una asesora ejemplar.

Al **Dr. Jorge** por sus enseñanzas y por la codirección de esta tesis.

A los **miembros del sínodo** por la revisión de este trabajo y sus valiosas aportaciones.

A **Frida** por ser una gran compañera, mentora y amiga.

A mis compañeros **Héctor** y **Romario** por las risas y las discusiones, pero sobre todo por compartirme de su experiencia y acompañarme en mis salidas a campo.

A **Brisa** y a **Estela** por su apoyo al enseñarme a utilizar el equipo del laboratorio para el análisis de las muestras de suelo.

A los **compañeros, personal del Instituto de Ingeniería y alumnos de servicio social de la Facultad de Ingeniería** que participaron en el análisis de muestras de suelo y que me acompañaron alguna vez a campo.

A **mis amigas** por estar conmigo siempre, a pesar de la distancia.

Al **Sonoran Institute México** por la información compartida, las revisiones y por permitirme hacer de mi lugar favorito el área de estudio de mi tesis.

A la **Comisión Internacional de Límites y Aguas** y **The Nature Conservancy** por financiar el monitoreo y análisis hidrológico que fue indispensable para la realización de este trabajo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por permitirme ser estudiante de tiempo completo al otorgarme la beca nacional no. 1065198.

Contenido

1. Introducción.....	5
1.1. Elementos de investigación	6
1.1.1. Objetivo general.....	6
1.1.2. Objetivos específicos.....	6
1.1.3. Objetivo metodológico	7
1.1.4. Metas	7
1.1.5. Pregunta de investigación.....	8
1.1.6. Hipótesis.....	8
1.2. Área de estudio	8
1.3. Justificación.....	11
2. Antecedentes	13
2.1. Delta del Río Colorado	13
2.1.1. Flujos históricos.....	14
2.1.2. Restauración	15
2.1.3. Acta 319	16
2.1.4. Acta 323	17
3. Marco teórico-conceptual	19
3.1. Balance hidrológico.....	19
3.2. Vegetación ribereña.....	19
3.3. Flujos ambientales	20
3.4. Restauración ecológica	20
3.5. Manejo adaptativo.....	21
3.6. Suelo.....	22
3.6.1. Textura del suelo.....	22
3.7. Agua subterránea.....	23
3.8. Evaporación directa	23
3.9. Evapotranspiración	24
3.9.1. Evapotranspiración de referencia.....	24
3.9.2. Evapotranspiración del cultivo.....	24
3.9.3. Coeficiente del cultivo.....	25
3.10. Requerimiento hídrico de la vegetación.....	25
4. Materiales y métodos	26

4.1.	Definición de las variables del balance hidrológico	26
4.2.	Trabajo de campo	29
4.2.1.	Monitoreos hidrológicos	29
4.2.2.	Monitoreo del microclima	33
4.2.3.	Muestreo de suelos.....	35
4.3.	Trabajo de laboratorio	36
4.3.1.	Preparación de las muestras de suelo	36
4.3.2.	Determinación de pH y CE de las muestras de suelo.....	38
4.3.3.	Determinación de la textura del suelo.....	40
4.4.	Estimación de las variables del balance hidrológico.....	42
4.4.1.	Precipitación	42
4.4.2.	Entregas de agua ambiental para irrigación	42
4.4.3.	Estimación de la recarga y descarga de agua subterránea.....	42
4.4.4.	Evaporación directa	46
4.4.5.	Evapotranspiración	47
5.	Resultados y discusión	50
5.1.	Análisis de muestras de suelos	50
5.1.1.	Textura	50
5.1.2.	ST y pH.....	52
5.1.3.	Cambios en la concentración de sólidos totales en el suelo del 2008 al 2021	54
5.2.	Elevación del nivel freático	55
5.3.	Determinación del rendimiento específico por el método del triángulo textural.....	57
5.4.	Estimación de las entradas de agua.....	59
5.4.1.	Precipitación	59
5.4.2.	Entregas de agua ambiental para irrigación	61
5.4.3.	Recarga al acuífero.....	62
5.5.	Estimación de las salidas de agua	64
5.5.1.	Evaporación directa	64
5.5.2.	Evapotranspiración	65
5.5.3.	Descarga subterránea	67
5.6.	Balance hidrológico.....	69
5.7.	Entregas de agua ambiental y recarga al acuífero.....	71
5.8.	Escenarios de modificación de las variables del balance hidrológico.....	75

5.8.1.	Escenario 1. Reducción del 50% en las entregas de agua.....	76
5.8.2.	Escenario 2. Entrega de agua igual al requerimiento hídrico de la vegetación.....	77
5.8.3.	Escenario 3. Corte de agua ambiental	78
5.8.4.	Escenario 4. Reducción de 1 m de la ENF	79
6.	Conclusiones	82
7.	Recomendaciones	82
8.	Apéndice	86
9.	Bibliografía	87

1. Introducción

La velocidad con la que la diversidad de especies de flora y fauna se ha reducido en los últimos 50 años ha sido mayor que en cualquier otro momento de la historia de la humanidad y este declive ha sido consecuencia principalmente de la degradación total o parcial del hábitat mediante prácticas insostenibles en la agricultura, fragmentación de hábitat, contaminación o invasión de especies exóticas (Reid et al., 2005). La necesidad de restaurar hábitat se ha convertido en objeto de interés mundial (Suding, 2011; Palmer y Ruhi, 2019), el año 2021 se ha declarado el inicio de la Década de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para la restauración de Ecosistemas (ONU, 2019).

En México, el 90.7% de la superficie nacional (177,642,000 ha) presenta algún nivel de degradación ambiental como consecuencia del desarrollo urbano-industrial, de la agricultura extensiva, tala ilegal, incendios, entre otros (CONAFOR-UACH, 2013). Actualmente en México existen 44 Áreas Naturales Protegidas (ANP) bajo la designación de Reserva de la Biósfera, las cuales abarcan 62,952,750 ha del territorio y seis de ellas se ubican en el estado de Baja California (CONANP).

Uno de los hábitats que presentan degradación como consecuencia del manejo y la distribución del agua en la región de Baja California es el Delta del Río Colorado (Delta), naciente del Río Colorado (RC) (Cortez, 1999). Este río se ubica al noroeste de México, inicia en Colorado, Estados Unidos (EUA) y desemboca en el Golfo de California recorriendo más de 2,300 km. Su Delta se ha convertido en un ecosistema altamente perturbado por la actividad humana ya que el RC es uno de los ríos más regulados del mundo (Ramírez-Hernández et al., 2015). Previo al inicio de la construcción de obras hidráulicas a lo largo de su cauce, el RC formó un Delta con una superficie de aproximadamente 800,000 ha de hábitat nativo que sostenía una gran variedad de plantas, animales y vida marina (Luecke et al., 1999). Actualmente, los flujos de agua del RC no llegan al Delta y este es ocupado en gran parte por zonas agrícolas conocidas como Valle Imperial en California, EUA, y los valles de Mexicali y San Luis Río Colorado, ubicados en Baja California y Sonora, respectivamente (Zamora-Arroyo et al., 2005).

A pesar de su drástico deterioro, el Delta ha demostrado capacidad para adaptarse a las condiciones adversas como la sequía y aumento de los niveles de salinidad (Glenn et al., 1998; Vandersande et

al., 2001); y sus humedales han sido protegidos bajo la categoría de Reserva de la Biósfera en México y reconocidos como Humedales de Importancia Internacional por la Convención RAMSAR. Por tanto, grupos de científicos, organizaciones ambientales, dependencias de gobierno y líderes del sector privado, decidieron destinar pequeñas áreas dentro del corredor ribereño del río como sitios para su restauración, para que a través de los años fuesen combinados en áreas más grandes y ecológicamente funcionales (Zamora-Arroyo et al., 2005). Estos sitios se adquirieron por medio de acuerdos de concesión con el gobierno mexicano en el año 2008 y entre ellos se encuentra el Complejo de Restauración Laguna Grande (CRLG), el área más grande y densa de hábitat nativo a lo largo del corredor ribereño mexicano del RC (Sonoran Institute, 2013). Para el riego de estos sitios, se adquirieron derechos de agua del Distrito Riego 014 Río Colorado (DR014) (Zamora-Arroyo et al., 2008).

Dada la complejidad de la gestión y manejo del agua tanto en la parte alta de la cuenca del RC, así como en la parte baja, se han establecido diversos elementos jurídicos para la distribución y uso de las aguas del río, conocidos como la Ley del Río (USBR, 2015). Uno de estos, es el Tratado de Aguas Internacionales de 1944 entre México y Estados Unidos, que garantiza a México una entrega anual de 1,850 hm³ de agua del RC a México, sin embargo, no estableció un flujo destinado para sustentar los ecosistemas del Delta (Zamora-Arroyo, 2008). Organizaciones ambientales binacionales lograron en 2012 el primer acuerdo entre los gobiernos de EUA y México en asignar agua de uso exclusivo para el ambiente en la sección mexicana del río, denominada Acta 319 (Rodríguez-Burgueño et al., 2017). Sucesora al Acta 319, en 2017 se firmó el Acta 323, que amplía los proyectos de restauración ambiental en el Delta y asegura agua para el ambiente hasta 2026 (IBWC, 2017).

1.1. Elementos de investigación

1.1.1. Objetivo general

Obtener el balance hidrológico anual del sitio de restauración Laguna Grande del Delta del Río Colorado mediante el monitoreo y el análisis espaciotemporal de sus variables hidrológicas y climatológicas, como elemento de manejo adaptativo de los sitios de restauración durante el año 2021.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Definir las variables del balance hidrológico y del modelo conceptual del régimen hidrológico del sitio de restauración Laguna Grande del Delta de RC.
2. Analizar las variables del medio físico tales como textura y salinidad del suelo, así como las variables climatológicas presentadas en el sitio.
3. Recabar información sobre los tipos de irrigación y volúmenes de entregas de agua ambiental.
4. Estimar las variables que componen el balance hidrológico tales como recarga, evapotranspiración (ET), evaporación (E), salidas de flujo subterráneo, etc. durante el año 2021.
5. Analizar diferentes escenarios de cambios en los componentes del balance hidrológico.

1.1.3. Objetivo metodológico

Analizar las variables hidrológicas mediante el método del balance hidrológico.

1.1.4. Metas

Para el objetivo específico 1:

- Recopilar y analizar información hidrológica y física antecedente de los sitios de restauración.
- Definir y analizar las variables hidrológicas que interactúan en el balance hidrológico general del sitio de restauración mediante el monitoreo sistemático espaciotemporal de estas variables.
- Determinar el modelo conceptual del régimen hidrológico actual del sitio de restauración del Delta del RC, integrando las entregas de agua ambiental.

Para el objetivo específico 2:

- Realizar muestreo de suelos para determinar la textura y la salinidad, hasta 5 m de profundidad.
- Realizar el monitoreo sistemático de las variables climatológicas en el sitio.

Para el objetivo específico 3:

- Recopilar y analizar la información relacionada a los volúmenes de agua entregada como flujos ambientales por parte de las organizaciones de la sociedad civil durante el año 2021.

Para el objetivo específico 4:

- Aplicar los métodos de estimación de las variables del balance hidrológico utilizando análisis geoespaciales, temporales y físicos.

Para el objetivo específico 5:

- Definir tres escenarios de modificación de los componentes del balance hidrológico del sitio de acuerdo con las variables analizadas.

1.1.5. Pregunta de investigación

¿Los flujos ambientales implementados en tiempo y espacio en las parcelas de restauración de vegetación nativa del sitio Laguna Grande son suficientes para compensar las pérdidas por evapotranspiración de la vegetación?

1.1.6. Hipótesis

El análisis de las variables hidrológicas y del medio físico de la zona de estudio aporta elementos para el manejo adaptativo del agua de uso ambiental.

1.2. Área de estudio

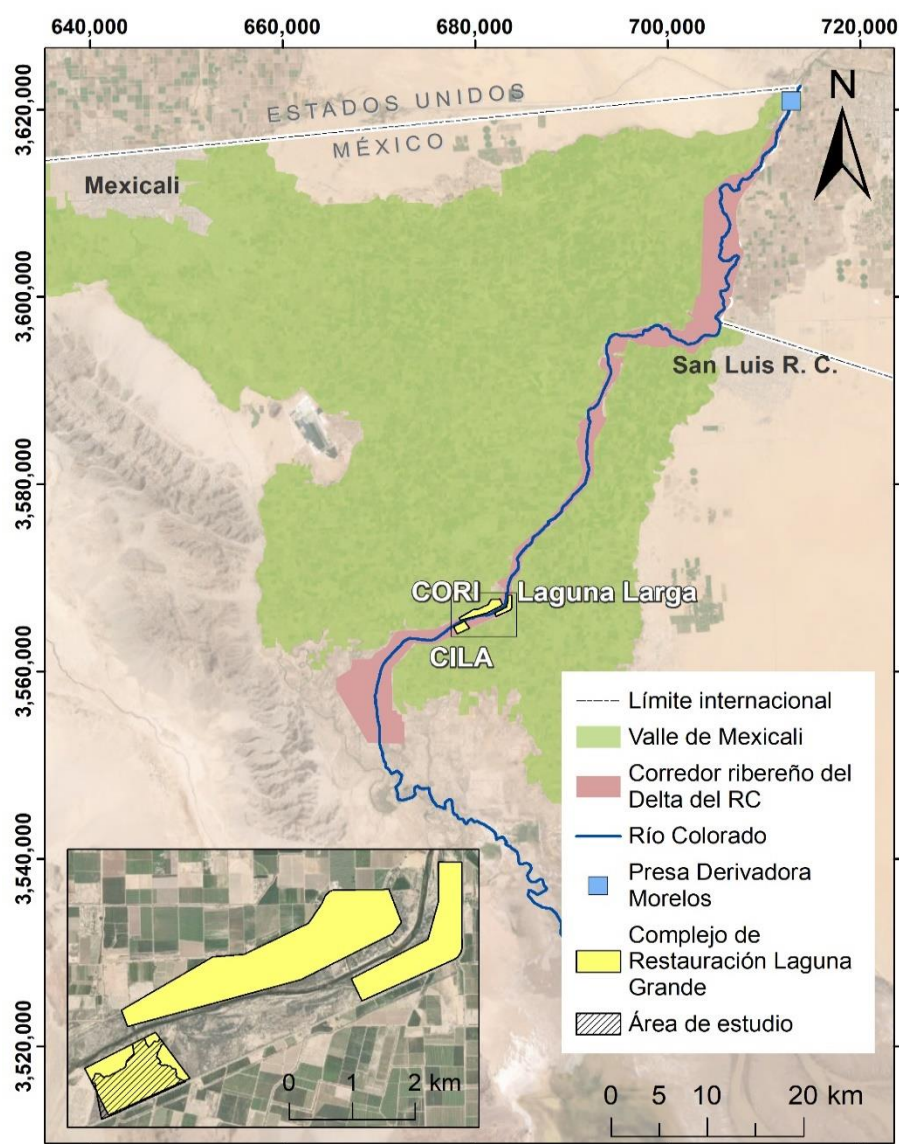
Al noroeste de la República Mexicana, en el estado de Baja California, se localiza la porción mexicana del RC que funciona como límite fronterizo entre los estados de California, Arizona, Sonora y Baja California. Alrededor de 1.7 km, aguas abajo del límite fronterizo extremo norte, entre Baja California y Arizona, en el Lindero Internacional Norte (LIN), se localiza la última presa en el camino del RC, la Presa Derivadora Morelos. A partir de esta presa, el RC se entiende 153 km hasta su encuentro con el Golfo de California.

A los costados del cauce del río se encuentra el corredor ribereño del Delta del RC, el cual abarca las terrazas naturales bajas y medias dentro de los bordos de contención, excluyendo las terrazas altas que en general conforman las zonas agrícolas del valle de Mexicali. Dentro del mismo, a 80 km al sur de la Presa Derivadora Morelos se localiza el Complejo de Restauración Laguna Grande, un área dedicada a la restauración y conservación del hábitat en el corredor ribereño del RC,

adquirida mediante un acuerdo de concesión de terreno suscrito con el gobierno mexicano por las organizaciones de la sociedad civil Sonoran Institute México (SIM) y Pronatura Noroeste. Este complejo de restauración está conformado por tres polígonos de concesión denominados Laguna Larga, CORI y CILA, que en total comprenden 573 ha de corredor ribereño (CILA, 2018) dedicadas a la restauración (Figura 1).

Figura 1

Localización del sitio de estudio



Desde 2010, se han realizado actividades de restauración y conservación dentro del polígono de concesión CILA, siendo este el sitio de restauración con mayor cobertura de vegetación nativa en la parte mexicana del RC, con un total de 86 ha de superficie total sembrada al 2018 (CILA, 2018).

El polígono definido como área de estudio para este trabajo comprende exclusivamente las parcelas de restauración que se encuentran dentro del polígono de concesión CILA, al que para fines de este trabajo se le denominará sitio de restauración Laguna Grande (sitio LG).

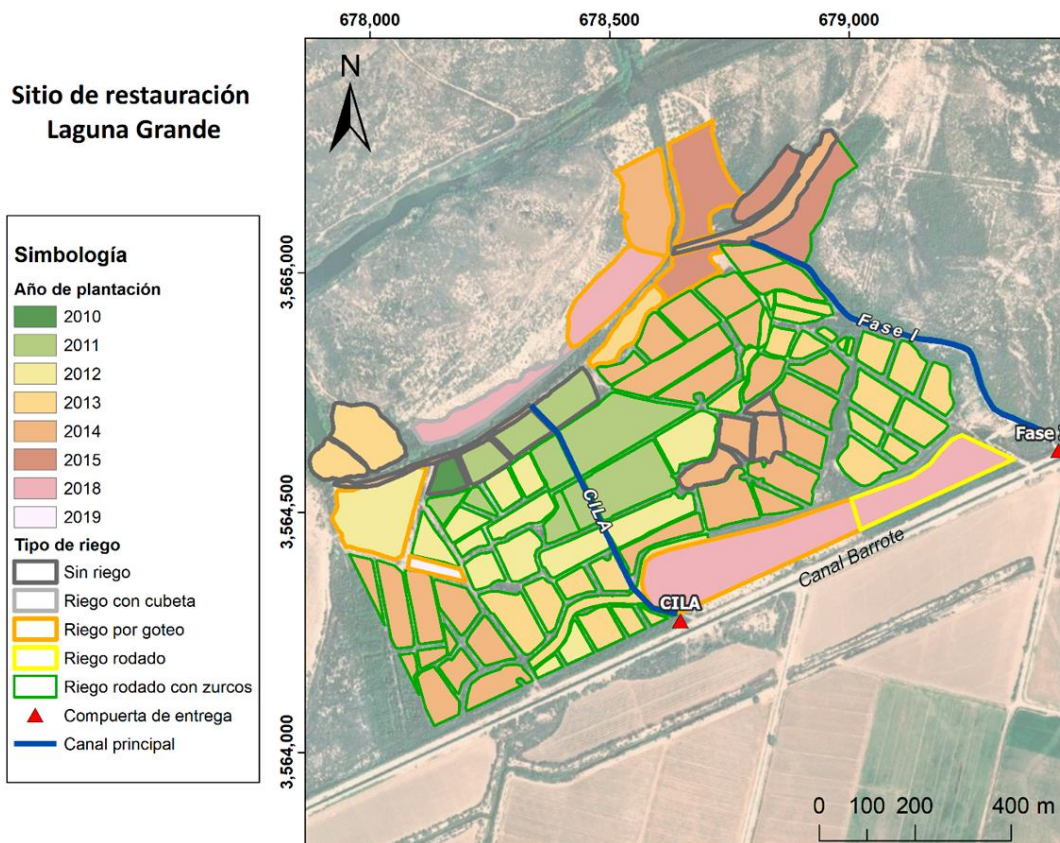
El sitio de restauración LG se divide en parcelas de restauración que varían en cuanto a su tipo de vegetación, al año de plantación y el tipo de riego. Entre los tipos de vegetación reforestadas se encuentran especies nativas de árboles tales como el álamo (*Populus fremontii*), el sauce (*Salix gooddingii* y *S. exigua*) y el mezquite (*Prosopis glandulosa* y *P. pubescens*), así como de arbustos como el batamote (*Baccharis salicina* y *B. salicifolia*). El riego rodado es el tipo de riego que predomina en el sitio (78% de las parcelas de restauración), otra porción de las parcelas (7%) cuenta con sistema de riego por goteo, mientras que la porción restante no cuenta con sistema de riego o se ha dejado de regar.

El agua utilizada para el riego del sitio de restauración proviene del Canal Barrote y se entrega por medio de las compuertas principales denominadas CILA y Fase I (Figura 2) las cuales descargan hacia los canales principales. Posteriormente, el agua es distribuida a través de canales secundarios hacia las parcelas de restauración mediante el control manual por las personas encargadas del riego del sitio.

La geohidrología general aguas arriba del área de estudio muestra una tendencia de flujo subterráneo de noreste a suroeste, así como una dirección preferencial de sureste a noroeste proveniente de los flujos de retorno agrícola de las parcelas aledañas (Ramírez-Hernández et al., 2015) y del Canal Barrote, la profundidad al nivel freático oscila entre los 0 a 5 m. Sin embargo, las entregas de flujos ambientales, tanto en el río como en los sitios de restauración, modifican los patrones de direcciones de flujo temporal y localmente (CILA, 2018).

Figura 2

Parcelas de restauración, canales principales y compuertas de entrega de agua del sitio de restauración Laguna Grande (datos de SIM)



1.3. Justificación

Las actividades de restauración en el sitio Laguna Grande se enfocan en la creación de hábitat ribereño a través de la reforestación con especies nativas mediante diferentes técnicas de plantación. Dada la falta de un caudal ecológico para el Delta del RC, se ha optado por implementar distintos tipos de riego por parcela de restauración que dependen del tipo de hábitat, del tipo de suelo, de la edad de la vegetación y la profundidad del nivel freático. Los volúmenes de agua implementados en este sitio de restauración son parte del agua ambiental designada en las Actas 319 y 323 y aquella que las organizaciones de la sociedad civil compran como derechos de agua agrícola al Distrito de Riego 014 Río Colorado.

La estrategia de irrigación implementada en el sitio Laguna Grande tiene un enfoque agrícola que solo se asemeja a la de otros sitios de restauración en el Delta del RC ([Bunting et al., 2011](#) y [Grabau et al., 2011](#)), sin embargo, los trabajos dedicados al estudio de estos sitios siguen siendo escasos, por lo que existe la necesidad de evaluar la eficacia de las técnicas de restauración utilizadas para determinar la sostenibilidad a largo plazo de los sitios de restauración en el Delta ([Bunting et al., 2014](#)).

Hasta el momento, las decisiones respecto a la cantidad y temporalidad del riego en las parcelas del sitio LG se han tomado con base en el conocimiento empírico. Esto ha traído resultados mixtos como, por ejemplo, que algunas parcelas de restauración presenten mayor índice de mortalidad y de crecimiento con relación a otras (comunicación directa con el personal de SIM). Dada la situación actual de sobreasignación de agua, la sequía hidrológica-administrativa y las proyecciones de disminución de escorrentía por efecto del cambio climático en la cuenca del RC ([CILA, 2017](#)), es indispensable que se utilice la cantidad mínima de agua para asegurar la sostenibilidad de los sitios de restauración en el Delta del RC, por lo que este trabajo pretende generar información que pueda contribuir al manejo adaptativo hidrológico de los sitios para aplicar la cantidad de agua más adecuada.

2. Antecedentes

2.1. Delta del Río Colorado

En México, el RC se extiende aproximadamente 153 km aguas abajo desde la presa Morelos hasta el Golfo de California. El corredor ribereño del RC abarca las áreas naturales dentro de los bordos de contención, excluyendo las zonas agrícolas (Zamora-Arroyo et al., 2005). En las últimas décadas, los flujos superficiales en esta zona han disminuido significativamente y solo han habido flujos mayores a los convenidos en el tratado de 1944 ocasionalmente desde 1960: de 1990 a 2010 el flujo anual promedio fue de 24 hm³, mientras que de 1965 a 2001, el promedio fue de 2,100 hm³ (Cohen, 2013).

A pesar su deterioro, el Delta del RC sigue conservando gran importancia ecológica global, ya que se han detectado más de 370 especies de aves en la zona y es una importante parada en la ruta pacífica norteamericana para las aves migratorias (Hinojosa-Huerta et al., 2007). Los flujos irregulares y las aguas de retorno agrícola han contribuido a la restauración del corredor ribereño del RC, aun siendo altas en salinidad y contaminantes (Luecke et al., 1999). Esta capacidad de adaptación impulsó a grupos de científicos, organizaciones ambientales, dependencias de gobierno y líderes del sector privado a explorar la posibilidad de restaurarlo (Zamora-Arroyo et al., 2008).

En 2005, se publica el documento denominado prioridades de conservación del Delta del Río Colorado (Zamora-Arroyo et al., 2005), en el cual se incluyen los resultados de un taller en el que participaron diversas organizaciones de la sociedad civil, academia, administradores, tomadores de decisiones. En el documento se identificaron 15 zonas como prioritarias para ser restauradas en el Delta y se determinan recomendaciones para la conservación y restauración de los ecosistemas de estas zonas. Una de las zonas determinadas como prioritarias fue el corredor ribereño del Delta del RC.

Una de las áreas dedicadas a la creación y conservación de hábitat en el corredor ribereño del Delta del RC es el CRLG. Este se localiza dentro de la porción del corredor ribereño que se caracteriza por contar con niveles someros de agua subterránea y agua superficial en su cauce durante la mayor parte del año (Shafroth et al., 2017) por efecto del flujo de retorno de riego agrícola del valle de Mexicali (Ramírez-Hernández et al., 2015). Los esfuerzos de restauración en la zona comenzaron en 2005, con la remoción de vegetación invasiva como *Tamarix spp.* (pino salado) y con la

reforestación de especies de árboles nativos (Pitt y Kendy, 2017) tales como *Populus fremontii* (álamo), *Salix gooddingii* (sauce) y diversas especies de mezquites. El aseguramiento del recurso hídrico para la restauración se realizó con la compra de derechos de agua a los agricultores del Distrito de Riego 014 Río Colorado (Zamora-Arroyo et al., 2008), el cual maneja y distribuye el agua de uso agrícola y rural mediante 22 módulos de riego.

2.1.1. Flujos históricos

Alrededor del año 1896, antes del establecimiento de comunidades humanas en los márgenes del río, la totalidad de los flujos del RC llegaban al Delta (Ramírez-Hernández et al. 2015), los cuales sostenían aproximadamente 800,000 ha de hábitat ribereño, estuarino y de marisma (Sykes, 1937). La rápida reducción de los flujos superficiales debido al control hidráulico del río desde los años 1900, el bombeo del agua subterránea (Carrillo-Guerrero et al., 2013) y la transformación de las llanuras de inundación en zonas agrícolas contribuyó a la pérdida de más del 90% de los humedales en el Delta (Glenn et al., 2001).

Los flujos históricos en el Delta han sido medidos o estimados por diferentes autores y fueron compilados por Ramírez-Hernández et al. (2015) en la tabla 1. Como parte de los esfuerzos para la conservación del Delta, se han realizado estudios para calcular el volumen mínimo necesario para preservarlo. Luecke et al. (1999) estimaron que el volumen mínimo funcional para la vegetación ribereña en el Delta del RC es de 3,200 hm³ con caudales que van desde los 100-200 m³s⁻¹.

Tabla 1

Descargas de flujo históricas en el Delta del RC

Fuente	Descarga (m ³ s ⁻¹)	Periodo	Descripción
Sykes (1937)	6,000	Histórico	Máximo
Fradkin, (1981) en Glenn et al. (1996)	656	1896-1921	
Fradkin, (1981) en Glenn et al. (1996)	459	1931-1940	Década seca
Luecke et al. (1999)	100-200	Enero-abril 1997	Apto para la vegetación ribereña en el Delta del RC
Zamora-Arroyo et al. (2001)	80-120	Febrero-abril 1997	Suficiente para inundar la mayor parte de las llanuras de inundación, documentaron el agua alcanzando el Golfo de California y la Laguna Salada

Fuente	Descarga (m ³ s ⁻¹)	Periodo	Descripción
Tetra Tech (2004)	583-617	10 años	Periodo de retorno de modelado (Reporte técnico)
	880-1,350	50 años	
	1000-1,900		
Gleen et al. (2008)	800	1980s	Flujo pico
	583-617	10 años	Periodo de retorno de modelado
	910-1,370	50 años	
	1,036-1,954	100 años	
Quesada (2007)	800	Máxima capacidad de descarga	Sección km 75-92 del RC en México (zona de restauración)
CONAGUA (2012)	800	1980s	Flujo pico

Nota. Adaptado de “Mimic pulse-base flows and groundwater in a regulated river in semiarid land: Riparian restoration issues,” de J. Ramírez-Hernández et al., 2015

[Ramírez-Hernández et al. \(2015\)](#) realizaron un modelo para simular diversos flujos superficiales y obtener la inundación para la sección del RC que abarca el CRLG. Los resultados indicaron que una descarga de 10 m³s⁻¹ de agua es esencial para recuperar los beneficios de los flujos base como el mantenimiento de superficies inundadas, cuerpos de agua y la conectividad del cauce principal con los meandros. Además, concluyeron que un caudal de 200 m³s⁻¹ tiene el potencial de lograr la conectividad lateral entre el río y las llanuras de inundación, de humedecer las superficies del suelo y de elevar el nivel freático de manera que se puedan cumplir los principales objetivos hidrológicos de un Flujo Pulso.

2.1.2. Restauración

La restauración de ecosistemas impactados por el humano, entre ellos los ecosistemas ribereños, pueden significar grandes retos debido a las incertidumbres y la inhabilidad para restablecer los factores bióticos y abióticos necesarios para el funcionamiento del ecosistema ([Suding, 2011](#); [Suding et al., 2004](#)).

A menudo, los esfuerzos de restauración para promover el reclutamiento de la vegetación ribereña incluyen el manejo de las descargas de agua, de manera que se imite el régimen de flujo previo a la regulación del río ([González et al., 2015](#); [Rood et al., 2005](#)). Sin embargo, los flujos ambientales

pueden estar limitados por diferentes factores, como lo es la disponibilidad del agua, la operatividad y/o capacidad de la infraestructura hidráulica para su derivación, entre otros, por lo que pueden ser insuficientes para cumplir con los requerimientos necesarios para el reclutamiento de la vegetación (Shafroth et al., 2017), además, se ha demostrado que el manejo de los flujos por sí solos son exiguos para la restauración de los procesos del ecosistema (Cooper y Andersen, 2012). Para estos casos, se ha optado por combinar la gestión activa del terreno con descargas de flujo para producir condiciones que favorezcan el establecimiento de plántulas (Shafroth et al., 2017).

En el caso del Delta del RC, el objetivo de restauración es mantener las poblaciones de vegetación nativa y mejorar la calidad del hábitat mediante la descarga de flujos ambientales junto con estrategias de gestión activa para promover el reclutamiento y establecimiento de álamos y sauces (Schlatter et al., 2017). Entre estas acciones de gestión, se encuentra la remoción de vegetación invasora, como el pino salado, para favorecer la germinación y establecimiento de la flora nativa; la implementación de sistemas de riego y la reforestación mediante diferentes técnicas de plantación.

2.1.3. Acta 319

Ante los esfuerzos por la recuperación ambiental del Delta de la sociedad civil en conjunto con academia y gobierno, en 2012 se firmó el Acta 319 (CILA, 2012), una adenda al Tratado de Aguas Internacionales de 1944 que destinó 195 hm^3 de agua al Delta para uso ambiental por un periodo de cinco años (2012-2017) entre otras disposiciones, siendo este el primer acuerdo binacional en el que se designó agua exclusivamente para su uso ambiental en la sección mexicana del RC. Científicos y expertos diseñaron un plan de entregas para la descarga de agua que imitaría (por lo menos en la forma del hidrograma, no en la intensidad) las escorrentías de primavera anteriores a la construcción de presas en el RC, con el propósito de estudiar las respuestas ecológicas e hidrológicas de los flujos, el cual consistió en la liberación de aproximadamente 130 hm^3 para un Flujo Pulso y 65 hm^3 para flujos base en el año 2014 (CILA, 2018).

El Flujo Pulso fue una oportunidad para evaluar la respuesta del sistema ecohidrológico e hidrogeológico a la aplicación de flujos en el Delta del RC y del cual surgieron varios estudios que han sido de gran utilidad para la toma de decisiones en la restauración ribereña (Jarchow et al., 2017; Kendy et al., 2017; Mueller et al., 2017; Ramírez-Hernández et al., 2017; Rodríguez-

[Burgueño et al., 2017](#); [Shanafield et al., 2017](#)). Fueron dos los trabajos que se enfocaron en los sitios de restauración ribereña del Delta, en donde se evaluaron las tasas de germinación y establecimiento de plántulas ribereñas en comparación con los sitios no acondicionados (no restaurados). Los cuales se resumen a continuación:

[Shafroth et al. \(2017\)](#) encontraron que en los sitios donde no hubo gestión activa del terreno, los flujos experimentales no lograron promover el establecimiento de plántulas ribereñas, con excepción de la especie invasora del pino salado. Entre las causas se encontraron la escasez de semillas, humedad del suelo insuficiente durante el periodo de crecimiento debido a las profundidades del nivel freático y a la falta de disponibilidad de suelo desnudo. En contraste, las áreas de manejo activo del terreno contribuyeron a tasas de reclutamiento de vegetación significativamente más altas en comparación a los sitios no restaurados. De manera similar, los resultados de [Schlatter et al. \(2017\)](#) sugieren que el manejo del sitio puede incrementar el éxito de reclutamiento de álamo y sauce para los eventos de flujo de baja magnitud. Hallaron que los álamos y sauces se establecieron únicamente en los sitios húmedos y en los que fue removida la vegetación invasiva. Los suelos húmedos, la disponibilidad de suelo descubierto, la salinidad del suelo y la disponibilidad de semillas fueron factores significativos que contribuyeron a la germinación, mientras que la salinidad y textura del suelo afectaron a la persistencia de las plántulas durante el periodo de crecimiento.

2.1.4. Acta 323

Al concluir el Acta 319 en el año 2017, se firmó el Acta 323, la cual destina 259 hm³ de agua para flujos ambientales y financiamiento para la investigación científica, monitoreo y proyectos de restauración por un periodo de nueve años (2018 – 2026), teniendo como meta expandir las 435 ha existentes de hábitat nativo restaurado a 1,700 ha ([CILA, 2017](#)) y conservar las áreas restauradas implementadas por efecto del Acta 319, entre ellas el sitio de restauración LG.

En el apartado VIII Medio Ambiente del Acta 323 ([CILA, 2017](#)) inciso A, se estipula que Estados Unidos, México y las organizaciones no gubernamentales (ONG) proveerán cada uno un tercio de los volúmenes destinados como flujos ambientales, en el inciso B del mismo apartado se indica que el agua del compromiso ambiental del gobierno de los Estados Unidos se suministrará en los primeros cinco años del Acta 323. Por lo anterior, durante los años 2021 y 2022 se realizaron entregas de agua ambiental de origen federal, es decir, agua ambiental comprometida por alguno

de los dos gobiernos, en este caso del tercio de Estados Unidos. Estas entregas de agua federal se realizaron mediante la red hidráulica del DR014 en sitios de entrega operados por las ONG. Restauremos el Colorado A.C. es la asociación que solicita, recibe, mide, concilia ante los módulos del DR014 y administra los flujos ambientales.

3. Marco teórico-conceptual

3.1. Balance hidrológico

El balance hidrológico consiste en comparar la cuantificación de las entradas y salidas de agua durante un periodo para un sistema hidrológico superficial o subterráneo. Si el volumen total de salidas no es igual al de las entradas, se dice que existe un cambio en el almacenamiento durante el periodo de tiempo determinado. La ecuación del balance hidrológico se basa en la ecuación de continuidad, y de manera general se expresa de la siguiente forma (Dingman, 2015; Freeze y Cherry, 1979):

$$\Sigma \text{entradas} - \Sigma \text{salidas} = \Delta \text{almacenamiento}$$

Donde:

Σ entradas: Suma de las variables de entrada (L^3)

Σ salidas: Suma de las variables de salida (L^3)

Δ almacenamiento: Cambio en el almacenamiento (L^3)

Para este trabajo se consideran como entradas de agua las variables de precipitación, la entrada de flujo superficial o subterráneo al sistema. Las salidas incluyen la evapotranspiración, evaporación directa y la salida de flujo superficial o subterráneo del sistema durante un periodo predeterminado de tiempo. Cuando la entrada de agua es mayor a la salida el almacenamiento aumenta, y cuando ocurre lo contrario disminuye.

3.2. Vegetación ribereña

Un ecosistema ribereño se define como la transición entre los ecosistemas terrestres y los acuáticos, se caracterizan por sus frecuentes periodos de inundación que resultan clave para la distribución del agua y determinar los gradientes de flujos de materia y energía (NCR, 2002). Estos ecosistemas contienen vegetación ribereña, las cuales son un complejo de comunidades de plantas presentantes en las zonas ribereñas con capacidad de sobrevivencia ante periodos de inundación.

La vegetación ribereña ofrece diversos servicios ambientales, entre ellos destaca la disminución de la erosión de las orillas de los ríos y reducción de las escorrentías superficiales, contribuyendo así a la recarga del acuífero (NCR, 2002; Riis et al., 2020). Al mismo tiempo, el mantenimiento

de la dinámica hidrológica en los ecosistemas ribereños permite el desarrollo de una comunidad vegetal estructurada y diversa que provee de hábitat a una gran variedad de especies ([Carabias et al., 2015](#)).

3.3. Flujos ambientales

Los flujos ambientales son definidos en la [Declaración de Brisbane \(2007\)](#) como la “cantidad, tiempos y calidad de flujos de agua requeridos para sostener los ecosistemas de agua dulce y estuarinos, así como la subsistencia humana”.

En el Delta del RC, la definición anterior no se aplica en toda su extensión, en su lugar se han denominado flujos ambientales a los obtenidos por la sociedad civil o gobierno a partir de la compra de concesiones de agua a los usuarios del DR014 para la implementación de riego en los sitios de restauración y a los volúmenes de agua que se implementaron en los acuerdos de las Actas 319 y 323. Todos estos volúmenes de agua tienen como propósito mejorar los beneficios ambientales que proveen estos sitios, sin embargo, no fueron cuantificados, aplicados o tienen la calidad a la que se refiere la definición de la [Declaración de Brisbane \(2007\)](#).

3.4. Restauración ecológica

La Sociedad por la Restauración Ecológica ([SER, por sus siglas en inglés](#)) (2004) define la restauración ecológica como “el proceso de asistir en la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido”. [Carabias et al., \(2007\)](#) expone que cuando se busca recuperar las condiciones de origen del ecosistema, las acciones para la restauración ecológica deben orientarse a replicar las condiciones de origen de este, por lo que conocer su composición, estructura y funcionamiento es fundamental.

[Martin \(2012\)](#) propone complementar la definición de [SER, 2004](#) a: la restauración ecológica es el proceso de asistir en la recuperación de un ecosistema degradado, dañado o destruido para reflejar los valores considerados inherentes en el ecosistema y proveer bienes y servicios que las personas valoran.

En el Delta del RC, las acciones de restauración del ecosistema ribereño se enfocan en la creación de hábitat a través de la reforestación con especies de vegetación nativa como álamos y sauces, favoreciendo la germinación y establecimiento de éstas mediante la remoción de especies de

plantas invasoras como el pino salado, implementando flujos ambientales directamente a los sitios y/o en el cauce del río (Bunting et al., 2011; Valdez-Villavicencio et al., 2021). No se considera replicar las condiciones originales del ecosistema por dos razones, la primera es que no se conoce con certeza esas condiciones y la segunda es que para replicar las condiciones del ecosistema como se cree que se tenían antes de su degradación se requerirían enormes volúmenes de agua y la ampliación del hábitat ribereño actual a una importante porción del valle agrícola de Mexicali.

3.5. Manejo adaptativo

El manejo adaptativo es un enfoque sistemático que pretende mejorar la práctica de la restauración al implementar acciones basadas en el conocimiento científico actual y en el que el aprendizaje se obtiene a través del diseño e implementación de acciones de manejo como experimentos (Gann et al., 2019; Murray y Marmorek, 2003). Involucra un diseño, planeación y selección de indicadores del ecosistema que permitirán medirse con el tiempo a través del monitoreo, con la finalidad de aprender del proceso y adaptarse a las necesidades el proyecto (Moreno-Casasola Barceló, 2009).

Al tener como base el conocimiento científico, el manejo adaptativo permite reducir la incertidumbre en la restauración de ecosistemas mediante la toma de decisiones oportunas (Love et al., 2018). Esto incluye cambios de dirección y la implementación de nuevas acciones de restauración que obedecen a los resultados del monitoreo (Gann et al., 2019).

El concepto de manejo adaptativo a menudo se presenta de manera simplificada como un diagrama circular que consta de cuatro a seis pasos (Murphy y Weiland, 2014). En la Figura 3 se presenta la propuesta de Conservation Measures Partnership (2013) como un ciclo de cinco pasos a seguir y tres o cuatro acciones que deben ocurrir en cada uno de ellos.

Figura 3

Los cinco pasos del ciclo del manejo adaptativo



Nota. Adaptado de [Conservation Measures Partnership \(2013\)](#)

3.6. Suelo

[Crespo \(2014\)](#) define al suelo como “la delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración de física y/o química de las rocas y de los residuos que los seres vivos que sobre ella se asientan”.

Para propósito de este trabajo es conveniente conocer también la definición de suelo desde el punto de vista agrícola. Según [Tschebotarioff \(1958\)](#), el suelo es la delgada capa superior de la superficie de donde las plantas adquieren el agua y las demás sustancias necesarias para su existencia.

3.6.1. Textura del suelo

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de las clases de tamaño de partícula inferior a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) en un volumen de suelo dado ([FAO, 2009](#)). A partir de su combinación se generan las clases texturales ([SEMARNAT, 2002](#)).

Según la terminología establecida por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) las partículas menores a 2 mm de diámetro ($\emptyset$) se clasifican como:

- Arena muy gruesa $2\text{ mm} > \emptyset > 1\text{ mm}$
- Arena gruesa $1\text{ mm} > \emptyset > 0.5\text{ mm}$
- Arena media $0.5\text{ mm} > \emptyset > 0.25\text{ mm}$
- Arena fina $0.25\text{ mm} > \emptyset > 0.10\text{ mm}$
- Arena muy fina $0.10\text{ mm} > \emptyset > 0.05\text{ mm}$
- Limo $0.05\text{ mm} > \emptyset > 0.002\text{ mm}$
- Arcilla $\emptyset < 0.002\text{ mm}$

3.7. Agua subterránea

Se le conoce como agua subterránea al agua que se encuentra en la capa freática de los suelos y en formaciones geológicas saturadas conocidas como acuíferos. Un acuífero es una formación geológica que puede almacenar y transmitir cantidades de agua significativas bajo gradientes hidráulicos ordinarios ([Freeze y Cherry, 1979](#); [Fetter, 2001](#)).

Los acuíferos pueden encontrarse cubiertos por una formación geológica de materiales de muy baja o nula permeabilidad llamada capa confinante y a estos se les conoce como acuíferos confinados. Un acuífero libre o no confinado se encuentra cercano a la superficie terrestre y tiene capas continuas de materiales de alta permeabilidad intrínseca que se extienden desde la superficie terrestre hasta la base del acuífero ([Fetter, 2001](#)). La recarga en un acuífero libre puede ocurrir por infiltraciones verticales y/o por flujos subterráneos horizontales. A la parte superior de un acuífero libre se le conoce como capa freática, manto o nivel freático.

3.8. Evaporación directa

La evaporación es el proceso en el que el agua en su estado líquido o sólido en la superficie terrestre se convierte en vapor y llega a la atmósfera. Se le conoce como evaporación potencial (E_o) a la tasa de evaporación que ocurre en una superficie de agua abierta bajo las condiciones meteorológicas específicas del lugar ([Dingman 1994](#)).

[Penman \(1948\)](#) fue el primero en proponer una ecuación para el cálculo de la E_o que no requiere datos de temperatura superficial del agua, al combinar los métodos de transferencia de masa y de balance de energía. Esta metodología se ha convertido en el método estándar en el cálculo de la

evaporación directa en hidrología (Dingman 1994). La ecuación Penman se puede representar de la siguiente forma:

$$E_o = \frac{\Delta R_n + \gamma E_{ap}}{\Delta + \gamma}$$

Donde:

E_o = evaporación potencial

R_n = radiación neta

γ = constante psicrométrica

E_{ap} = parte aerodinámica

Δ = pendiente de la curva de saturación del vapor

3.9. Evapotranspiración

La evapotranspiración es uno de los elementos más importantes del ciclo hidrológico. La estimación de la evapotranspiración es imprescindible para una gestión eficaz de los recursos forestales, de riego, de pastizales y del agua, así como para aumentar los rendimientos y mejorar la gestión de los cultivos (Shamloo et al., 2021).

Se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de los procesos de evaporación (directamente del suelo, ver sección 3.8) y de transpiración (desde la vegetación), mediante los cuales el agua se incorpora a la atmósfera, lo que representa pérdidas de agua. La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en la planta y su remoción hacia a la atmósfera, predominantemente a través de las estomas (Allen et al., 2005).

3.9.1. Evapotranspiración de referencia

Se le conoce como evapotranspiración de referencia (ET_o) a la tasa de evapotranspiración que ocurre en una superficie de referencia, la cual consiste en un cultivo hipotético de pasto con características específicas y sin restricciones de agua (Allen et al., 1998).

Se pueden comparar valores de ET_o en diferentes regiones o épocas del año, ya que se hace referencia a la ET bajo la misma superficie de referencia. La ET_o es un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos (Allen et al., 2005).

3.9.2. Evapotranspiración del cultivo

Se le denomina evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) a la evapotranspiración que ocurre en un cultivo que se desarrolla en campos extensos, bajo condiciones agronómicas excelentes y sin limitaciones de humedad en el suelo (Allen et al., 2005).

La evapotranspiración de un cultivo depende de sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica, por lo que diferirá de la ET_o en la medida que estas condiciones varíen a las del pasto. Estas diferencias se incorporan en un coeficiente de cultivo (K_c), por lo tanto (Allen et al., 1998):

$$ET_c = ET_o * K_c$$

3.9.3. Coeficiente del cultivo

Mientras que la ET_o representa un indicador de la demanda climática, el valor del K_c varía principalmente en función de las características del cultivo. El K_c es el cociente entre ET_c y ET_o y representa el efecto de las características principales que diferencian a un cultivo específico del cultivo de pasto de referencia: altura del cultivo, albedo, resistencia del cultivo y la evaporación que ocurre en el suelo (Allen et al., 1998).

3.10. Requerimiento hídrico de la vegetación

Generalmente, la ET de un ecosistema bajo condiciones sin estrés hídrico es considerada la medida del requerimiento hídrico de un ecosistema (Yuan et al., 2016; Liu et al., 2010), esto es, la cantidad de agua mínima para cumplir con las necesidades básicas de un ecosistema natural (Gleick, 1998).

Allen et al. (1998) define las necesidades de agua de cultivo como la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo, sin incluir el agua adicional necesaria para el lavado de sales y compensaciones por falta de uniformidad en la aplicación de agua.

Para fines de este trabajo, se utilizará la definición de Allen et al. (1998) al referirse al requerimiento hídrico de la vegetación.

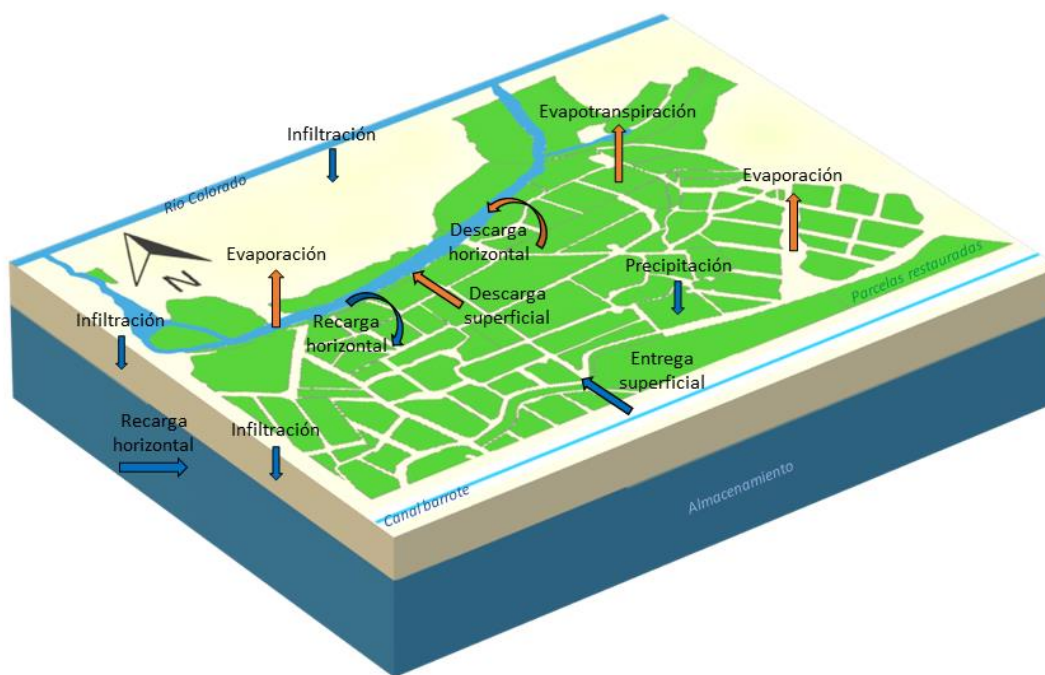
4. Materiales y métodos

4.1. Definición de las variables del balance hidrológico

Con la finalidad de determinar las variables hidrogeológicas que comprenden el balance hidrológico del sitio de restauración LG, se realizó un modelo conceptual de los procesos presentes en el sitio de acuerdo con las visitas de campo y al análisis de información antecedente de otras investigaciones (Rodríguez-Burgueño, 2011; Pérez-González, 2008; Ramírez-Hernández, 2015). Las variables que comprenden las entradas y salidas de aguas tanto superficiales como subterráneas al sitio de restauración LG se muestran en la Figura 4. Cada una de estas variables se describe a continuación.

Figura 4

Modelo conceptual del balance hidrológico en el sitio LG



Entradas de agua

1. **Entregas de agua ambiental.** Son los volúmenes de agua utilizados para el riego de las parcelas de restauración provenientes del Río Colorado. Estos volúmenes, derivados mediante el canal de la red hidráulica del DR014 denominado como Barrote son

entregados por medio de las compuertas conocidas como CILA y Fase I al sitio LG. Dentro del área de estudio, el agua es distribuida desde los canales principales hacia las parcelas de restauración por medio de canales secundarios. Para fines de este proyecto, esta variable también incluye al agua proveniente de los flujos ambientales y/o de los retornos agrícolas que son descargados superficialmente al cauce del RC y que llegan al meandro ubicado dentro del área de estudio.

2. **Recargas horizontales.** Se refieren al ingreso de agua subterránea al sitio de estudio debido a la diferencia de potencial hidráulico subterráneo por cambios en la elevación del nivel freático dentro y fuera del sitio. Dado que el nivel de agua en el cauce del RC está conectado hidráulicamente con el acuífero, cuando el nivel del río alcanza un nivel superior al del acuífero se produce una salida de agua del río al acuífero, recargando de forma subterránea el área de estudio. Por el contrario, si el agua en el acuífero por el ingreso de agua desde las parcelas agrícolas es mayor que el nivel del agua en el RC, entonces el acuífero cede agua al RC saliendo del área de estudio. La diferencia de potencial entre el acuífero en el sitio de estudio, el agua en el RC y el acuífero en las parcelas agrícolas y la conductividad hidráulica determina la intensidad de este intercambio de agua.
3. **Recargas verticales.** Es la porción del agua aplicada en la superficie del terreno para regar las parcelas de restauración que se infiltra y que se estima llega al nivel freático como recarga. Se produce principalmente en las parcelas con riego de riego rodado.
4. **Precipitación.** Es el agua que cae de la atmósfera y que llega a la superficie terrestre en el sitio LG. Se supone que una porción de ella se incorpora a los cuerpos de agua, otra se infiltra alcanzando el nivel freático y otra se evapora.

Salidas de agua

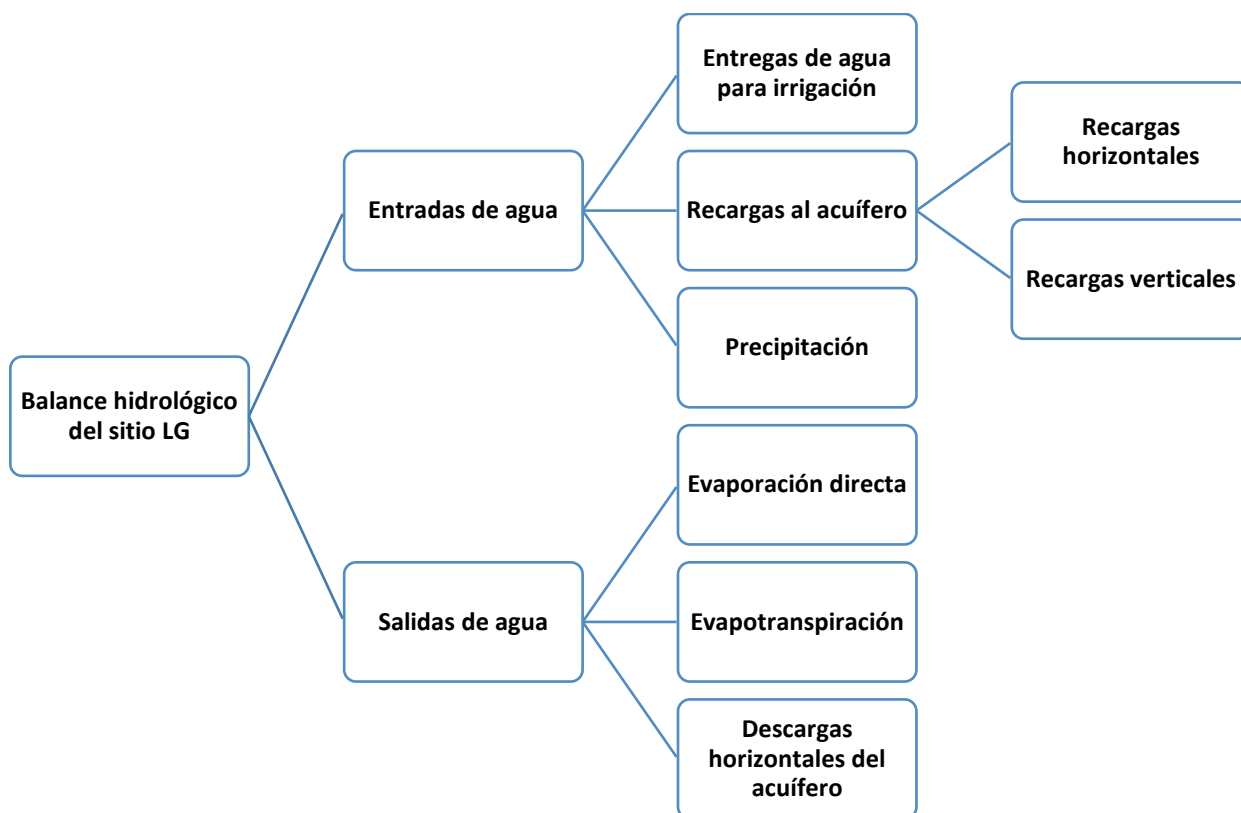
1. **Evaporación directa.** Incluye al agua que se evapora de una superficie de agua libre, para fines de este trabajo se estimó la evaporación directa del meandro que se encuentra dentro del área de estudio.
2. **Evapotranspiración.** Es el agua que se incorpora a la atmósfera como consecuencia de la transpiración de la vegetación y de la evaporación del agua en el sitio de restauración.

3. **Descargas subterráneas.** Al igual que las recargas verticales, las descargas subterráneas ocurren por diferencia de potencial tanto subterráneo como superficial, desde el acuífero al río, meandro y/u otras zonas del acuífero superficial, es decir, cuando la elevación del nivel freático es mayor, el acuífero cede agua perdiendo agua por flujos subterráneos.

En diagrama de la Figura 5 se desglosan las variables del balance hidrológico consideradas en este trabajo. Entre las entradas de agua se encuentran las variables de precipitación, entregas de agua y recarga al acuífero, donde se incluyeron tanto las recargas horizontales como las verticales de cualquier procedencia. Las salidas de agua están conformadas por las variables de evaporación directa; la evapotranspiración y las descargas subterráneas.

Figura 5

Variables que participan en el balance hidrológico del sitio LG



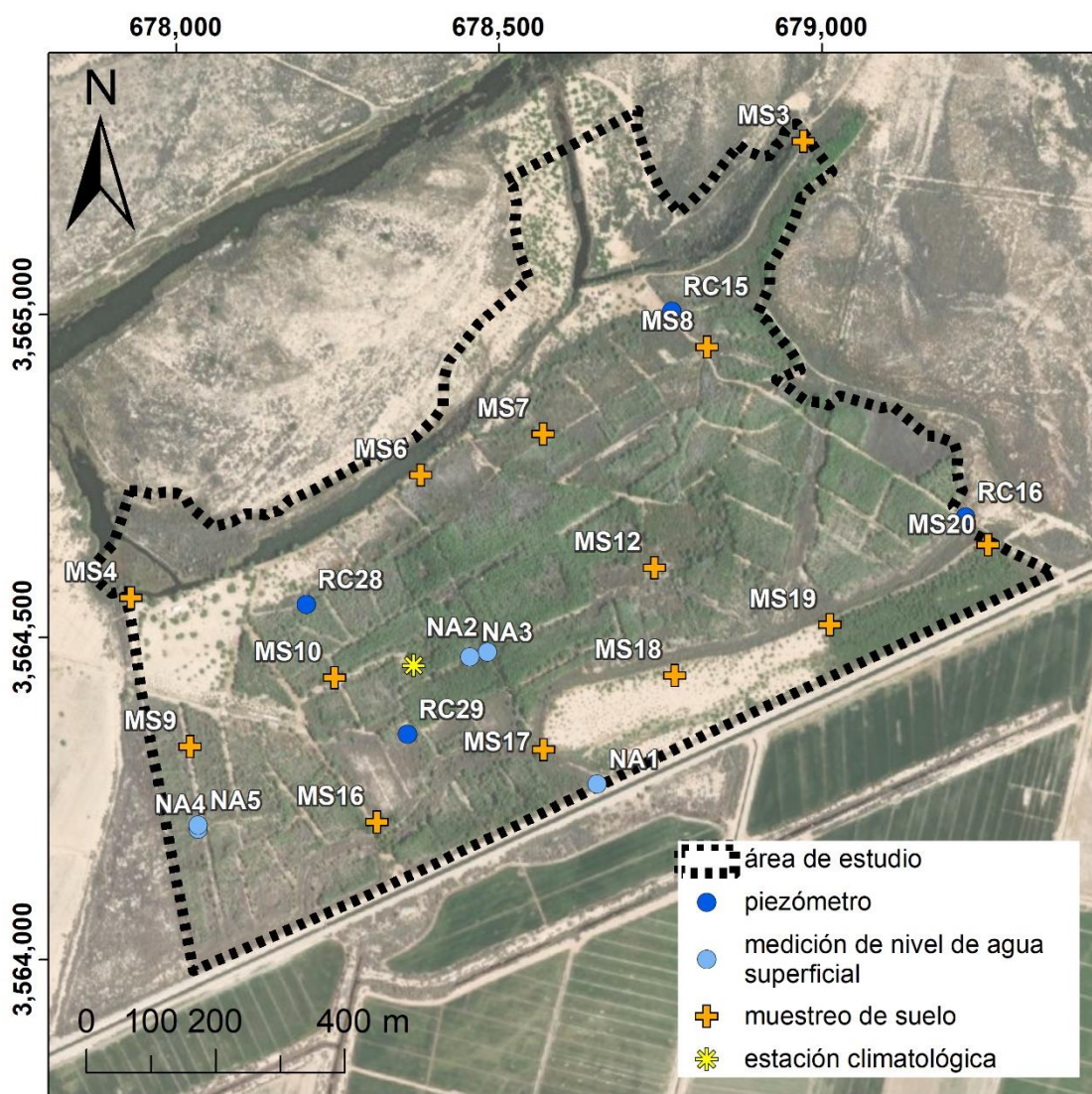
4.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en visitas al sitio de estudio para la instalación de los instrumentos de monitoreo, descarga de datos y medición de las variables hidrológicas y climáticas. Se realizaron monitoreos hidrológicos (mediciones de niveles freáticos y de niveles de agua superficial), de microclima (mediante la instalación y descarga de datos de una estación climatológica) y un muestreo de suelos en el sitio LG (Figura 5). Los monitoreos hidrológicos y de microclima se llevaron a cabo mensualmente, se realizaron de enero de 2021 a enero de 2022. Se realizó también un muestreo de suelos. Cada uno de ellos se describe detalladamente a continuación.

4.2.1. Monitoreos hidrológicos

4.2.1.1. Mediciones de nivel freático

Este monitoreo se llevó a cabo mensualmente del 25 de enero de 2021 al 31 de enero de 2022, consistió en la medición manual y automática de la profundidad al nivel freático en cuatro piezómetros propiedad de la UABC ubicados dentro del sitio LG denominados RC15, RC16, RC28 y RC29 (Figura 6). Este se realizó conforme a los procedimientos técnicos protocolarios para la medición de la profundidad del nivel freático en piezómetros; Dichos estándares fueron establecidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y por el equipo de monitoreo hidrológico del Acta 323.

Figura 6*Sitios de monitoreo en el sitio Laguna Grande***Procedimiento**

Para las mediciones manuales se utilizó una sonda electroacústica de precisión milimétrica marca Solinst® (Figura 7), la cual emite un sonido cuando se cierra el circuito al entrar en contacto con la superficie del agua y que además mide la temperatura y la conductividad eléctrica del agua. Las mediciones automáticas se realizaron con sensores para el registro continuo de las variaciones de presión absoluta instalados en los piezómetros, los cuales registraron datos a cada hora. Las mediciones manuales y la descarga de los datos de los sensores se realizaron mensualmente.

Los datos obtenidos durante el monitoreo de cada piezómetro se registraron en un formato de campo, en donde se integra la siguiente información: fecha y hora de la medición, los datos de profundidad al nivel freático, desde el punto de medición en el brocal del piezómetro, la profundidad total del piezómetro, la conductividad eléctrica y la temperatura del agua.

Estos datos fueron obtenidos, archivados, compensados por presión barométrica, corregidos por deriva y revisados con ayuda del personal del laboratorio de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente del Instituto de Ingeniería de la UABC, con financiamiento de CILA y The Nature Conservancy. Los datos obtenidos de este monitoreo se utilizaron para la estimación de la recarga y descarga subterránea.

Figura 7

Medición del nivel piezométrico en el piezómetro RC15 en la zona de estudio



4.2.1.2. Mediciones de nivel de agua superficial

La descarga de datos de los sensores para registro de nivel de agua superficial y la medición manual del nivel de agua se realizó mensualmente de mayo de 2021 a febrero de 2022, con la finalidad de monitorear las variaciones del nivel superficial en los canales de riego y obtener una curva de calibración entre caudal y nivel de agua (tirante) para estimar caudales continuos.

Se instalaron cinco sensores automáticos marca HOBO® para medir presión absoluta con el propósito de estimar los caudales en los canales: uno en el canal principal CILA, dos en los canales secundarios y dos en las parcelas de restauración (Figura 6), sin embargo, no se logró obtener las mediciones de la velocidad del agua suficientes para hacer una calibración adecuada (al menos tres datos de velocidad por sensor), por lo que los datos no se utilizaron en este trabajo.

Instalación de sensores para medir presión absoluta

- 1) Se utilizaron seis tubos de PVC de 1.5 in de diámetro y 20 cm de longitud, los cuales fueron ranurados con taladro.
- 2) Los seis tubos se forraron con dos vueltas de tela poliéster como filtro. Esto con el propósito de permitir la entrada de agua y al mismo tiempo evitar la entrada de sedimento.
- 3) A cada tubo se le integró una tapadera inferior. Se introdujeron los sensores automáticos ya programados para tomar datos a cada hora. Se cerraron con la tapadera superior.
- 4) Los tubos se sujetaron a varillas y posteriormente se clavaron en cada sitio (Figura 8).

Figura 8

Sensor para medir presión, instalado en una sección de aforo



4.2.2. Monitoreo del microclima

Este monitoreo se llevó a cabo del 1 de enero de 2021 al 31 de enero de 2022. Las variables climatológicas en el sitio se midieron con una estación climatológica marca Davis Instruments® modelo Vantage Pro2 instalada en el sitio LG (Figura 6). La estación climatológica cuenta con un conjunto de sensores que realizan mediciones continuas y automáticas de temperatura, humedad, punto de rocío, presión barométrica, lluvia y radiación solar. Adicionalmente, cuenta con un anemómetro que mide la velocidad y dirección del viento. Estos instrumentos están conectados a un módulo que transmite continuamente los datos hacia la consola de forma inalámbrica y que permite visualizar las mediciones en tiempo real, así como los mínimos, máximos y promedios históricos.

Los datos medidos se registraron cada hora y fueron descargados mensualmente de la consola a una computadora utilizando el software WeatherLink® y el cable de transferencia de datos del sistema. Estos datos fueron utilizados para estimar la evaporación y la evapotranspiración en el sitio, además pueden ser de utilidad para futuras investigaciones relacionadas con el hábitat, aves, microclima, entre otros.

Instalación de estación climatológica

La estación climatológica fue instalada en el sitio LG durante el mes de noviembre de 2020, se localizó en un sendero despejado en medio del bosque de manera que se registraran las variables generadas por el hábitat sin obstruir los sensores de radiación solar y pluviómetro (Figura 9).

Figura 9

Instalación de estación climatológica en el sitio LG



Para realizar la instalación de la estación primero se enterró un tubo de tres metros de largo a 1 m de profundidad, quedando 2 m sobre la superficie del suelo. Para asegurar la estabilidad del tubo, se colocó una base de metal de 1 m de altura que fue previamente elaborada. Las cuatro extensiones de la base se fijaron con varillas clavadas al suelo y con un nivel de burbuja se determinó la horizontalidad de la estructura, verificando que el tubo quedara perpendicular al suelo.

El conjunto de sensores de la estación fue atornillado al tubo a 1.5 m de altura, orientado hacia el sur para que el panel solar quedara expuesto al sol. El anemómetro se situó 30 cm sobre el conjunto de sensores orientado hacia el norte, por motivos de calibración del sistema. Además, al tubo se atornilló una caja de metal cuyo propósito es resguardar la consola a la que se transmiten los datos del conjunto de sensores, que muestra los datos del clima en tiempo real y de donde se descargarán los datos.

4.2.3. Muestreo de suelos

El muestreo de suelo se realizó durante el mes de abril de 2021. Se utilizó el método de la cuadrícula para definir los puntos de muestreo en el sitio (Figura 10) y se descartaron los puntos que quedaron fuera del sitio o que, por las condiciones del terreno, fueran inaccesibles. Se inició el muestreo con un sistema de barrena manual, sin embargo, la barrera dejó de ser funcional a partir de que se alcanzó el suelo saturado. Debido a que se necesitaba extraer muestras de hasta 5 m de profundidad y a que el nivel freático en la zona se encontró a menos de 2 m, se utilizó una perforadora de pozos.

La perforadora utilizada es de sistema de golpe con extensiones a cada 1.5 m; el operador de la perforadora ensambla las secciones longitudinales para lograr las profundidades de muestreo requeridas. Por cada muestra se obtuvieron aproximadamente 2 kg de suelo y cada una fue cuarteada, homogeneizada, embolsada y etiquetada con su respectiva clave, fecha de extracción y profundidad (Figura 11).

Figura 10

Definición de puntos de muestreo por método de la cuadrícula

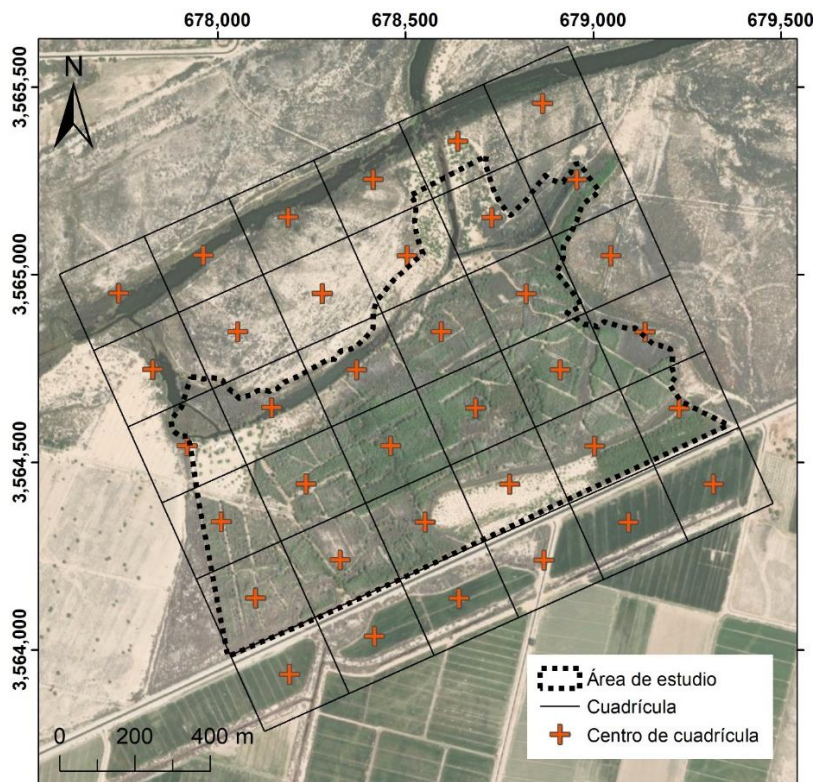


Figura 11*Extracción de muestras de suelo y cuarteo de muestra*

4.3. Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio consistió en el análisis de las 39 muestras de suelo para la determinación de pH, conductividad eléctrica (CE) y textura. Dichos análisis se realizaron en el laboratorio de Recursos Hídricos y Sistemas de Información Geográfica del Instituto de Ingeniería de la UABC con apoyo de estudiantes de servicio social y conforme a los procedimientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (NOM-021).

4.3.1. Preparación de las muestras de suelo

Se aplicó el método AS-01 ([SEMARNAT, 2002](#)) para la preparación de las muestras de suelo. Primeramente, las muestras fueron secadas al aire libre extendiéndolas sobre bolsas plásticas y teniendo especial cuidado en no mezclar el contenido de una muestra con otra (Figura 12). Una vez secas, cada una de las muestras se molió con una procesadora de alimentos de 200 W (Figura 13), después se tamizaron con una malla de 2 mm y, finalmente, se almacenaron en bolsas plásticas rotuladas con la información de la muestra (sitio, clave y fecha de muestreo).

Figura 12

Secado de las muestras de suelo



Figura 13

Molienda de las muestras en procesadora de alimentos de 200 W



4.3.2. Determinación de pH y CE de las muestras de suelo

La determinación del pH y CE se realizó sobre el extracto de saturación de acuerdo con los procedimientos AS-02 y AS-18, respectivamente. Para la obtención del extracto de saturación se siguió el método AS-16 de la NOM-021. Los procedimientos se describen a continuación ([SEMARNAT, 2002](#)).

Preparación de la pasta de saturación

1. Se añadió de 200 a 300 g de muestra de suelo a un frasco de plástico transparente y rotulado con los datos de la muestra.
2. Se añadió agua desionizada, mezclando hasta saturar la muestra, se tapó y se dejó reposar durante una hora.
3. Si la muestra se hubiese secado se añade más agua y, en caso de acumularse el agua en la superficie, se agrega más suelo hasta lograr la consistencia deseada.
4. Se repitió el procedimiento para cada una de las muestras y se almacenaron en un refrigerador.

Obtención del extracto de saturación

1. Se colocó la pasta de saturación en un embudo Buchner con papel de filtro Whatman No. 42.
2. El embudo se instaló sobre un frasco Kitasato conectado a una bomba de vacío.
3. La bomba se encendió hasta que se obtuvo todo el extracto posible.
4. El extracto se almacenó en tubos de plástico rotulados. Se añadió una gota de hexametáfosfato de sodio por cada 25 ml de extracto y se refrigeró hasta el momento del análisis.

Medición de pH y CE

Se utilizó un medidor de pH ORION STAR A111® (Figura 14) y un medidor de CE ORION 3 STAR® (Figura 15). Ambas mediciones se realizaron de la siguiente manera:

1. Los equipos se calibraron de acuerdo con los manuales y los reactivos correspondientes a cada equipo y procedimiento.
2. Se enjuagó la celda con agua desionizada y se secó cuidadosamente con papel de limpieza grado laboratorio.

3. Se sumergió la celda en la muestra y se registró la lectura una vez estabilizada. Las mediciones se hicieron por triplicado, enjuagando la celda cada vez.
4. Se calculó el promedio de las mediciones.

Figura 14

Medición de pH del extracto de saturación de la muestra

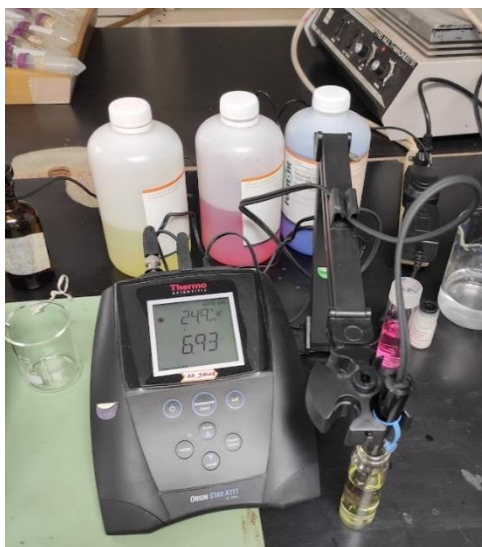


Figura 15

Medición de CE del extracto de saturación de la muestra



4.3.3. Determinación de la textura del suelo

Para la determinación de la textura del suelo se utilizó el método de Bouyoucos, siguiendo el procedimiento AS-09 de la NOM-021 ([SEMARNAT, 2002](#)).

4.3.3.1. Determinación de la textura del suelo por el método del hidrómetro de Bouyoucos

El método del hidrómetro de Bouyoucos es una modificación al método del hidrómetro desarrollado en 1927. En este, el tiempo de agitación fue reducido de 25 a 2 minutos al remojar la muestra de suelo en solución Calgon de 15 a 20 horas. El procedimiento es el siguiente ([Bouyoucos, 1962](#)):

1. Se disuelven 50 g de Calgon en un litro de agua destilada.
2. Se añaden 50 g de muestra de suelo (o 100 g en el caso de suelos arenosos) y 100 ml de solución Calgon en un vaso de precipitado de 250 ml. Se dejan reposar de 15 a 20 horas.
3. Se vacía a la copa del agitador, lavando el contenido del vaso de precipitado con agua destilada.
4. Se enciende el agitador mecánico y se inicia la mezcla del suelo, agua destilada y la solución por dos minutos.
5. Se apaga el agitador y se vacía el contenido de la copa a una probeta de 1,250 ml lavando con agua destilada.
6. Se completa el contenido de la probeta con agua destilada hasta aforar 1 l. Se tapa la probeta con una película plástica (Figura 16).
7. Con una mano presionando la parte superior de la probeta y con la otra en la parte inferior, la probeta se agita de arriba abajo hasta completar 20 vueltas.
8. La probeta se devuelve a la mesa, se remueve el plástico y se toma lectura con el hidrómetro y termómetro a los 40 segundos. El hidrómetro se lava y se seca cuidadosamente.
9. La segunda lectura del hidrómetro y termómetro se toman a las 2 horas.

La temperatura tiene un efecto sobre las lecturas de hidrómetro ya que este está calibrado a 20 °C. Las lecturas del hidrómetro se corrigen agregando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5 °C o restando el mismo valor por debajo de esa misma temperatura. Los cálculos para determinar el porcentaje de arcilla, limo y arena se realizan conforme los límites establecidos por el USDA:

$$\begin{aligned}\%_{\text{arcilla+limo}} &= 2 * L_{40\text{ s}} \\ \%_{\text{arena}} &= 100 - \%_{\text{arcilla+limo}} \\ \%_{\text{limo}} &= \%_{\text{arcilla+limo}} - \%_{\text{arena}} \\ \%_{\text{arcilla}} &= 2 * L_{2\text{ h}}\end{aligned}$$

Donde:

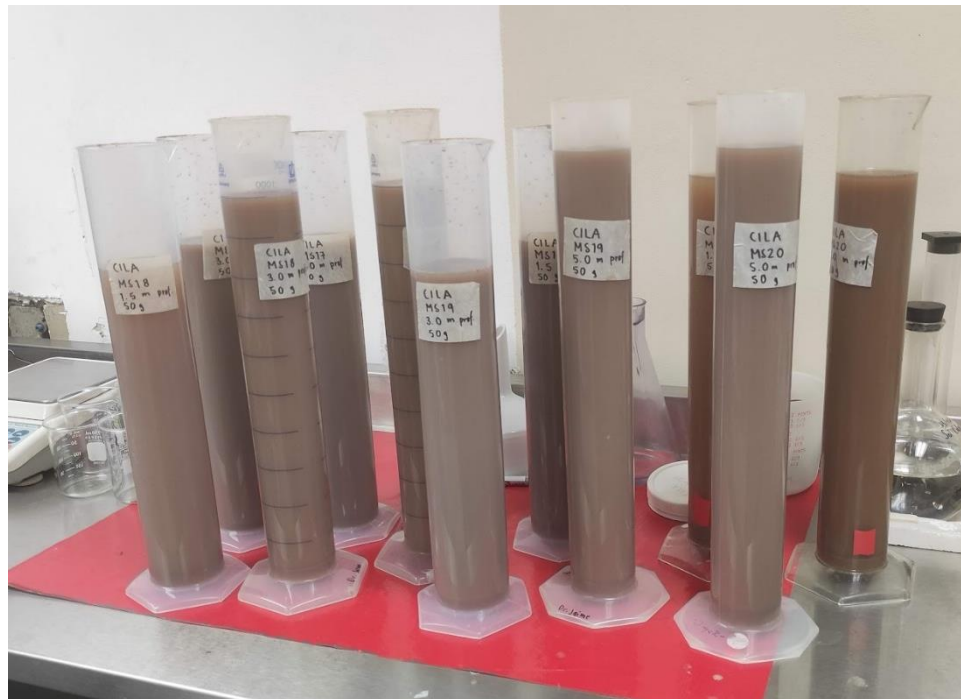
% = Porcentaje de arcilla, limo o arena

L = Lectura del hidrómetro corregida a los 40 segundos o 2 horas

En caso de utilizar 100 g de muestra no se debe de multiplicar por dos, sino que se utiliza directamente el valor de la lectura corregida, ya que el hidrómetro está calibrado con 100 g de muestra de suelo. Tal fue el caso de las muestras MS4 (a 3.0 y 5.0 m), MS6 (a 1.5 y 3.0 m), MS7 (a todas las profundidades), MS8 (a 1.5 y 5 m), MS9 (a 1.5 y 3.0 m), ya que el hidrómetro no alcanzaba a tomar lectura con solamente 50 g de muestra.

Figura 16

Determinación de la textura del suelo mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos



4.4. Estimación de las variables del balance hidrológico

4.4.1. Precipitación

Se utilizaron los datos de precipitación medidos por la estación climatológica instalada en el sitio de estudio, se realizaron sumatorias mensuales y se multiplicaron por el área de estudio (677,789 m²) para obtener los volúmenes mensuales de precipitación en m³.

4.4.2. Entregas de agua ambiental para irrigación

SIM proporcionó los volúmenes diarios de entregas de agua ambiental para irrigación por cada una de las compuertas denominadas CILA y Fase I. Estos se sumaron mensualmente para incorporar los datos al balance hidrológico mensual.

4.4.3. Estimación de la recarga y descarga de agua subterránea

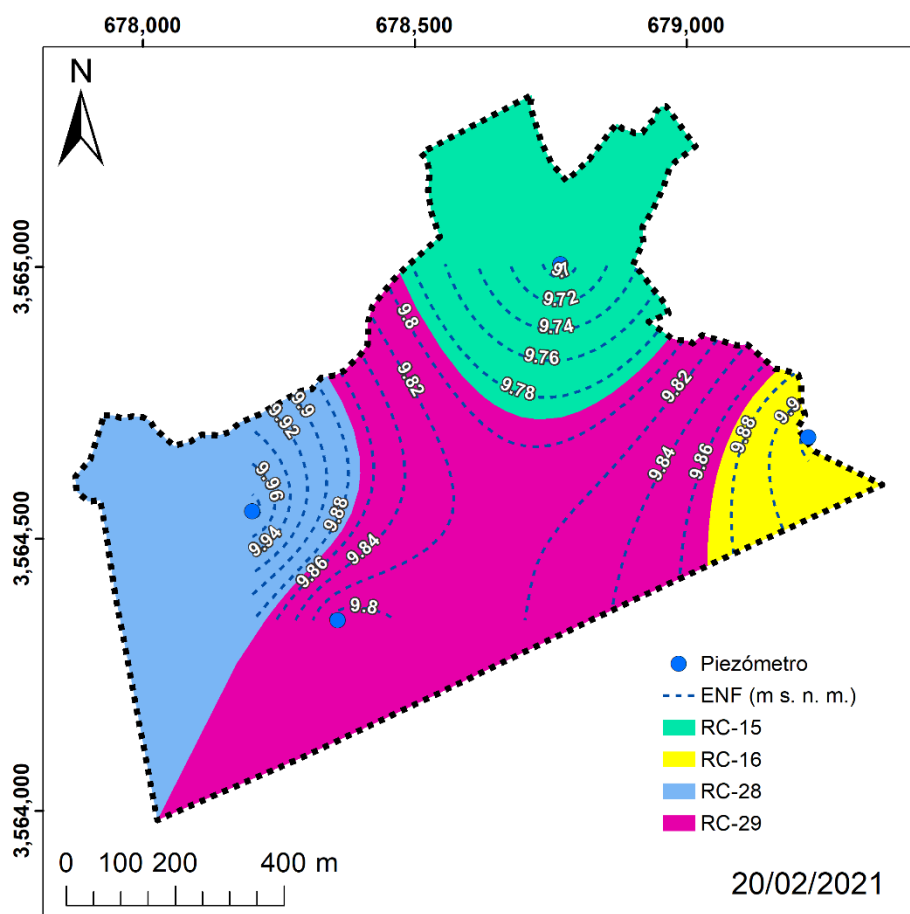
En esta sección se describen los procedimientos aplicados para la estimación del volumen de recarga y descarga en el sitio LG en el balance hidrológico 2021-2022.

4.4.3.1. Determinación del área de influencia de los piezómetros

Se consideró que la ENF es representativa de un área en las inmediaciones del piezómetro en el que se mide, por lo que se realizó un análisis de líneas equipotenciales de los niveles máximos, mínimos y promedios de las ENF durante el periodo analizado. Lo anterior, fue realizado con el software Surfer® versión 13.6 para determinar las áreas de influencia para cada uno de los piezómetros en el sitio de estudio. Las áreas de influencia se definieron de tal manera que abarcaran un rango de diferencia en la ENF de no más de 10 cm, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17

Isolíneas de ENF y área de influencia de cada piezómetro



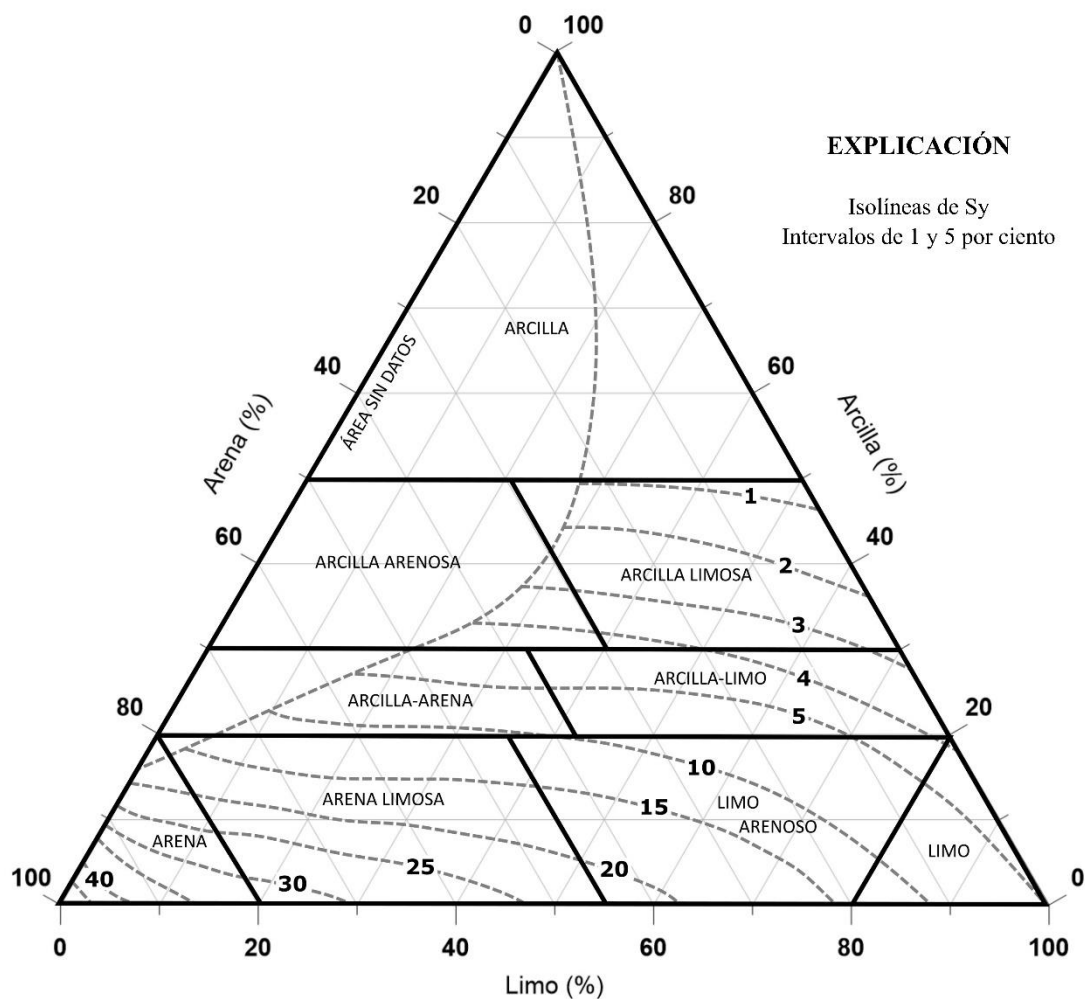
4.4.3.2. Determinación del rendimiento específico por el método del triángulo textural

Se estimó el rendimiento específico (S_y) graficando las texturas de las muestras por profundidad en el triángulo textural presentado por [Johnson \(1967\)](#) que incorpora isolíneas de S_y (Figura 18). Se trazaron polígonos de Thiessen para cada sitio de muestreo de suelos y para cada profundidad en el área de estudio, después se les asignó el valor de S_y obtenido anteriormente.

Los polígonos de Thiessen con sus respectivos valores de S_y se intersecaron con el área de influencia de los piezómetros para obtener las áreas que se utilizaron en la estimación del volumen de recarga y descarga subterránea.

Figura 18

Triángulo de texturas que muestra la relación entre el tamaño de las partículas y los valores de Sy (Modificado de Johnson, 1967).



4.4.3.3. Estimación de la recarga por el método de fluctuación del nivel freático

El método de fluctuación del nivel freático (WTF, por sus siglas en inglés) es de los más simples y utilizados para la determinación de la recarga de agua subterránea (Labrecque et al., 2019). El método WTF se ha aplicado para la estimación de la recarga desde 1923 (Meinzer, 1923) y en trabajos recientes como los realizados por Delottier et al. (2018), Jafari et al., (2019), Labrecque et al., (2019) y Cambraia Neto y Rodrigues (2020).

El método WTF se basa en la premisa de que el aumento del nivel de agua subterránea en acuíferos no confinados se debe a la recarga de agua que llega al nivel freático (Healy y Cook, 2002). La recarga se calcula como:

$$R = Sy \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Donde R es la recarga, Sy el rendimiento específico y Δh es el aumento del nivel freático en un periodo de tiempo Δt (Healy y Cook, 2002). El método WTF se consideró apropiado para la estimación de la recarga de agua subterránea dado que el acuífero en el sitio de estudio es libre y somero (0.5 a 3 m de profundidad al nivel freático según los datos obtenidos de 2021).

Para la aplicación del método, se utilizaron las mediciones de ENF horarias obtenidas del procesamiento de los datos de los sensores de presión instalados en los piezómetros. Estos datos fueron ingresados a una hoja de Excel, donde se cuantificaron las diferencias positivas por hora en la ENF, las cuales representan los aumentos del nivel freático. Este procedimiento se repitió para cada uno de los piezómetros.

El cálculo de volumen de la recarga se realizó por área de influencia de cada piezómetro, utilizando sus respectivos valores de aumento del nivel freático. Como se describe en la sección 4.4.3.2., cada área de influencia está compuesta por polígonos de valores variables de Sy , por lo que los volúmenes de recarga por área de influencia se calcularon utilizando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\Delta h}{\Delta t} \left(\sum_{i=1}^n \overline{Sy}_i A_i \dots \overline{Sy}_n A_n \right)$$

Donde R es el volumen de recarga del área de influencia del piezómetro, Δh es el aumento del nivel freático en un periodo de tiempo Δt , $\overline{Sy}_i$ es el promedio de Sy por profundidad del polígono de Thiessen correspondiente y A_i es el área del polígono de Thiessen dentro del área de influencia.

Realizando un análisis por separado, la descarga subterránea se calculó utilizando el mismo procedimiento, con la excepción de que se sustituyeron los aumentos del nivel freático con las disminuciones del nivel freático.

4.4.4. Evaporación directa

Se utilizó la versión simplificada de la ecuación de Penman desarrollada por [Valiantzas \(2006\)](#) para el cálculo de la evaporación potencial (E_o). Esta tiene como ventaja que depende casi exclusivamente de variables medidas por estaciones climatológicas comunes, las cuales son: radiación solar (R_s), temperatura máxima y mínima (T_{max} y T_{min}), humedad relativa (RH) y velocidad del viento (u). El único parámetro adicional presente en la fórmula es la radiación extraterrestre (R_A), la cual se puede estimar mediante fórmulas empíricas simplificadas propuestas por el mismo autor. Dicha fórmula se presenta a continuación:

$$E_o \approx 0.051(1-\alpha)R_s\sqrt{T+9.5} - 0.188(T+13)\left(\frac{R_s}{R_A} - 0.194\right) \\ * \left(1 - 0.00014(0.7T_{max} + 0.3T_{min} + 46)^2 \sqrt{\frac{RH}{100}}\right) \\ + 0.049(T_{max} + 16.3)\left(1 - \frac{RH}{100}\right)(a_u + 0.536u) + 0.00012Z$$

Donde:

E_o = evaporación potencial (mm/d)

α = valor del albedo para superficie de agua abierta (0.08)

R_A = radiación extraterrestre (MJ/m²/d)

R_s = radiación solar medida o estimada (MJ/m²/d)

T = temperatura promedio en el día (°C)

T_{max} = temperatura máxima del día (°C)

T_{min} = temperatura mínima del día (°C)

RH = humedad relativa promedio (%)

$a_u = 0$ cuando se utiliza la función del viento de [Linacre \(1993\)](#)

u = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

Z = elevación (m)

Las expresiones simplificadas para el cálculo de la R_A son las siguientes:

$$N \approx 4\phi \sin(0.53i - 1.65) + 12$$

$$R_A \approx 3N \sin(0.131N - 0.95\phi) \text{ cuando } |\phi| > \frac{23.5\pi}{180}$$

Donde:

ϕ = latitud del sitio (radianes)

i = número correspondiente al mes (donde el primer mes corresponde a enero)

N = horas del día (horas)

Para evaluar su precisión, [Valiantzas \(2006\)](#) comparó los valores de E_o estimados con los obtenidos mediante la ecuación estandarizada de [Penman \(1948\)](#) utilizando datos de 535 estaciones climatológicas ubicadas en trece países de Europa, Asia y África, de esta comparación obtuvo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9993$.

Para el cálculo de la evaporación directa se utilizaron los datos horarios de $T_{\max}$, $T_{\min}$, RH, u y R_s medidos por la estación climatológica instalada en el sitio LG y el valor de albedo correspondiente a agua de superficie libre o abierta ($\alpha = 0.08$). Otros parámetros utilizados para el cálculo de la E_o se muestran en la tabla 2. Estos datos fueron ingresados a una hoja de Excel y se realizaron los cálculos correspondientes para obtener la E_o diaria y posteriormente la sumatoria mensual.

Los valores de E_o mensuales fueron multiplicados por el área que abarca el meandro ubicado en el área de estudio ($23,777 \text{ m}^2$) para obtener los volúmenes mensuales de pérdidas por evaporación directa.

Tabla 2

Parámetros adicionales utilizados en el cálculo de la E_o

albedo (α)	0.08
latitud en radianes (Φ)	0.56
altura en metros (Z)	12
valor de función del viento (a_u)	0

4.4.5. Evapotranspiración

Se utilizaron los datos horarios de evapotranspiración de referencia (ET_o) calculados por la estación climatológica y el coeficiente de cultivo (K_c) determinado por [Descheemaeker et al. \(2011\)](#) para obtener la evapotranspiración del cultivo (ET_c) mensual.

La estación climatológica Vantage Pro2® realiza mediciones horarias de las siguientes variables (Davis Instruments, s. f.):

T_F = temperatura promedio del aire en décimas de grados Fahrenheit

U_{MPH} = velocidad del viento promedio en millas por hora

R_s = Radiación solar promedio en W/m^2

P_{in} = presión atmosférica del aire en milésimas de pulgadas de mercurio.

En función de las variables anteriores, la estación realiza las siguientes conversiones necesarias para el cálculo de la ET_o :

T_c = temperatura promedio en grados Celsius = $(T_F - 32) * 5/9$

T_k = temperatura promedio en grados Kelvin = $T_c + 273.16$

P_{kPa} = presión atmosférica (kPa) = $P_{in} * 33.864$

$U_{m/s}$ = temperatura del viento promedio (m/s) = $U_{MPH} * 0.44704$

R_n = radiación neta promedio en una hora (W/m^2)

Finalmente, la ecuación utilizada para el cálculo de la ET_o y las variables que la componen se describen a continuación (Davis Instruments, s. f.):

$$ET_o = W * \frac{R_n}{\lambda} + (1 - W) * (e_a - e_d) * F$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia horaria (mm)

W = factor de ponderación que expresa la contribución relativa del componente de radiación = $\Delta / (\Delta + \gamma)$

Δ = pendiente de curva de saturación de vapor = $\frac{e_a}{T_k} * \left(\frac{6790.4985}{T_k} \right) - 5.02808$

R_n = radiación neta promedio en una hora (W/m^2)

γ = constante psicrométrica = $0.000646 * (1 + 0.000946 * T_c) * P_{kPa}$

e_a = presión de la saturación de vapor (kPa) = $0.6108 * e^{\left(\frac{17.27 * T_c}{T_c + 237.3} \right)}$

e_d = presión real de vapor (kPa) = $e_a * \frac{H}{100}$

F = función de viento que indica la cantidad de energía que el viento contribuye a la ET. Hay dos funciones, una para el día (F_d , cuando radiación solar > 0) y otra para la noche (F_n , cuando radiación solar < 0).

$F_d = 0.030 + 0.0576 * U$

$F_n = 0.125 + 0.0439 * U$

Se utilizó un coeficiente de cultivo (K_c) de 1.11, el cual fue determinado por [Descheemaeker et al. \(2011\)](#) para una plantación de Eucalipto con características de cobertura de vegetación, clima y suelo similares al sitio de estudio (tabla 3) siguiendo el procedimiento del Estudio de Riego y Drenaje no. 56 de la FAO (FAO-56) ([Allen et al., 1998](#)) para vegetación natural, atípica y subóptima.

Tabla 3

Características del cultivo de [Descheemaeker et al. \(2011\)](#)

Tipo de uso de suelo:	Plantación de eucalipto
Cobertura de vegetación:	0.66
Altura de la vegetación:	11.3 m
Clase textural del suelo:	Franco arenosa

4.4.5.1. Análisis de regresión lineal para estimar datos faltantes

Debido a un fallo de origen desconocido en la estación climatológica instalada en el sitio LG, no se cuentan con datos de ET_o del 10 de al 31 de marzo de 2021. Es por esto que se optó por realizar un análisis de regresión lineal para estimar los datos faltantes utilizando datos de otra estación.

Se obtuvieron datos de ET_o del Sistema de Información del Manejo de Irrigación (CIMIS, por sus siglas en inglés, <https://cimis.water.ca.gov>) que administra una red de más de 145 estaciones climatológicas en California, Estados Unidos. Para realizar un análisis de correlación con los datos de ET_o del sitio LG, se descargaron los datos diarios de la estación Meloland #87 ubicada en el Valle Imperial; el periodo de datos correlacionados fue del 1 de enero al 31 de diciembre de 2021.

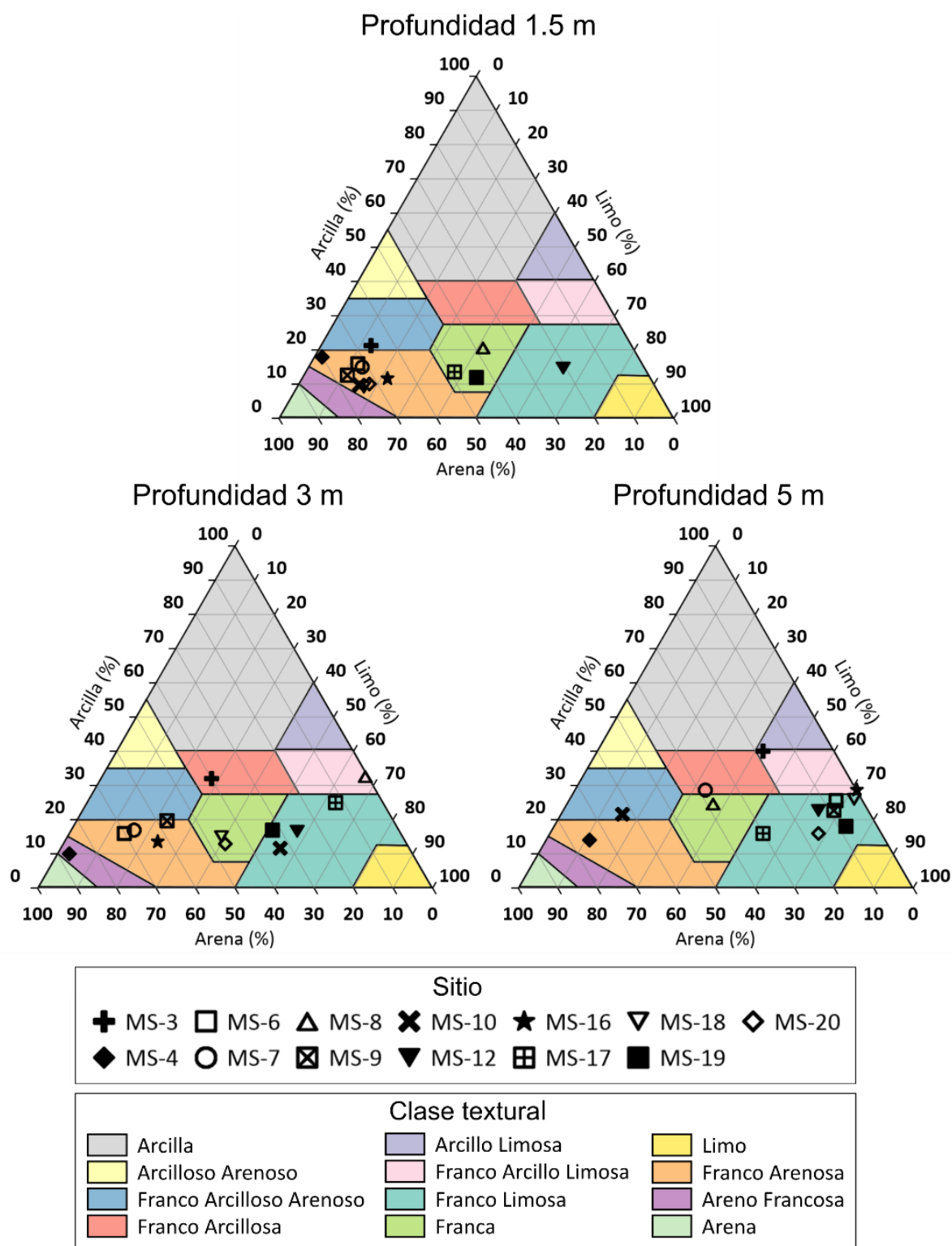
5. Resultados y discusión

5.1. Análisis de muestras de suelos

5.1.1. Textura

Durante la adquisición de muestras de suelo se perforaron 13 sitios y se extrajeron 3 muestras por sitio a las profundidades de 1.5, 3 y 5 m, sumando 39 muestras en total dentro del sitio. Se determinó la textura de las 39 muestras de suelo y se graficaron los resultados en el triángulo textural por profundidad (Figura 19).

Las muestras presentan mayor proporción de arena a 1.5 m y la proporción de limo va en aumento conforme aumenta la profundidad (Figura 19). Los resultados mostraron que la mayoría (69%) de las muestras a 1.5 m de profundidad presenta una proporción de arenas mayor al 60%, mientras que a 5.0 m de profundidad la mayoría de las muestras (con excepción de las MS4 y MS10 solamente) presenta una proporción de arcilla + limo mayor al 60% (Figura 19). Por su parte, las muestras de suelo a una profundidad de 3 m resultaron las más variables en su composición: las proporciones de arcilla + limo se encontraron entre el 13% y 99% mientras que las de arena van del 1% al 87%. En el apéndice de este documento se presenta una tabla con los resultados de textura para cada una de las muestras.

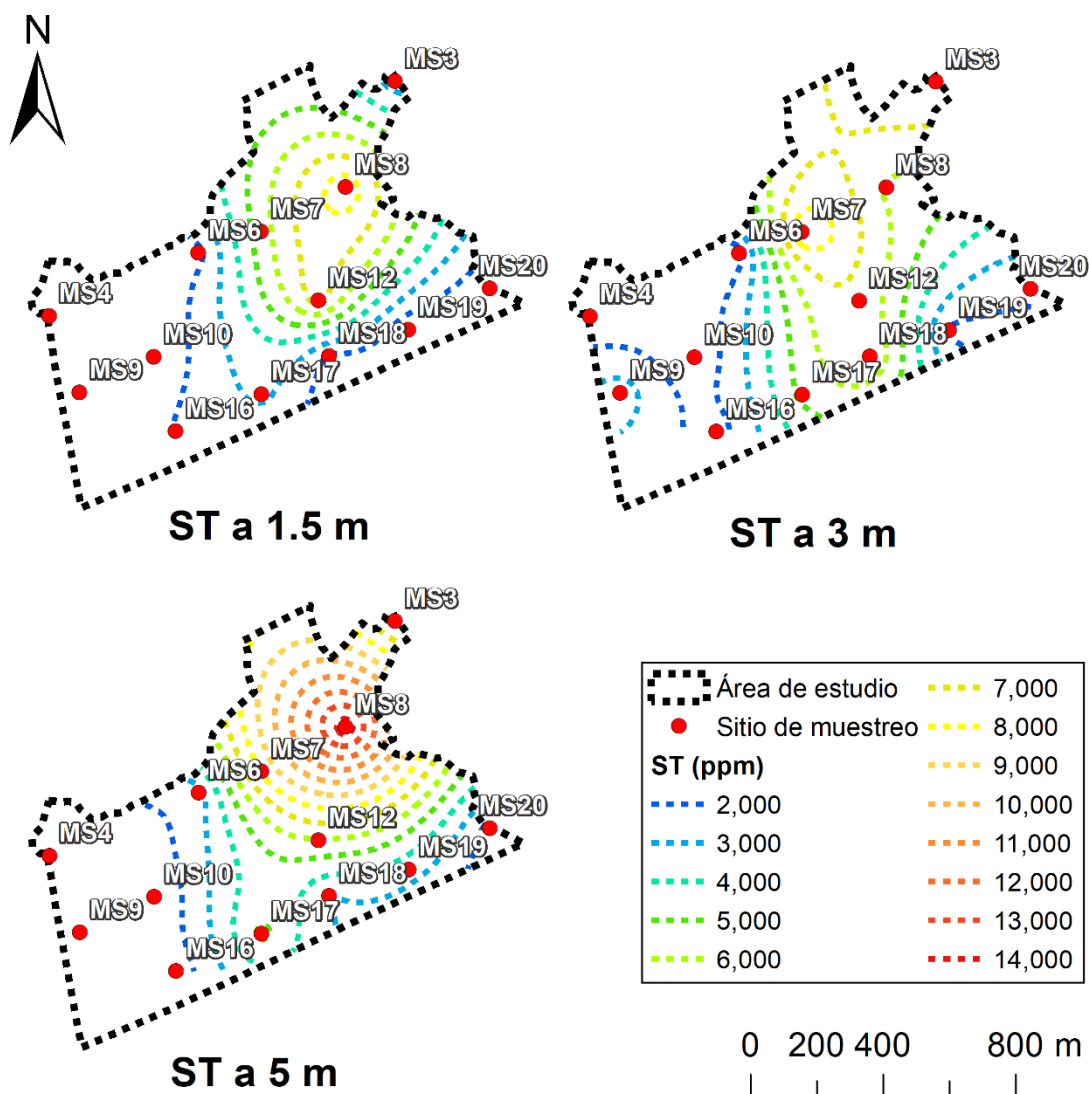
Figura 19*Resultados de análisis de textura*

5.1.2. ST y pH

Se obtuvieron los extractos de saturación de cada una de las 39 muestras de suelo y se determinó su conductividad eléctrica (CE) y pH. Las unidades de CE fueron convertidas a partes por millón (ppm) para representar salinidad del suelo. Los resultados de estos análisis se presentan en las Figuras 20 y 21 como isolíneas de salinidad total (ST) y de pH para cada una de las profundidades, respectivamente.

Figura 20

Isolíneas de concentración de ST del suelo para cada profundidad en la zona de estudio

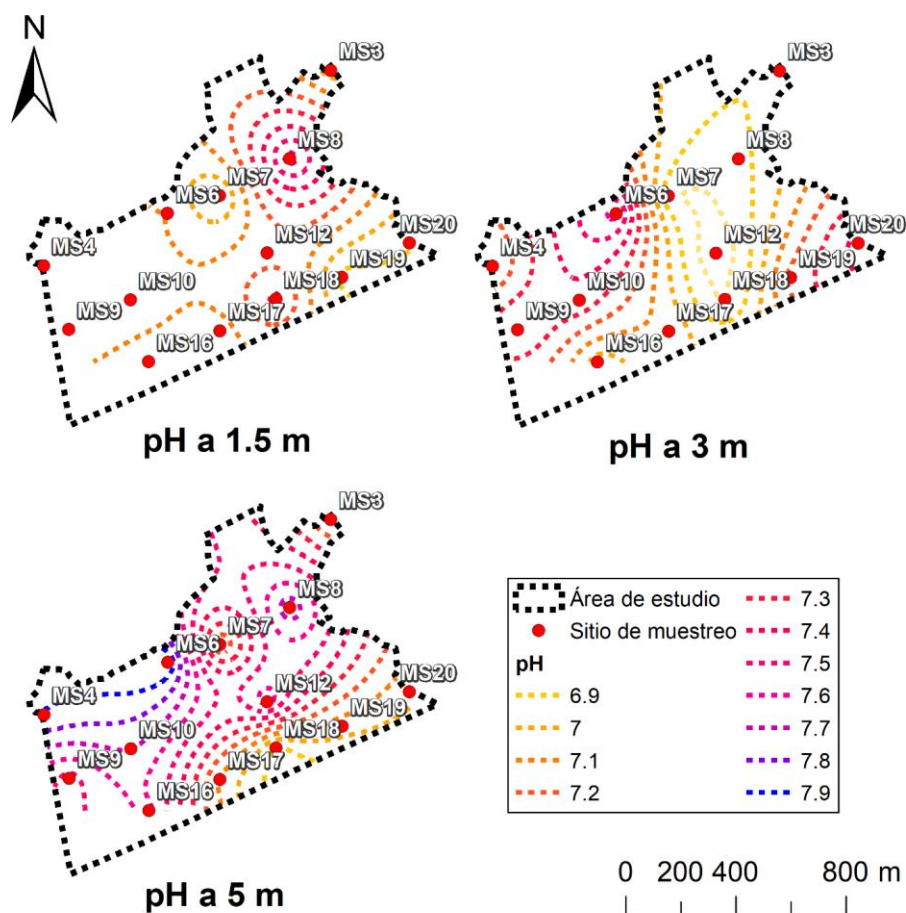


Se observa en la Figura 20 que los valores máximos de ST en las tres profundidades se presentaron en la zona este del sitio. Los valores de ST a 1.5 y 3 m alcanzaron los 8,000 ppm, mientras que los valores máximos de ST se encontraron a 5 m alrededor del sitio de muestreo MS8, alcanzando los 14,000 ppm. Estos resultados se encuentran dentro del rango de las mediciones de sólidos disueltos totales en el agua subterránea que se han realizado en el piezómetro RC15, el más cercano al sitio de muestreo MS8 (78 m de distancia), donde el rango de ST varió entre los 6,550 y 19,050 ppm durante el año 2021. Los valores de ST en la zona oeste del sitio se mantuvieron por debajo de los 6,000 ppm en las tres profundidades.

Los valores de pH se encontraron dentro del rango de 6.9 a 7.9 (Figura 21), los cuales representan suelos de neutros a medianamente alcalinos según la NOM-021.

Figura 21

Isolíneas de pH del suelo para cada profundidad



5.1.3. Cambios en la concentración de sólidos totales en el suelo del 2008 al 2021

Se analizaron los resultados de CE de los muestreos de suelo realizados en el área de estudio por [Ramos-Velázquez \(2008\)](#) y por SIM en 2011. Los valores de CE fueron convertidos a ppm y se crearon mapas de isoconcentraciones de ST con el fin de comparar dichos resultados con los obtenidos en este trabajo, ya que los muestreos realizados por Ramos-Velázquez y SIM fueron previos a las actividades de restauración en el sitio LG.

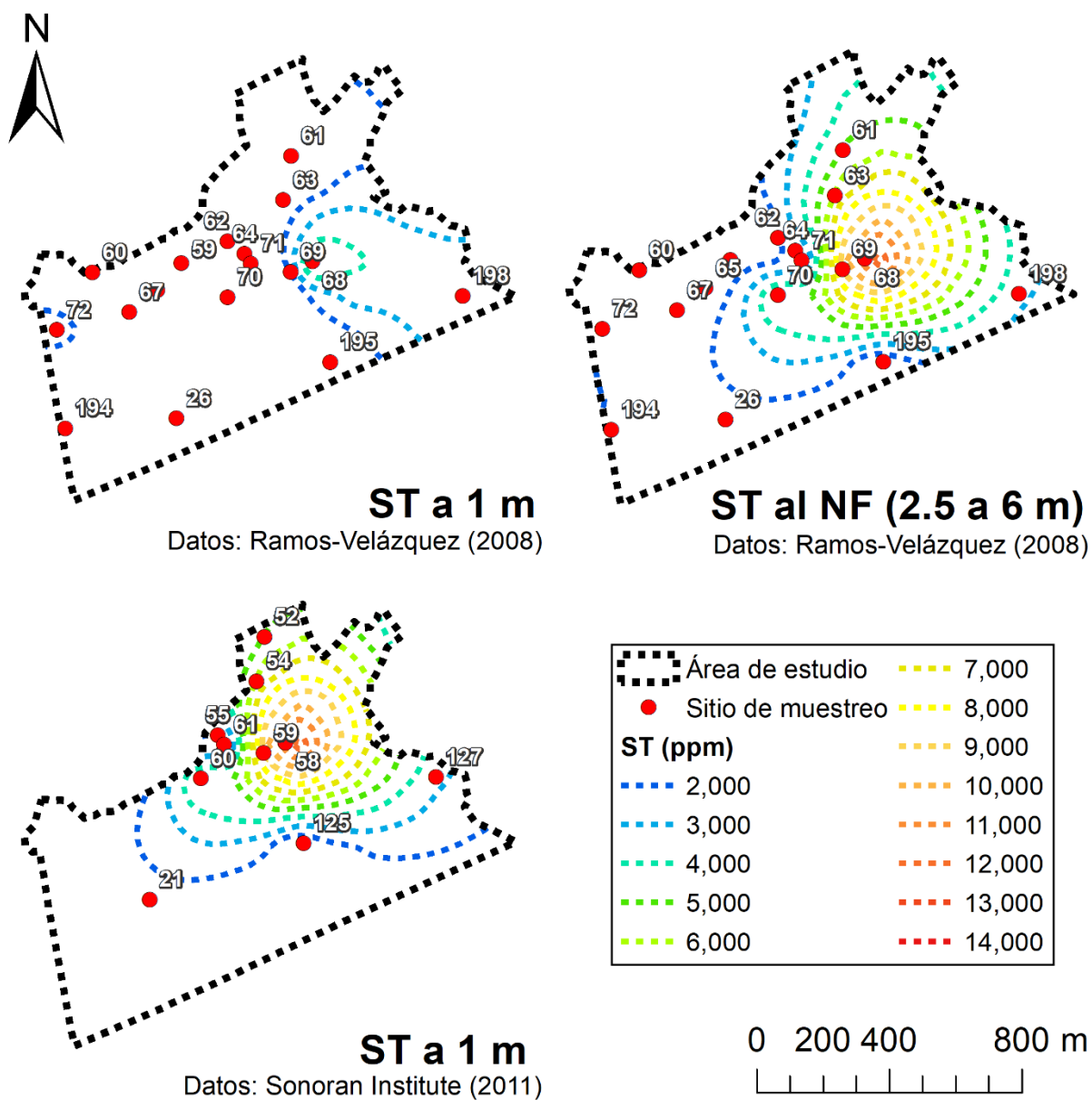
Los mapas de isoconcentraciones de ST en la Figura 22 muestran que los ST más altos se encontraron en la zona este del sitio, lo que coincide con los resultados del año 2021 (Figura 20), mientras que la parte oeste se ha mantenido por debajo de las 4,000 ppm en los tres años analizados. Los resultados sugieren que no ha habido un cambio sustancial en las concentraciones de ST desde antes del inicio de las actividades de reforestación en el sitio LG hasta la fecha.

En el año 2008 (Figura 22), las concentraciones máximas de ST se encontraron alrededor de las 12,000 ppm a una profundidad de 2.5 a 6 m, mientras que en el año 2021 se encontraron entre los 8,000 y 13,000 a una profundidad de 3 a 5 m. Los resultados de ST a 1 m de profundidad de los años 2008, 2011 y a 1.5 m del año 2021 sugieren que las concentraciones máximas aumentaron del año 2008 al 2011 (4,000 a 12,000 ppm) y disminuyeron de 2011 a 2021 (12,000 a 8,000 ppm).

Estudios anteriores ([Vandersande et al. 2001](#), [Glenn et al., 1998](#)) indican que la tolerancia máxima a la salinidad del álamo, sauce y batamote es de 8,000 ppm bajo condiciones de no estrés hídrico mientras que la del pino salado y la cachanilla son de 20,000 y 12,000 ppm, respectivamente. Esto es importante ya que las concentraciones máximas de ST presentes en el sitio podrían dificultar el desarrollo de las especies de vegetación ribereña nativa (álamo, sauce y batamote) y favorecer a las especies invasoras (pino salado y cachanilla). Cabe mencionar datos de salinidad en el suelo comparados son resultado de una sola campaña de muestreo y no se realiza un monitoreo sistemático y temporal de la salinidad en el suelo en la zona de estudio.

Figura 22

Resultados de los análisis de STD de las muestras de suelo de Ramos-Velázquez (2008) y SIM (2011)

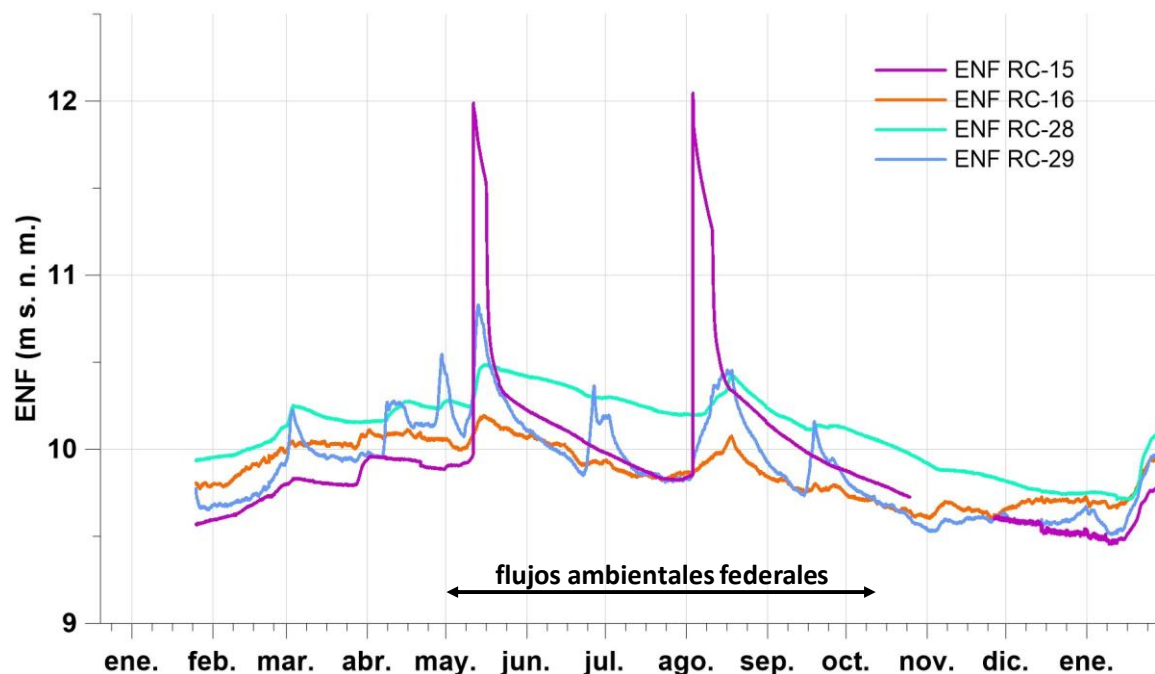


5.2. Elevación del nivel freático

En la Figura 23 se presentan los datos horarios de ENF para cada piezómetro, los cuales se obtuvieron del monitoreo mensual. Las elevaciones del nivel freático variaron entre los 9.4 y 11.9 m s. n. m. durante el periodo analizado, del 25 de enero de 2021 al 31 de enero de 2022.

Figura 23

Evolución de la elevación del nivel freático por piezómetro



Los datos que sobresalen en el gráfico (“picos”) presentados en los meses de mayo y agosto, en el RC15, se atribuyen a un efecto local ocasionado por la inundación del piezómetro en los eventos de riego de las parcelas y por lo tanto no están asociados al comportamiento general del agua subterránea. Debido a esto, los datos que conforman los “picos” de mayo y agosto para el piezómetro RC15 no se contemplaron en los análisis posteriores que involucraron los datos de ENF.

Se puede observar en la gráfica del piezómetro RC15 un periodo sin información, del 25 de octubre al 26 de noviembre, debido a la pérdida del sensor instalado en dicho piezómetro, por lo que la falta de estos datos se verá reflejada en los resultados de recarga y descarga subterránea, así como en los análisis que los involucren, como se explicará más adelante.

En general, en los meses de enero a mayo se presentó una tendencia al aumento de la ENF y una tendencia a la disminución de mayo a diciembre. Algunos de los aumentos en la ENF se debieron a las entregas de agua ambiental federal que se realizaron durante el 1 de mayo al 11 de octubre.

5.3. Determinación del rendimiento específico por el método del triángulo textural

En la Figura 24 se presentan los triángulos texturales que incorporan isolíneas de S_y (Johnson, 1969) en los que se graficaron las texturas de las muestras de suelo por profundidad. En la Figura 25 se muestran los valores de S_y estimados y asignados a cada polígono de Thiessen por profundidad de la muestra de suelo, así como las áreas de influencia de los piezómetros.

Figura 24

Textura de las muestras de suelo graficadas por profundidad en el triángulo textural que incorpora isolíneas de S_y

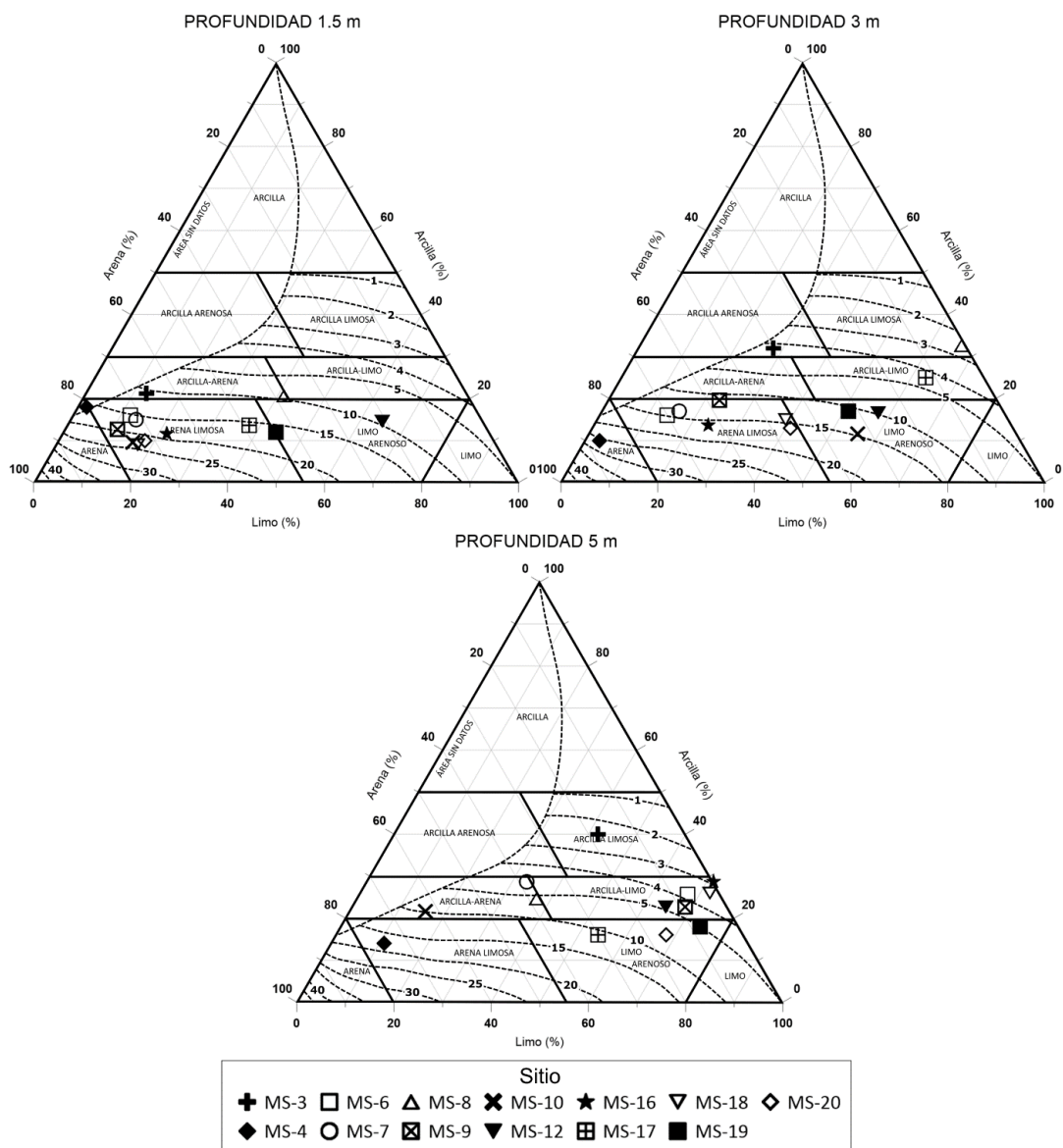
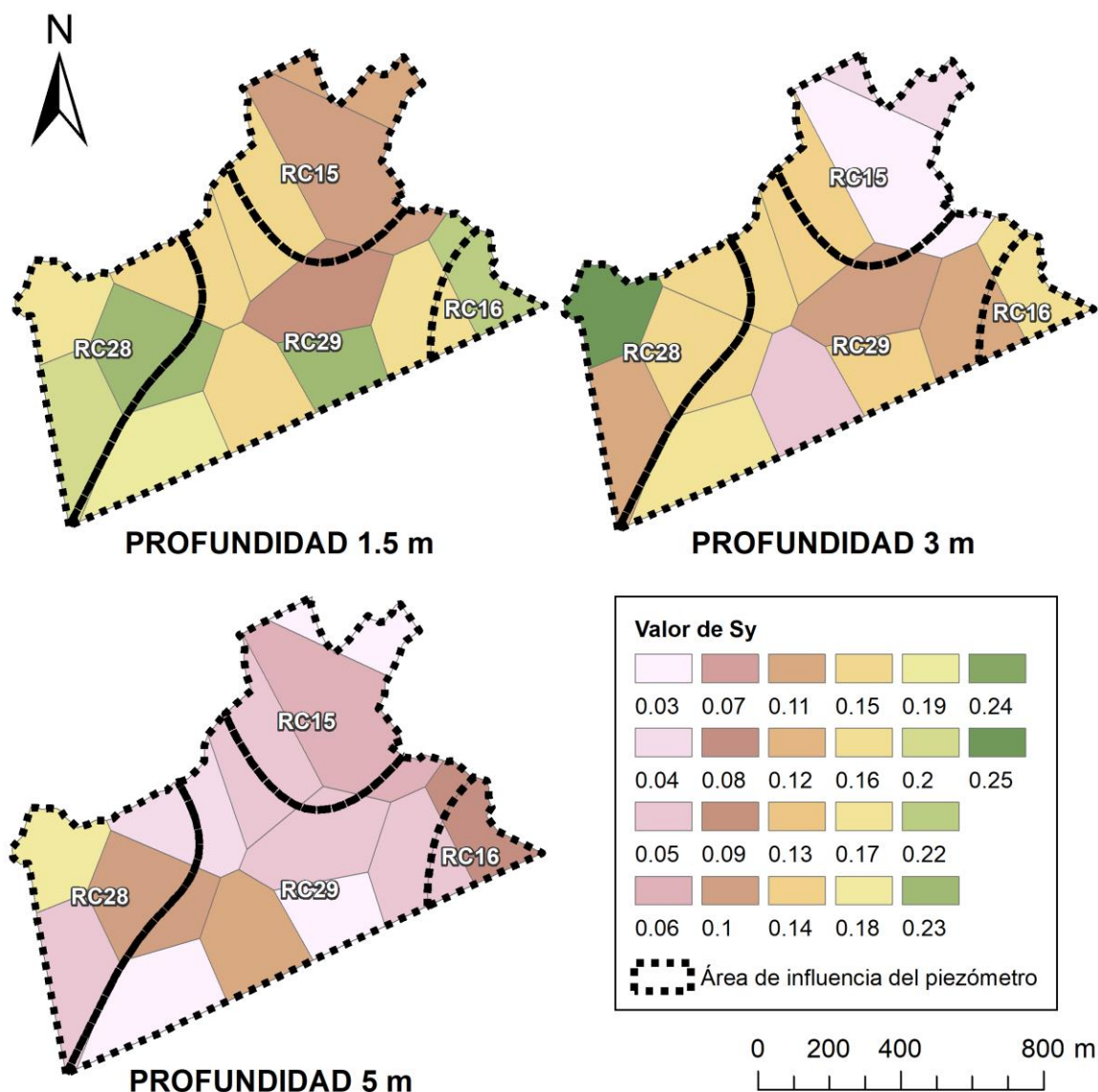


Figura 25

Polígonos de Thiessen, áreas de influencia de los piezómetros y sus respectivos valores de S_y por profundidad.



Finalmente, en la tabla 4 se muestran los valores de S_y asignados a cada polígono de Thiessen del sitio de muestreo, así como los promedios por profundidad que fueron utilizados para la estimación de los volúmenes de recarga y descarga.

Tabla 4

Valores de Sy por profundidad y promedios por sitio de muestreo y su área de influencia.

Área de influencia	Sitio	Valor de Sy			
		Profundidad 1.5 m	Profundidad 3 m	Profundidad 5 m	Promedio
RC-15	MS12	0.09	0.10	0.05	0.08
RC-15	MS3	0.11	0.04	0.03	0.06
RC-15	MS7	0.15	0.14	0.05	0.11
RC-15	MS8	0.10	0.03	0.06	0.06
RC-16	MS19	0.16	0.11	0.05	0.11
RC-16	MS20	0.22	0.16	0.08	0.15
RC-28	MS6	0.15	0.15	0.04	0.11
RC-28	MS10	0.23	0.15	0.10	0.16
RC-28	MS9	0.20	0.11	0.05	0.12
RC-28	MS4	0.17	0.25	0.18	0.20
RC-28	MS16	0.19	0.17	0.03	0.13
RC-29	MS17	0.15	0.05	0.11	0.10
RC-29	MS12	0.09	0.10	0.05	0.08
RC-29	MS6	0.15	0.15	0.04	0.11
RC-29	MS10	0.23	0.15	0.10	0.16
RC-29	MS9	0.20	0.11	0.05	0.12
RC-29	MS16	0.19	0.17	0.03	0.13
RC-29	MS19	0.16	0.11	0.05	0.11
RC-29	MS18	0.23	0.14	0.03	0.13
RC-29	MS7	0.15	0.14	0.05	0.11
RC-29	MS20	0.22	0.16	0.08	0.15
RC-29	MS8	0.10	0.03	0.06	0.06

5.4. Estimación de las entradas de agua

5.4.1. Precipitación

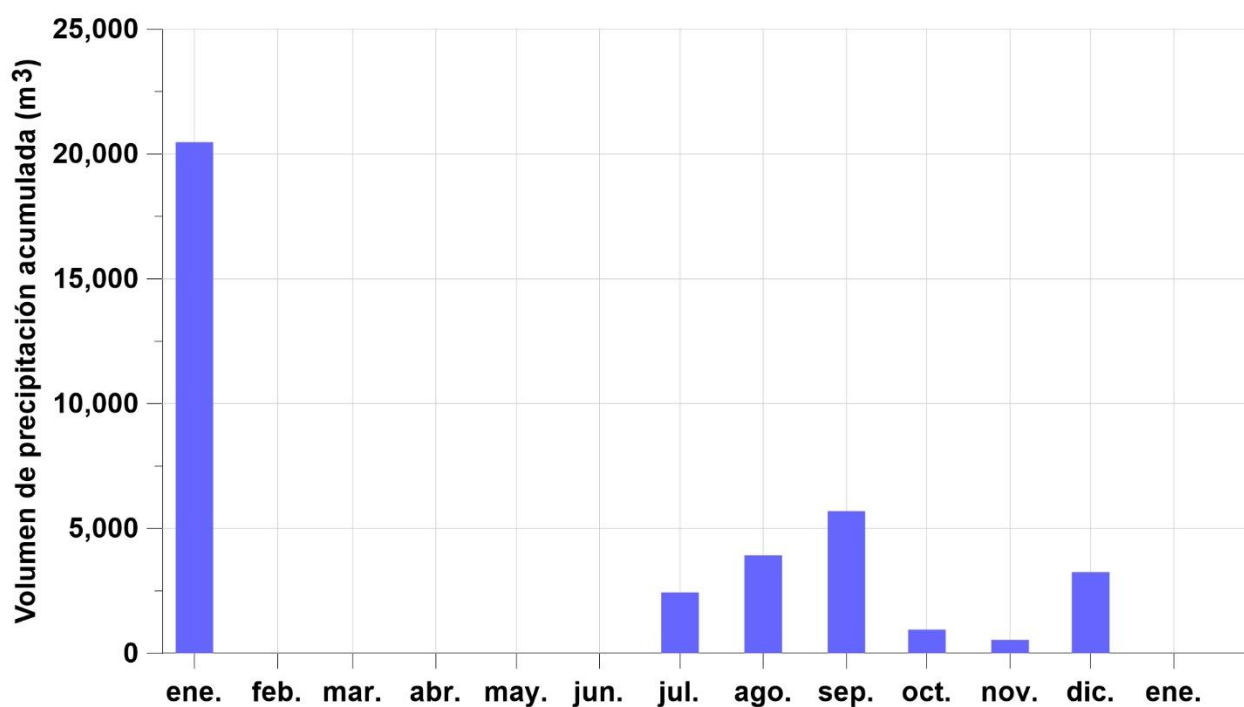
Para el periodo analizado (enero 2021 a enero 2022) se registró un total acumulado de 55 mm de precipitación, lo equivalente a 37,278 m³ en la superficie del sitio LG. Como se observa en la tabla 5, en el mes de enero de 2021 se acumuló la mayor entrada por precipitación (20,469 m³), representando el 55% de lo acumulado en todo el periodo, mientras que en los meses de febrero a junio de 2021 y enero de 2022 no se presentaron eventos de precipitación (Figura 26).

Tabla 5

Precipitación acumulada mensual

Año	Mes	Precipitación acumulada (mm)	Volumen precipitado acumulado (m ³)
2021	enero	30	20,469
	febrero	0	0
	marzo	0	0
	abril	0	0
	mayo	0	0
	junio	0	0
	julio	4	2,440
	agosto	6	3,931
	septiembre	8	5,693
	octubre	1	949
	noviembre	1	542
	diciembre	5	3,253
2022	enero	0	0
Total		55	37,278

Figura 26

Volúmenes mensuales de precipitación acumulada de enero de 2021 a enero del 2022

5.4.2. Entregas de agua ambiental para irrigación

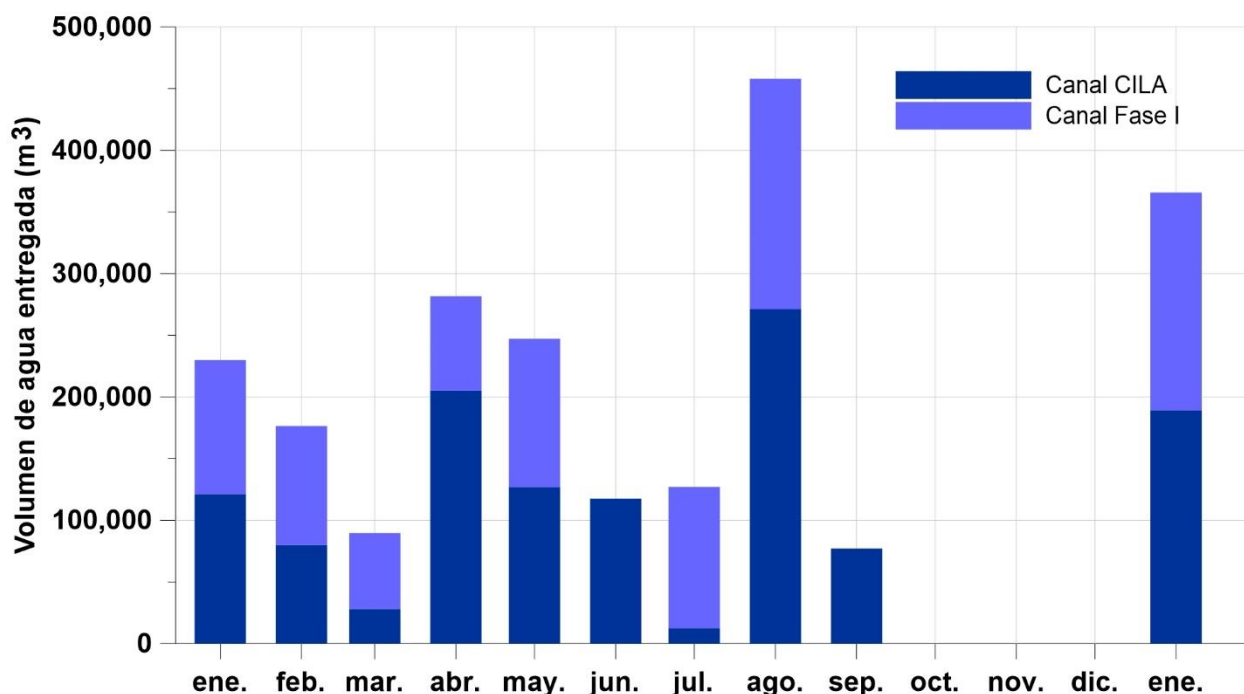
La tabla 6 muestra los volúmenes de agua entregados mensualmente para fines de irrigación en el sitio LG, se muestran por compuerta de entrega del periodo de enero de 2021 a enero de 2022, los datos fueron proporcionados por SIM. Durante el periodo analizado se entregaron un total de 2,170,282 m³ de agua ambiental destinada a la irrigación de las parcelas de restauración. Como se observa en la Figura 27, no hubo entregas de agua ambiental por la compuerta CILA de octubre a diciembre, mientras que en la compuerta Fase I no hubo entregas en los meses de junio y de septiembre a diciembre.

Tabla 6

Volúmenes mensuales de agua entregada por compuerta

Año	Mes	Volumen de agua entregada (m ³)		
		Fase I	CILA	Total
2021	enero	108,691	121,219	229,910
	febrero	96,422	80,093	176,515
	marzo	61,517	28,080	89,597
	abril	76,637	205,114	281,750
	mayo	120,182	126,922	247,104
	junio	0	117,590	117,590
	julio	114,566	12,528	127,094
	agosto	186,710	271,210	457,920
	septiembre	0	77,069	77,069
	octubre	0	0	0
	noviembre	0	0	0
	diciembre	0	0	0
2022	enero	176,515	189,216	365,731
Total		941,242	1,229,040	2,170,282

Nota. Datos proporcionados por SIM.

Figura 27*Volúmenes mensuales de agua entregada por compuerta*

5.4.3. Recarga al acuífero

El volumen de recarga total para el periodo analizado fue de 842,858 m³, siendo los meses de abril de 2021 y enero de 2022 en los que se obtuvieron los mayores volúmenes de recarga (91,686 y 93,591 m³, respectivamente), como se muestra en la tabla 7.

En la gráfica de barras apiladas de la Figura 28 se presentan los volúmenes mensuales totales y por área de influencia de cada piezómetro, donde se puede observar que al ser el área de influencia del piezómetro RC29 la mayor, su superficie ocupa casi el 50% de la zona de estudio LG, fue en la que se presentaron mayores volúmenes de recarga.

Cabe mencionar que no fue posible la estimación de la recarga para el área de influencia del piezómetro RC15 para el periodo del 25 de octubre al 26 de noviembre de 2021 debido a la pérdida de datos del sensor. El mes de enero de 2021 presentó volúmenes de recarga subterránea considerablemente menores en comparación con el resto de los meses del periodo (tabla 7) debido a que los transductores de presión fueron instalados el 25 de enero de 2021, por lo que no se cuenta con datos de ENF para antes de esa fecha.

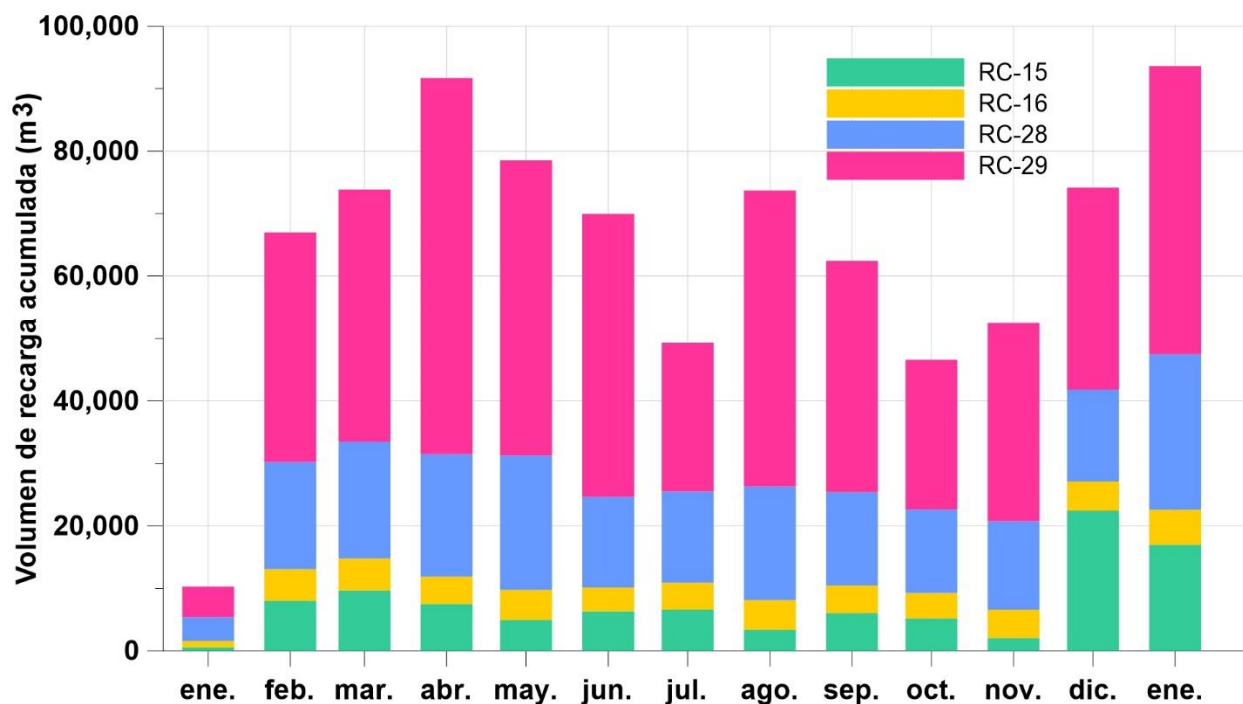
Tabla 7

Volúmenes de recarga acumulada mensual por área de influencia de cada piezómetro

Año	Mes	Volumen de recarga acumulada (m ³)				
		RC15	RC16	RC28	RC29	Total
2021	enero	582	255	3,821	4,906	9,563
	febrero	8,043	5,048	17,144	36,741	66,976
	marzo	9,683	5,119	18,687	40,351	73,840
	abril	7,527	4,372	19,582	60,204	91,686
	mayo	4,966	4,782	21,521	47,247	78,518
	junio	6,340	3,804	14,501	45,287	69,932
	julio	6,608	4,294	14,628	23,812	49,341
	agosto	3,362	4,793	18,180	47,369	73,704
	septiembre	6,059	4,397	14,975	36,995	62,425
	octubre	5,193	4,059	13,390	23,964	46,606
	noviembre	2,069	4,539	14,129	31,779	52,516
	diciembre	22,452	4,676	14,710	32,323	74,160
2022	enero	16,992	5,619	24,866	46,115	93,591
Total		99,875	55,756	210,135	477,093	842,858

Figura 28

Volumen total de recarga acumulada mensual por área de influencia de cada piezómetro



5.5. Estimación de las salidas de agua

5.5.1. Evaporación directa

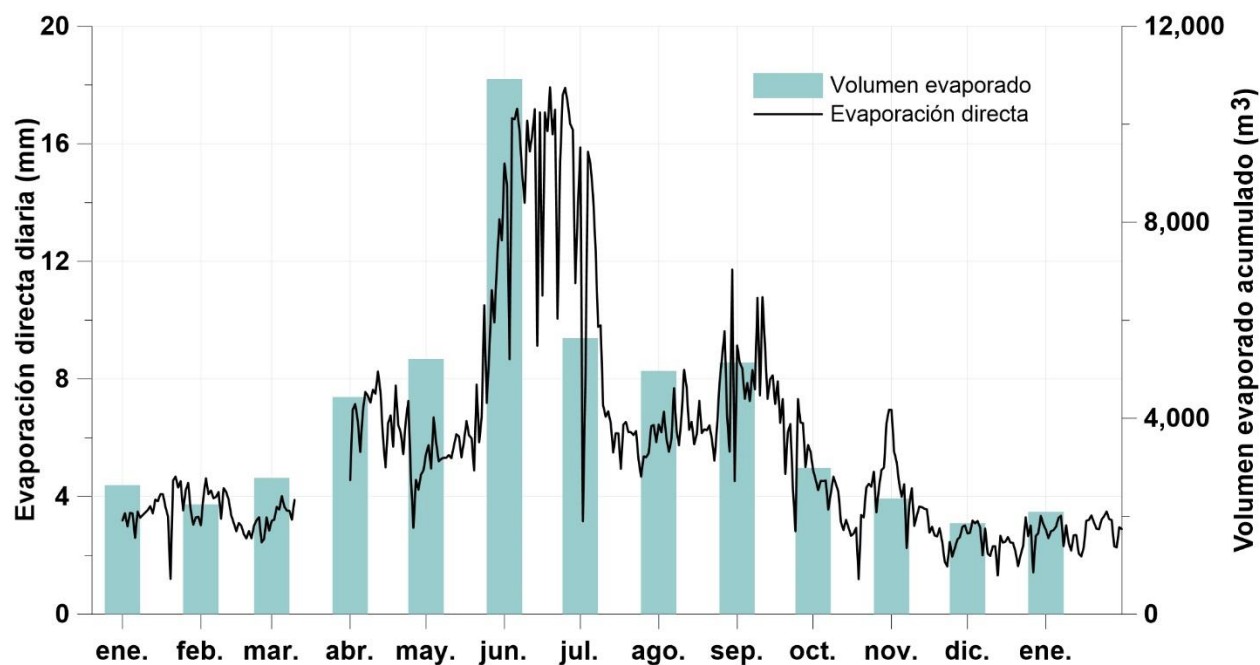
La tabla 8 muestra las pérdidas por evaporación directa (E) acumulada para cada mes en mm y m³, estimándose un total de 53,252 m³ para el periodo analizado. Como se muestra en la Figura 29, las mayores pérdidas por E ocurrieron durante el mes de junio de 2021, con un volumen mensual de 10,922 m³, seguido de julio y mayo de 2021 con 5,633 y 5,208 m³ respectivamente. Se observa también una reducción en la E durante los meses comprendidos de noviembre a marzo, durante los cuales se evapotranspiró solo un 26% del total evaporado.

No se cuenta con datos del 10 al 31 de marzo de 2021 debido a que la estación climatológica no registró datos durante ese periodo.

Tabla 8

Evaporación directa acumulada mensual

Año	Mes	Evaporación directa acumulada (mm)	Volumen evaporado acumulado (m ³)
2021	enero	111	2,635
	febrero	94	2,243
	marzo	117	2,784
	abril	186	4,433
	mayo	219	5,208
	junio	459	10,922
	julio	237	5,633
	agosto	209	4,964
	septiembre	216	5,136
	octubre	126	2,986
	noviembre	99	2,361
	diciembre	78	1,858
2022	enero	88	2,090
Total		2,240	53,252

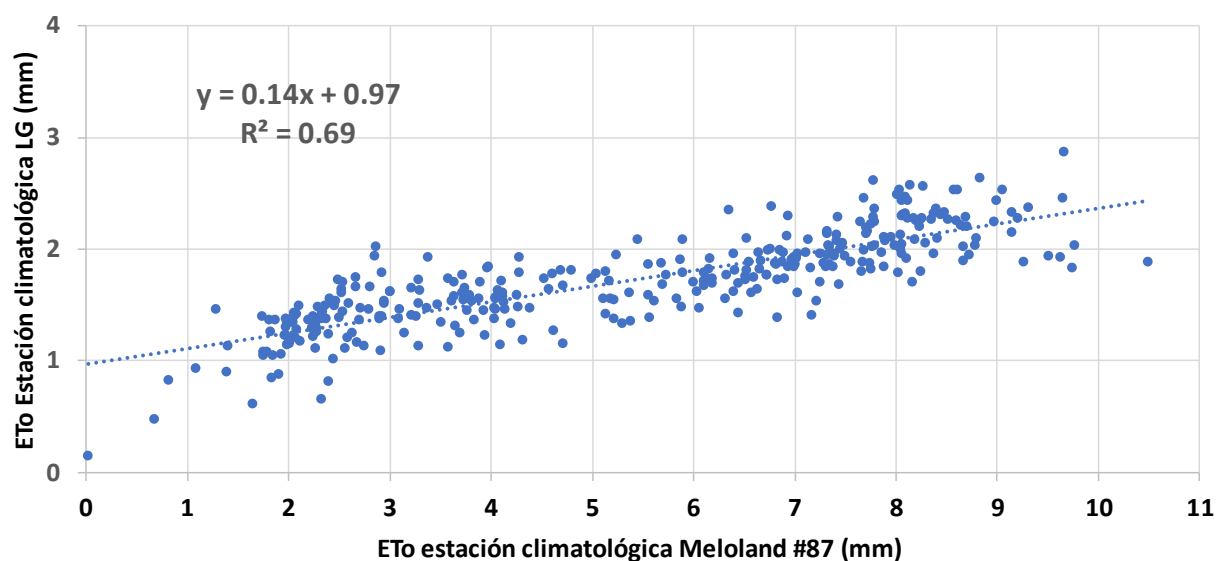
Figura 29*Evaporación directa diaria y volumen evaporado acumulado mensual*

5.5.2. Evapotranspiración

Del análisis de correlación para la determinación de los datos faltantes de la estación climatológica (Figura 30) se obtuvo un coeficiente $R^2 = 0.69$, el cual fue el coeficiente más cercano a 1 en comparación con datos de otras estaciones. Para completar los datos faltantes se utilizó la ecuación de la pendiente $y = 0.14x + 0.97$ resultado del análisis de correlación, donde y es igual al valor de la ET_0 diaria del sitio LG en una fecha determinada y x es igual al valor de ET_0 registrada por la estación Meloland #87 para la misma fecha.

Figura 30

Correlación lineal entre los datos de ETo de LG y Meloland #87



La tabla 9 muestra la evapotranspiración (ET) acumulada mensual del periodo en mm y el volumen evapotranspirado estimado en m³. La pérdida total por ET durante el periodo fue de 661,305 m³.

Tabla 9

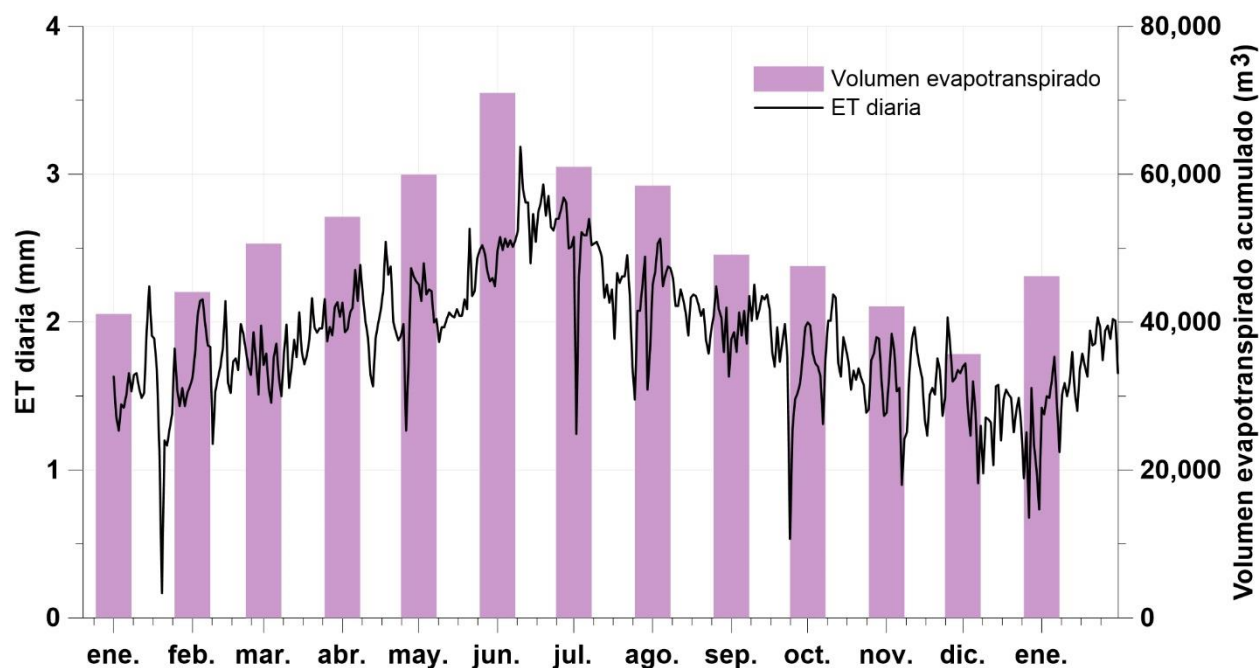
Evapotranspiración acumulada mensual

Año	Mes	ET acumulada (mm)	Volumen evapotranspirado acumulado (m ³)
2021	enero	47	41,110
	febrero	50	44,092
	marzo	57	50,627
	abril	61	54,255
	mayo	68	59,973
	junio	80	71,009
	julio	69	61,003
	agosto	66	58,473
	septiembre	56	49,134
	octubre	54	47,590
	noviembre	48	42,140
	diciembre	40	35,686
2022	enero	52	46,211
Total		748	661,305

Como se observa en la Figura 31, los meses en los que se presentaron las mayores pérdidas por evapotranspiración fueron junio, julio y mayo del 2021 con 71,009, 61,003 y 59,973 m³, respectivamente, coincidiendo con los meses donde se presentaron las mayores pérdidas por evaporación como se mencionó en la sección anterior.

Figura 31

Evapotranspiración diaria y volumen evapotranspirado acumulado mensual



5.5.3. Descarga subterránea

El volumen total de descarga subterránea para el periodo analizado fue de 848,454 m³ (tabla 10). Los meses en los que se presentaron volúmenes de descarga mayores fueron mayo (94,777 m³) y agosto (76,177 m³) del 2021. Como se observa en la Figura 32, los volúmenes de descarga fueron mayores en el área de influencia de piezómetro RC29.

Al igual que con las estimaciones de recarga, no fue posible estimar la descarga para el área de influencia del piezómetro RC15 para el periodo del 25 de octubre al 26 de noviembre de 2021 debido a la pérdida de datos del sensor. El mes de enero presentó volúmenes de descarga subterránea considerablemente menores en comparación con el resto de los meses del periodo

debido a que los transductores de presión fueron instalados el 25 de enero de 2021, por lo que no se cuenta con datos de ENF para todo el mes.

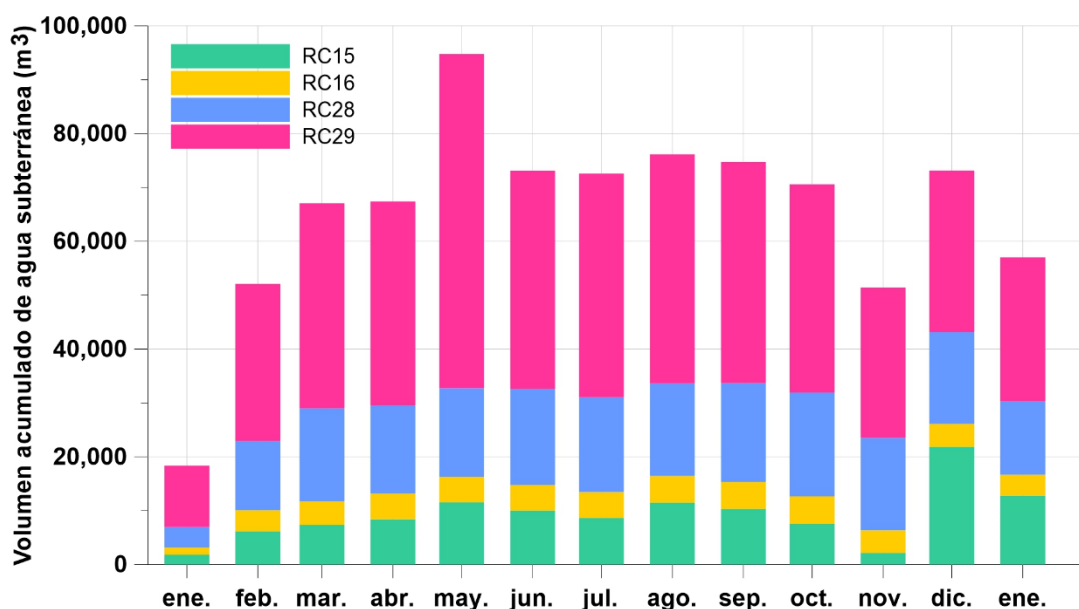
Tabla 10

Volúmenes acumulados mensuales de descargas subterráneas por área de influencia de piezómetros

Año	Mes	Volumen de descarga subterránea acumulada (m ³)				
		RC15	RC16	RC28	RC29	Total
2021	enero	1,816	1,365	3,761	11,406	18,347
	febrero	6,172	3,918	12,837	29,179	52,105
	marzo	7,345	4,376	17,268	38,081	67,070
	abril	8,401	4,773	16,352	37,892	67,418
	mayo	11,572	4,699	16,431	62,076	94,777
	junio	10,004	4,742	17,836	40,514	73,095
	julio	8,677	4,776	17,593	41,519	72,565
	agosto	11,471	4,976	17,160	42,570	76,177
	septiembre	10,316	5,052	18,303	41,077	74,749
	octubre	7,535	5,110	19,285	38,640	70,571
	noviembre	2,147	4,232	17,173	27,879	51,431
	diciembre	21,824	4,284	17,078	29,936	73,122
2022	enero	12,803	3,877	13,598	26,747	57,025
Total		120,082	56,179	204,676	467,516	848,454

Figura 32

Volúmenes acumulados mensuales de descarga de agua subterránea por área de influencia



5.6. Balance hidrológico

En la tabla 11 se sintetiza la información relacionada a las estimaciones y datos de volúmenes mensuales de entradas y de salidas de cada variable que se consideró en el balance hidrológico del sitio LG en el periodo de enero 2021 a enero 2022 (balance hidrológico 2021-2022), así como el total de entradas, total de salidas y el cambio en el almacenamiento mensual. Además, se presenta una gráfica de barras apiladas (Figura 33) donde se puede apreciar visualmente la proporción en la que cada variable contribuyó al balance hidrológico mensual. Las entradas se representan con valores positivos y las salidas con valores negativos, adicionalmente se agregaron sus respectivos déficits o superávits en el almacenamiento en la parte superior o inferior de la gráfica (Figura 33).

Los cambios en el almacenamiento fueron positivos durante la mayor parte del periodo analizado, con excepción de los meses de enero, octubre, noviembre y diciembre del año 2021 (Figura 33), que coinciden con los meses en los que no hubo aportes por entregas de agua ambiental. El cambio en el almacenamiento de todo el periodo resultó en un superávit de 1,270,567 m³.

En cuanto a entradas de agua, la mayor aportación al sistema fueron las entregas de agua ambiental, constituyendo el 69% del volumen total durante el periodo analizado; seguido de la recarga de agua subterránea con el 30%, la precipitación aportó solamente el 1%. Del total anual de las salidas de agua, las descargas subterráneas representaron la mayor parte con el 56% del volumen de salidas, seguido de la evaporación con el 41%, la evaporación directa constituyó solamente el 2%.

Los resultados del balance hidrológico 2021-2022 muestran que los volúmenes de agua ambiental entregados para irrigación de las parcelas de restauración representaron el 309% de la ET anual (Figura 33), es decir, triplican el requerimiento hídrico anual de la vegetación.

Aunque las entregas de agua ambiental para irrigación triplicaron el requerimiento hídrico anual, no sucedió lo mismo mensualmente. Las entregas de agua ambiental mensuales variaron entre el 0% y 791% con respecto a la ET mensual. Estas variaciones en las entregas están ligadas a la disponibilidad de agua del módulo de riego para derivar el total del volumen programado y solicitado por SIM, por cuestiones administrativas u otras razones.

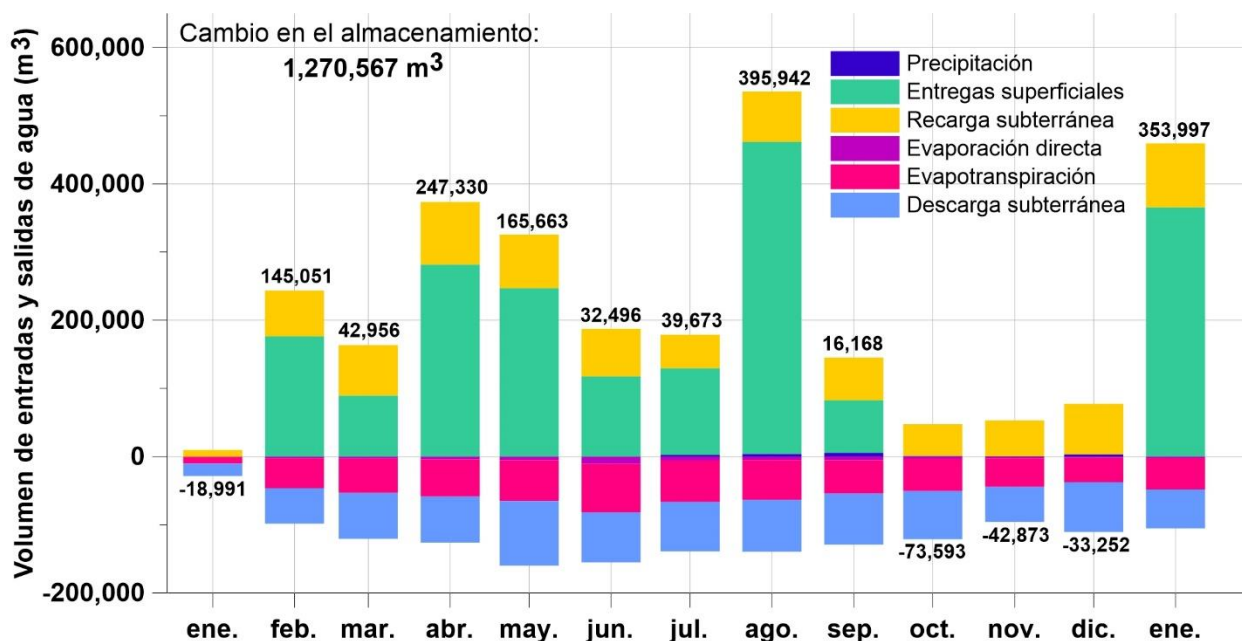
Tabla 11

Balance hidrológico 2021

Año	Mes	Volumenes de entradas (m³)				Volumenes de salidas (m³)				Cambio en el almacenamiento (m³)
		Precipitación	Entregas de agua	Recarga subterránea	Total	Evaporación directa	Evapo-transpiración	Descarga subterránea	Total	
2021	enero	0	0	9,563	9,563	604	9,603	18,347	28,554	-18,991
	febrero	0	176,515	66,976	243,491	2,243	44,092	52,105	98,441	145,051
	marzo	0	89,597	73,840	163,437	2,784	50,627	67,070	120,480	42,956
	abril	0	281,750	91,686	373,436	4,433	54,255	67,418	126,106	247,330
	mayo	0	247,104	78,518	325,622	5,208	59,973	94,777	159,959	165,663
	junio	0	117,590	69,932	187,523	10,922	71,009	73,095	155,026	32,496
	julio	2,440	127,094	49,341	178,875	5,633	61,003	72,565	139,202	39,673
	agosto	3,931	457,920	73,704	535,555	4,964	58,473	76,177	139,614	395,942
	septiembre	5,693	77,069	62,425	145,188	5,136	49,134	74,749	129,019	16,168
	octubre	949	0	46,606	47,555	2,986	47,590	70,571	121,148	-73,593
	noviembre	542	0	52,516	53,059	2,361	42,140	51,431	95,932	-42,873
	diciembre	3,253	0	74,160	77,413	1,858	35,686	73,122	110,666	-33,252
2022	enero	0	365,731	93,591	459,323	2,090	46,211	57,025	105,326	353,997
Total		16,809	1,940,371	842,858	2,800,039	51,220	629,798	848,454	1,529,471	1,270,567

Figura 33

Volúmenes mensuales de entradas y salidas de agua en el sitio LG



5.7. Entregas de agua ambiental y recarga al acuífero

Se graficaron los volúmenes de entregas de agua diarias por compuerta en forma de barras apiladas y los volúmenes de recargas subterráneas diarios por área de influencia de los piezómetros (Figuras 34-37) y totales (Figura 38) con el objetivo de comparar y analizar la posible relación entre la forma (frecuencia y magnitud) de las entregas de agua ambiental en el sitio y las recargas al acuífero.

Se observa que en el área de influencia del piezómetro RC15 (Figura 34), los eventos de mayor volumen de recarga ocurrieron en los meses de diciembre de 2021 y enero de 2022, meses en los que no hubo entregas de agua ambiental para irrigación lo cual puede deberse al movimiento de agua subterránea de aguas arriba hacia aguas abajo como consecuencia de los flujos federales. De las gráficas de las áreas de influencia RC28 y RC29 (Figuras 36 y 37) se infiere que los eventos de volúmenes de recargas mayores se relacionan con las entregas por el canal CILA, el cual alimenta principalmente a las parcelas de restauración que se encuentran en la zona oeste del sitio, misma donde se ubican dichos piezómetros.

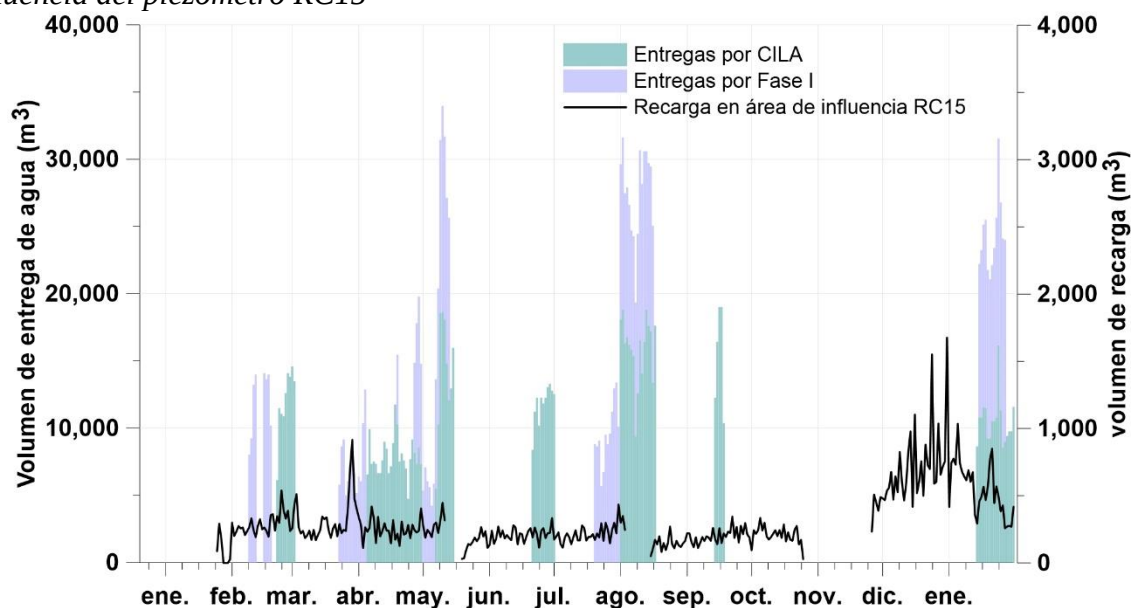
En la gráfica de la Figura 38, se presenta la suma de los volúmenes de recarga de las cuatro áreas de influencia. Cabe destacar que el comportamiento de la gráfica de recarga total responde principalmente a las entregas de agua ambiental por el canal CILA, ya que la mayor aportación es la del área de influencia del piezómetro RC29.

Se observa una tendencia al aumento de la recarga que inicia en el mes de noviembre y continúa hasta el final del periodo (Figura 38) a pesar de que no hubo aportaciones por entregas de agua ambiental en los meses de octubre, noviembre y diciembre. De la revisión de los registros de los niveles de agua en la regleta del sitio de aforo DMS-11 (CILA, 2021), la cual se ubica aguas arriba del sitio LG, se observó que el nivel de agua superficial en el cauce del río disminuyó durante el periodo de septiembre a diciembre, por lo que se descartó la posibilidad de que las recargas estimadas en dicho periodo fuesen debido a una recarga propiciada por la presencia de agua adicional en el río. Por tanto, se dedujo que las recargas de octubre a diciembre pudieron ser consecuencia de un cambio en el gradiente hidráulico derivado de la ausencia de entregas de agua para riego del sitio LG y que ocasionó un flujo preferencial de aguas arriba hacia aguas abajo en el corredor ribereño del RC que favoreció al sitio LG.

A pesar de que en las gráficas correspondientes a las áreas de influencia de los piezómetros RC15 y RC16 (Figuras 34 y 35) no se visualice un comportamiento similar entre las recargas y las entregas de agua ambiental para irrigación a diferencia de las correspondientes a las de los piezómetros RC28 y RC29, no se descarta su influencia en la recarga del acuífero. Esto debido a que se conoce que el agua es entregada por los canales CILA o Fase I pero se desconoce la distribución del agua dentro de la red de canales para riego de las parcelas. La velocidad con la que responde la recarga al acuífero a un evento de irrigaciones, se ve reflejada en las variaciones de los registros de ENF, depende de la magnitud del evento, de la ubicación de las parcelas hacia donde fueron dirigidos los flujos superficiales, su cercanía con los piezómetros, así como de las características hidrogeológicas y físicas del suelo (textura, contenido de humedad, etc.).

Figura 34

Volúmenes diarios de recarga al acuífero y de entregas de agua ambiental en el área de influencia del piezómetro RC15

**Figura 35**

Volúmenes diarios de recargas al acuífero y de entregas de agua ambiental en el área de influencia del piezómetro RC16

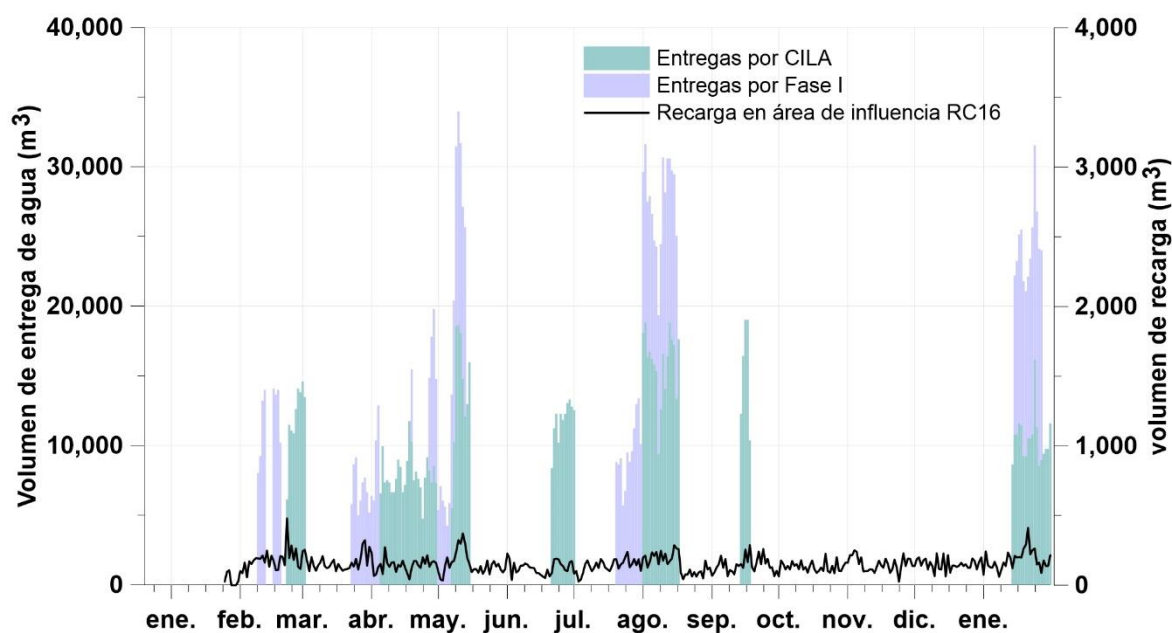
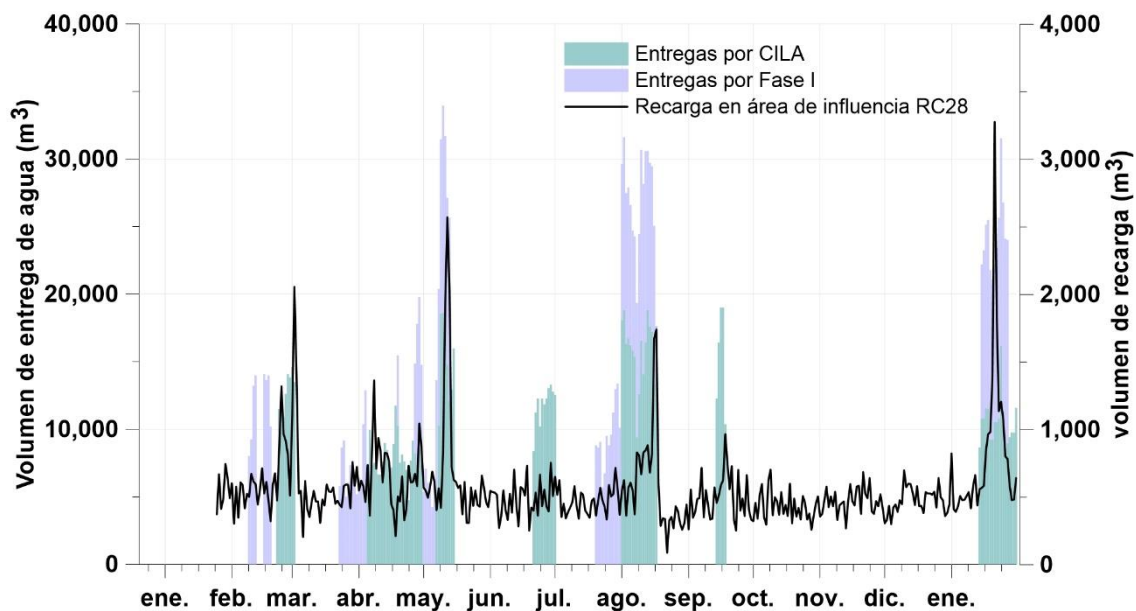


Figura 36

Volúmenes diarios de recargas al acuífero y de entregas de agua ambiental en el área de influencia del piezómetro RC28.

**Figura 37**

Volúmenes diarios de recargas al acuífero y de entregas de agua ambiental en el área de influencia del piezómetro RC29.

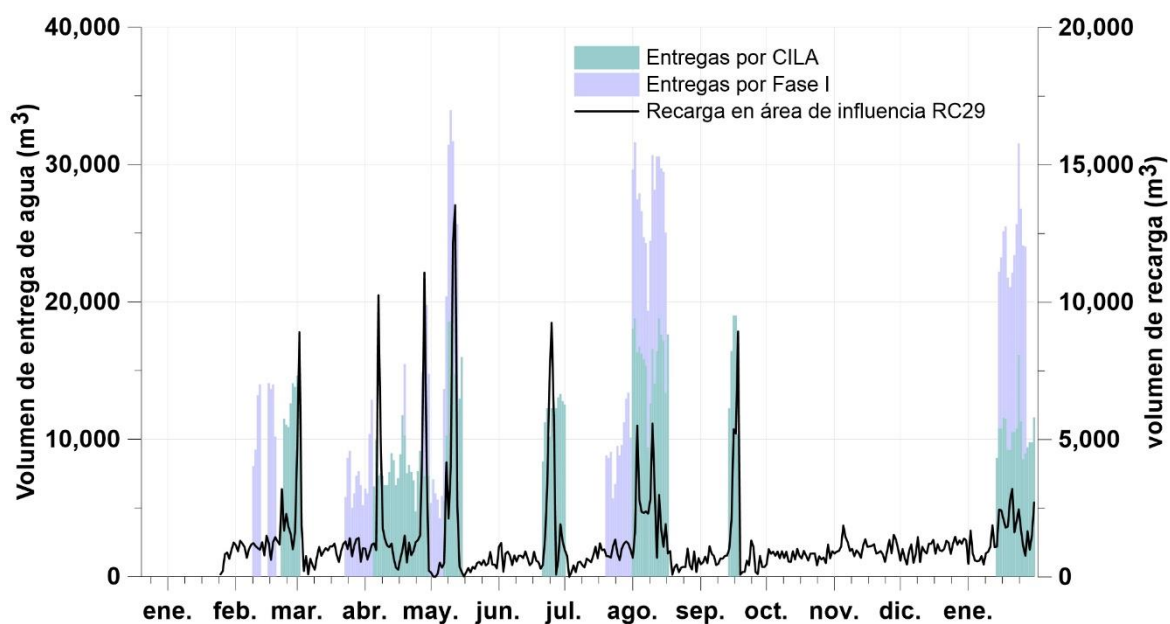
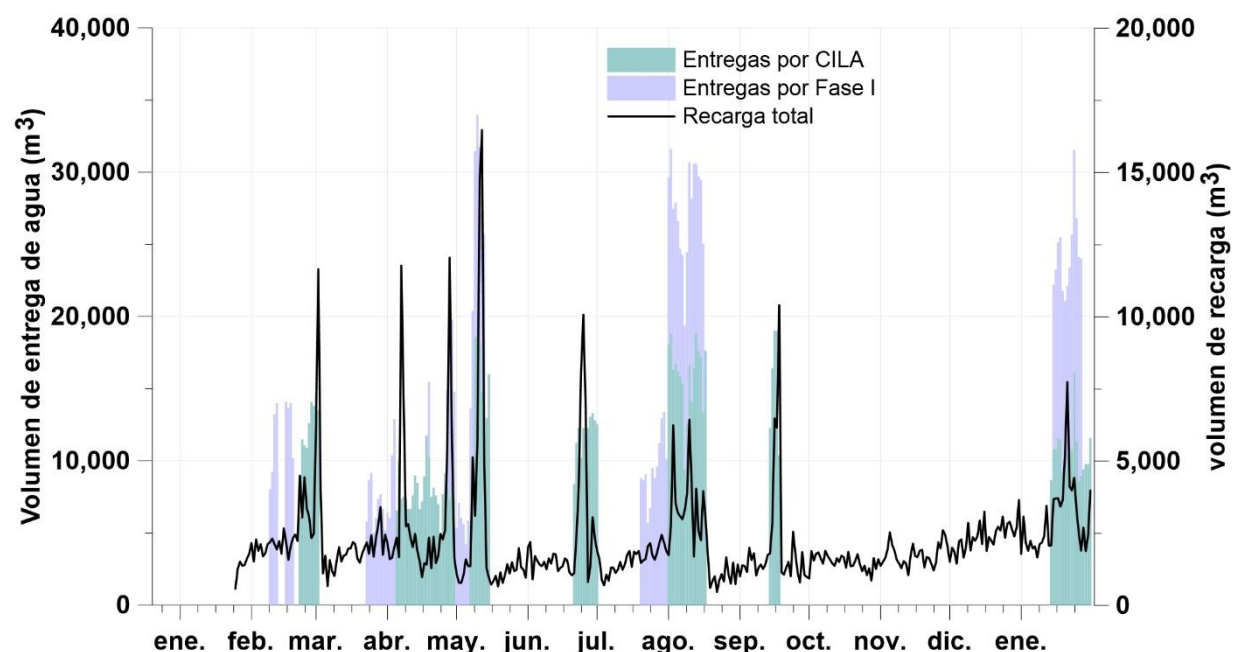


Figura 38

Volúmenes diarios de recargas al acuífero y de entregas de agua ambiental totales



5.8. Escenarios de modificación de las variables del balance hidrológico

Como parte del manejo adaptativo de los sitios de restauración se deben de analizar las condiciones hidrológicas actuales y futuras que pudiesen tener un impacto en la conservación de estos sitios y generar planes de acción para prevenir impactos negativos. Por lo anterior, anticipando las posibles consecuencias de los recortes estipulados en el Acta 323 (CILA, 2017), se propusieron cuatro escenarios de balance hidrológico del sitio de restauración LG en los que se modificaron los volúmenes mensuales de entregas de agua ambiental para irrigación.

El primer escenario consistió en la reducción anual del 50% en las entregas de agua ambiental al sitio, el segundo considera igualar las entregas de agua mensuales a la evapotranspiración mensual; el tercero, un escenario en los que no se realizan entregas de agua ambiental durante todo el año; el cuarto escenario consistió en disminuir gradualmente la ENF en todos los piezómetros hasta alcanzar 1 m al final del período simulado manteniendo la entrega de agua ambiental como se realizó durante el 2021.

Este último escenario tiene por objeto considerar los posibles recortes en el suministro de agua para uso agrícola y la tendencia de profundización del nivel de agua subterránea (CILA, por publicar) aguas arriba del sitio de estudio (25 km), considerando que la recarga y descarga subterránea representan un porcentaje importante del balance, ambas variables están asociadas a los retornos de riego agrícola y otras fuentes de recarga. Con estas ENF modificadas se calcularon nuevos volúmenes de recarga y descarga del acuífero con la finalidad de reflexionar sobre sus posibles consecuencias en el balance hidrológico del sitio de estudio.

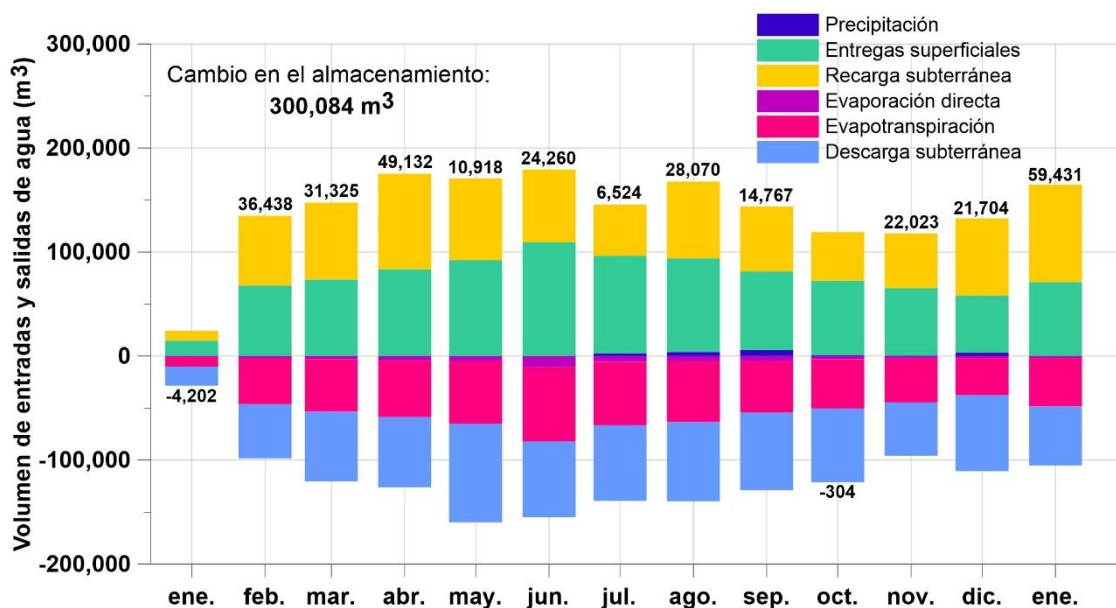
5.8.1. Escenario 1. Reducción del 50% en las entregas de agua

En el escenario 1 se contempló una reducción anual del 50% en el volumen de entregas de agua ambiental para irrigación. Se modificaron los volúmenes de entregas de agua mensuales de manera que fueran equivalentes al 154% del volumen mensual de evapotranspiración, mientras que el resto de las variables del balance hidrológico se conservaron sin cambios.

En este escenario solo se presentaron déficits en el almacenamiento en los meses de enero y octubre de 2021 (Figura 39), en comparación en el balance hidrológico 2021-2022 donde se presentaron déficits en los meses de enero, octubre, noviembre y diciembre de 2021. El balance hidrológico para el escenario analizado resultó en un superávit de 300,084 m³, lo que indica que con la reducción de las entregas de agua ambiental en un 50% aún se pueden cumplir con excedencia los requerimientos hídricos de la vegetación si se distribuyen las entregas con base en la demanda de agua de la vegetación a lo largo del año. Esto implica la disponibilidad de contar con agua ambiental para ser aplicada por parte del módulo de riego, lo cual históricamente no ha sucedido.

Figura 39

Gráfica del balance hidrológico para el escenario 1



5.8.2. Escenario 2. Entrega de agua igual al requerimiento hídrico de la vegetación

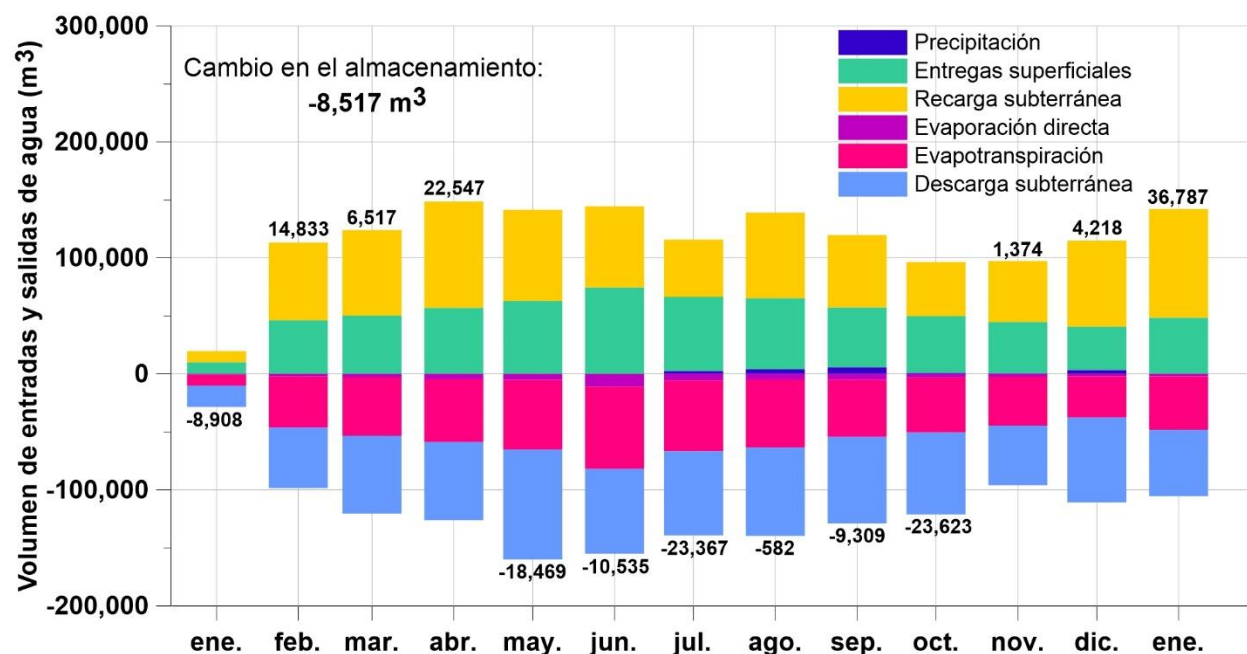
Para el escenario 2, se modificaron los volúmenes de entregas de agua ambiental mensuales de manera que fueran equivalentes al 105% del volumen de evapotranspiración mensual. Este porcentaje se propuso considerando que el requerimiento hídrico de la vegetación equivale al volumen evapotranspirado y se contempló un 5% adicional de la ET para compensar el porcentaje de error de la estación climatológica. Las variables restantes del balance hidrológico 2021-2022 se conservaron sin cambios.

Se observa en la Figura 40 que en este escenario se presentaron déficits en los meses de enero y de mayo a octubre de 2021. El balance hidrológico para el escenario propuesto resultó en un déficit de -8,517 m³. Este escenario plantea que es posible lograr una reducción del volumen de entregas de agua ambiental anual de hasta un 65% de lo entregado durante el balance hidrológico 2021-2022 al sumar el déficit en el periodo de 8,517 m³ al volumen entregado en este escenario y aun así cumplir con los requerimientos hídricos de la vegetación nativa del sitio LG. De igual forma,

se considera que la aplicación del agua ambiental se realiza acorde con la demanda de agua de la vegetación ribereña estimada con la ET.

Figura 40

Gráfica del balance hidrológico del escenario 2

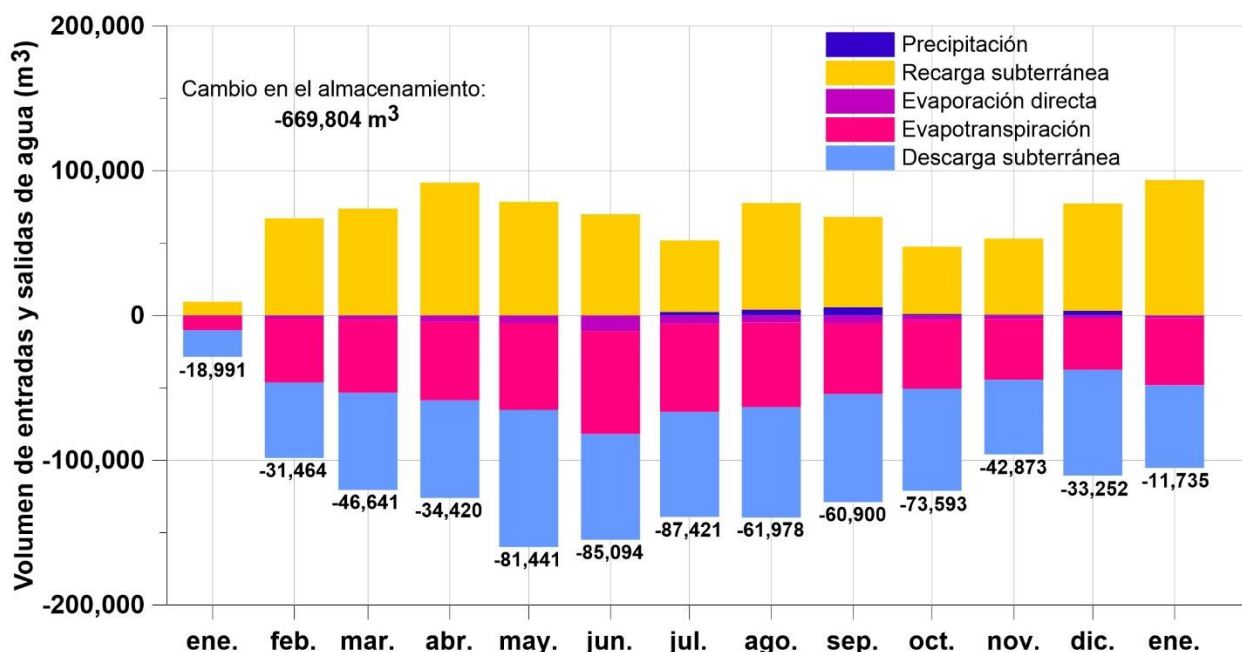


5.8.3. Escenario 3. Corte de agua ambiental

En el escenario 3 se eliminaron los volúmenes de entregas de agua ambiental para irrigación de la zona de restauración, los volúmenes mensuales del resto de las variables se conservaron igual que el balance hidrológico 2021-2022. Como se observa en la Figura 41, se presentaron déficits en el almacenamiento mensual en todos los meses del periodo, sumando un déficit total de $669,804 \text{ m}^3$. Esto implicaría que se requiere al menos del volumen de déficit obtenido en este escenario como entregas de agua ambiental para satisfacer las necesidades hídricas de la vegetación.

Figura 41

Gráfica del balance hidrológico del escenario 3



5.8.4. Escenario 4. Reducción de 1 m de la ENF

En el escenario 4 se planteó una disminución de la ENF utilizando como referencia los registros en cada piezómetro durante el periodo de estudio, la disminución de un metro en total se realizó de manera gradual para que del inicio de los registros al final del periodo disminuyera un metro (Figura 42).

Se realizaron los cálculos correspondientes para estimar la recarga y descarga subterránea utilizando los datos de ENF del escenario propuesto (Figura 43) utilizando la metodología descrita en la sección 4.4.3 y se encontró que, con respecto a los valores estimados durante el periodo de estudio, la recarga fue menor y la descarga mayor durante todos los meses. Durante el escenario analizado, la recarga disminuyó un 5% ($42,096 \text{ m}^3$) mientras que la descarga subterránea aumentó un 7% ($55,493 \text{ m}^3$). Lo anterior es debido a que se disminuyó el nivel freático, y al realizar las modificaciones en el patrón de tendencia general la descarga subterránea aumenta.

Aunque los porcentajes de cambio no representen una diferencia aparentemente significativa en cuanto a volumen de agua en comparación con el balance hidrológico 2021-2022, la disminución

de la ENF podría comprometer la supervivencia y el desarrollo de la vegetación nativa, ya que un descenso en la ENF de un metro implicaría que el nivel freático alcance más de los 4 m de profundidad en algunas épocas del año, mientras que los álamos y sauces desarrollan raíces moderadamente profundas que alcanzan solamente los 3 m de profundidad (Zimmerman, 1969).

Figura 42

Registros de elevación del nivel freático adecuados para el escenario 4

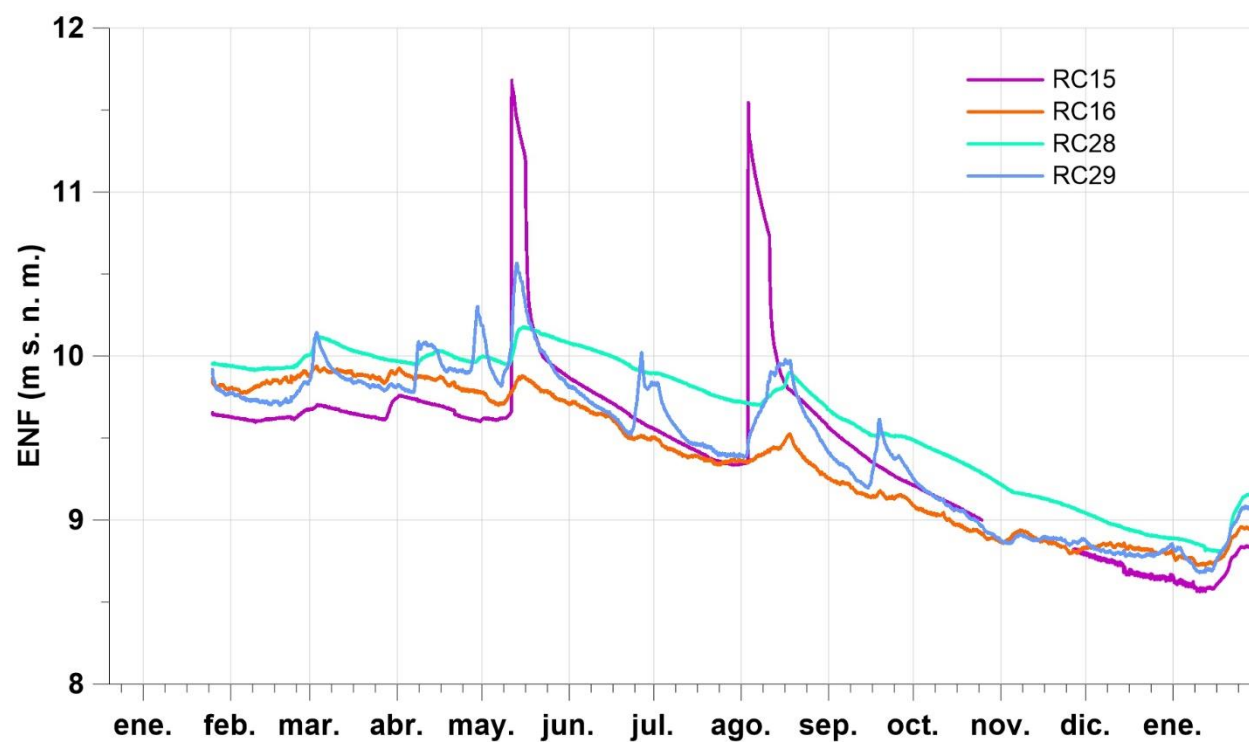
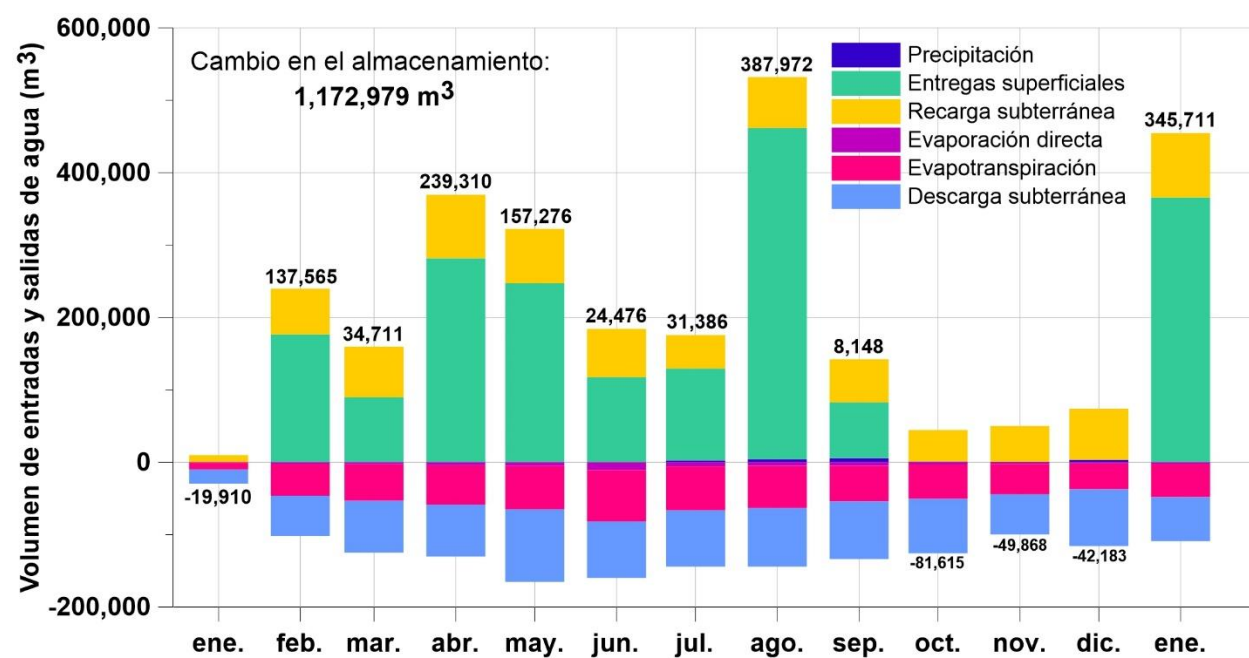


Figura 43

Gráfica del balance hidrológico del escenario 4



6. Conclusiones

La obtención de la variación horaria de la ENF en los cuatro piezómetros, las mediciones horarias de las variables climatológicas dentro del sitio, el análisis textural del suelo y los datos de volúmenes de entregas de agua ambiental permitieron obtener el balance hidrológico anual del sitio de restauración Laguna Grande para el periodo de enero de 2021 a enero de 2022.

Definición de las variables del balance hidrológico

- Se realizó el modelo conceptual del régimen hidrológico del sitio LG y se determinó que las entradas de agua al sitio las conforman las entregas de agua ambiental para irrigación, la precipitación y las recargas al acuífero, englobando esta última tanto a las recargas horizontales como a las verticales. Entre las salidas de agua se encuentran la evaporación, la evapotranspiración directa y las descargas subterráneas.

Análisis de las variables del medio físico

- Se observó una tendencia en la proporción de limos y arcillas a aumentar con la profundidad de las muestras. El horizonte de suelo ubicado a 1.5 m de profundidad está constituido por hasta 60% de arenas, a 3 m de profundidad presenta la mayor variabilidad en su composición predominando las arenas y a 5 m de profundidad los suelos están mayormente compuestos por una mezcla de arcillas y limos. Por lo anterior, los valores de Sy promedio por profundidad disminuyeron conforme la profundidad aumentaba. El Sy promedio a una profundidad de 1.5 m fue de 0.17, a 3 m fue de 0.12 y a 5 m fue de 0.06.
- Con base en los resultados de ST realizados los años 2008, 2011 y 2021 se deduce que no ha habido un cambio sustancial en las concentraciones de ST presentes en el sitio de LG desde antes del inicio de las actividades de reforestación hasta la fecha del muestreo realizado en 2021. Las condiciones de salinidad mayores a 8,000 ppm presentadas en la zona este del sitio LG podrían dificultar el desarrollo de las especies de vegetación nativa y favorecer a las especies invasoras.

Balance hidrológico

- El balance hidrológico anual general del sitio LG para el periodo de enero 2021 a enero 2022 indica que los volúmenes de entregas de agua ambiental constituyeron el 69% de las entradas de agua, siendo estas el principal aporte al sistema. La precipitación aportó solamente el 1% del volumen total anual de entradas de agua al sistema. En general, el cambio en el almacenamiento del periodo analizado resultó en un superávit de 1,270,567 m³.
- Se presentaron déficits en el balance en enero, octubre, noviembre y diciembre del año 2021, meses en los que no hubo aportes por entregas de agua ambiental para irrigación. Durante esos meses, el volumen de agua evapotranspirado acumulado representó el 80% del déficit acumulado.
- El volumen anual de entrega de agua ambiental para irrigación triplicó el requerimiento hídrico anual de la vegetación del sitio LG. Los volúmenes mensuales de entregas de agua ambiental variaron entre el 0% y 791% con respecto al requerimiento hídrico mensual de la vegetación.

Escenarios del balance hidrológico

- Los escenarios 1 y 2 sugieren que el volumen anual de agua entregado en el periodo estudiado se puede reducir hasta en un 65% y aun así compensar las pérdidas por ET, es decir, el 35% del agua entregada en el periodo de estudio sería suficiente para cumplir con el requerimiento hídrico del periodo analizado.
- Para lograr una reducción de hasta el 65% del volumen de agua anual entregado en el balance hidrológico 2021-2022 se requiere realizar una redistribución semanal y mensual de las entregas de agua ambiental para irrigación que consideren como base el volumen evapotranspirado.
- Con base en el escenario 3 se deduce que, sin considerar un volumen de entregas de agua ambiental para irrigación, los volúmenes de entradas de agua no serían suficientes para compensar las pérdidas por evapotranspiración de la vegetación ya que se presentan déficits en el balance en todos los meses, sumando un déficit anual de 669,804 m³.

- Del escenario 4 se concluye que un descenso de un metro en la ENF implicaría que el nivel freático alcanzara una profundidad mayor a 4 m en algunas épocas del año, lo que podría comprometer la salud y supervivencia de algunas especies de vegetación ribereña como álamos y sauces cuyas raíces alcanzan 3 m de longitud.
- El desarrollo de este trabajo contribuye a los pasos 3, 4 y 5 del proceso del manejo adaptativo propuesto por [Conservation Measures Partnership \(2013\)](#) con el diseño e implementación de un monitoreo hidrológico y climatológico que permitió obtener el balance hidrológico anual del sitio de restauración Laguna Grande. El análisis de los resultados del balance hidrológico aporta información que pretende ser de utilidad para asegurar la sostenibilidad del sitio LG al proponer una cantidad de agua mínima requerida para su riego basado en el requerimiento hídrico de la vegetación.

7. Recomendaciones

- Como parte del manejo adaptativo se propone implementar monitoreos sistemáticos y continuos de la salinidad a diferentes profundidades tanto en suelo como del agua subterránea.
- El cumplimiento del requerimiento hídrico de la vegetación implica la modificación de las entregas de agua ambiental para irrigación, no solo en magnitud sino también en frecuencia. Es posible realizar un análisis de ET a menor escala temporal (diario, semanal, quincenal) y espacial (por tipo de vegetación o por parcela) para lograr una estimación del volumen de riego requerido con mayor precisión. Con lo anterior, se recomienda realizar un balance a menor escala para programar los volúmenes de agua ambiental, y realizar obras de captación y almacenamiento para cubrir los requerimientos de agua del sitio cuando no se puedan obtener las entregas por parte del módulo de riego o por algún otro inconveniente.
- El volumen de agua que rebase el requerimiento hídrico de la vegetación del sitio LG podría ser derivado a otros sitios de restauración del CRLG mediante la implementación de un sistema de manejo hidráulico que los conecte.
- Cabe recalcar que los datos recabados para este estudio corresponden a los de un año extraordinario en el que se entregaron flujos con fines ambientales por el cauce del RC del 1 de mayo al 11 de octubre de 2021. Este trabajo podría servir como referencia para otros análisis que pretendan medir los efectos de la entrega de flujos ambientes en los sitios de restauración del corredor ribereño.

8. Apéndice

Resultados del análisis de la textura del suelo

ID	Sitio	Profundidad (m)	% Arena	% Arcilla	% Limo	Textura
1	MS3	1.5	66.0	21.2	12.7	Franco arcillo arenosa
2	MS3	3.0	40.0	32.0	28.0	Franco arcillosa
3	MS3	5.0	18.0	40.0	42.0	Franco arcillo limosa
4	MS4	1.5	80.0	18.0	2.0	Franco arenosa
5	MS4	3.0	87.0	10.0	3.0	Areno francosa
6	MS4	5.0	75.0	14.0	11.0	Franco arenosa
7	MS6	1.5	72.0	16.0	12.0	Franco arenosa
8	MS6	3.0	70.0	16.0	14.0	Franco arenosa
9	MS6	5.0	6.8	25.6	67.6	Franco limosa
10	MS7	1.5	71.4	15.0	13.6	Franco arenosa
11	MS7	3.0	67.0	17.0	16.0	Franco arenosa
12	MS7	5.0	38.4	28.6	33.0	Franco arcillosa
13	MS8	1.5	38.0	20.6	41.4	Franca
14	MS8	3.0	0.8	32.6	66.6	Franco arcillo limosa
15	MS8	5.0	38.4	24.6	37.0	Franca
16	MS9	1.5	76.4	12.6	11.0	Franco arenosa
17	MS9	3.0	57.4	19.6	23.0	Franco arcillo arenosa
18	MS9	5.0	8.8	22.6	68.6	Franco limosa
19	MS10	1.5	74.8	9.6	15.6	Franco arenosa
20	MS10	3.0	32.8	11.6	55.6	Franco limosa
21	MS10	5.0	62.8	21.6	15.6	Franco arcillo arenosa
22	MS12	1.5	20.8	14.6	64.6	Franco limosa
23	MS12	3.0	26.0	16.6	57.3	Franco limosa
24	MS12	5.0	12.8	22.6	64.6	Franco limosa
25	MS16	1.5	66.8	11.6	21.6	Franco arenosa
26	MS16	3.0	62.8	13.6	23.6	Franco arenosa
27	MS16	5.0	0.0	31.6	68.4	Franco arcillo limosa
28	MS17	1.5	48.8	13.6	37.6	Franca
29	MS17	3.0	12.0	25.0	63.0	Franco limosa
30	MS17	5.0	30.0	16.0	54.0	Franco limosa
31	MS18	1.5	74.0	9.0	17.0	Franco arenosa
32	MS18	3.0	46.0	15.0	39.0	Franca
33	MS18	5.0	2.0	26.0	72.0	Franco limosa
34	MS19	1.5	44.0	12.0	44.0	Franca
35	MS19	3.0	32.0	17.0	51.0	Franco limosa
36	MS19	5.0	8.0	18.0	74.0	Franco limosa
37	MS20	1.5	72.0	10.0	18.0	Franco arenosa
38	MS20	3.0	46.0	13.0	41.0	Franca
39	MS20	5.0	16.0	16.0	68.0	Franco limosa

9. Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Evapotranspiración del cultivo – Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Estudio FAO Riego y Drenaje 56. FAO.
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliott, R. L., Howell, T. A., Itenfisu, D., Jensen, M. E., & Snyder, R. L. (2005). ASCE sandardized reference evapotranspiration equation. ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation, 1–203. <https://doi.org/10.1061/9780784408056>
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Brisbane Declaration (2007). Summary Findings and a Global Action Agenda. 10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference, 3–6 September 2007, Brisbane, Australia. <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/ELOHA/Documents/Brisbane-Declaration-English.pdf>
- Bunting, D. P., Kurc, S. A., & Grabau, M. R. (2011). Using existing agricultural infrastructure for restoration practices: Factors influencing successful establishment of *Populus fremontii* over *Tamarix ramosissima*. *Journal of Arid Environments*, 75, 851–860. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.03.013>
- Cambraia Neto, A. J., & Rodrigues, L. N. (2020). Evaluation of groundwater recharge estimation methods in a watershed in the Brazilian Savannah. *Environmental Earth Sciences*, 79(6), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8884-x>
- Carabias, J., Arriaga, V., & Cervantes Gutiérrez, V. (2007). Las políticas públicas de la restauración en México: limitantes, avances, rezagos y retos. *Boletín de La Sociedad Botánica de Mexico*, 80, 85–100. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57708009>
- Carabias, J., De la Maza, J., & Cadena, R. (2015). Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona: 25 años de actividades y experiencias. México. *Natura y Ecosistemas Mexicanos*.
- CILA. 2021. Reporte ejecutivo ESTUDIO Y MONITOREO HIDROGEOLÓGICO EN LA ZONA RIBEREÑA DEL RÍO COLORADO EN QUE SE REALIZAN LAS ENTREGAS DE AGUA PARA PROPOSITOS AMBIENTALES EN EL MARCO DEL ACTA 323 DURANTE 2021. Universidad Autónoma de Baja California
- Cohen, M. (2013). *Groundwater Dynamics in the Colorado River Limitrophe*.
- Comisión Internacional de Límites y Aguas. (2018). Informe Final del Acta 319 sobre el monitoreo de Flujos Ambientales en el Tramo Limítrofe y Delta del Río Colorado.
- Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos. (2012). Acta 319. Medidas Interinas de Cooperación Internacional en la Cuenca del Río Colorado Hasta el 2017 y Ampliación de las Medidas de Cooperación del Acta 318, Para Atender los Prolongados Efectos del Sismo del 2010 en el Valle de Mexicali, Baja California. <http://www.cila.gob.mx/actas/319.pdf>
- Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos. (2017). Acta 323. Ampliación de las medidas de cooperación y adopción de un plan binacional de contingencia ante la escasez de agua en la cuenca del Río Colorado. <https://cila.sre.gob.mx/cilanorte/index.php>

- Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos. (2022). Primer Informe Bienal de Monitoreo de Flujos Ambientales en el Tramo Limítrofe y Delta del Río Colorado. <http://www.cila.gob.mx/rc/imf2018.pdf>
- CONAFOR-UACH. (2013). Línea base nacional de degradación de tierra y desertificación. Informe final.
- Conservation Measures Partnership (2013) Open standards for the practice of conservation. www.cbd.int/doc/pa/tools/Open%20standards%20for%20the%20practice%20of%20conservation.pdf
- Cooper, D. J., & Andersen, D. C. (2012). Novel plant communities limit the effects of a managed flood to restore riparian forests along a large regulated river. *River Research and Applications*, 28(2), 204–215. <https://doi.org/10.1002/rra.1452>
- Cortez Lara, A. (1999). Dinámicas y conflicto por las aguas transfronterizas del Río Colorado: el proyecto All-American Canal y la sociedad hidráulica del Valle de Mexicali. *Revista Frontera Norte*, El Colegio de La Frontera, BC., ..., 11(21), 33–60. http://www2.colef.mx/FronteraNorte/articulos/FN21/2-f21_Dinamica_y_conflicto_aguas_transfronterizas_rio_colorado.pdf
- Crespo-Villalaz, C. (2014). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México, D.F.: Limusa.
- Davis Instruments. (n.d.). Derived Variables in Davis Weather Products. Application Note 28. https://cdn.shopify.com/s/files/1/0515/5992/3873/files/AN_28-derived-weather-variables.pdf
- Delottier, H., Pryet, A., Lemieux, J. M., & Dupuy, A. (2018). Estimating groundwater recharge uncertainty from joint application of an aquifer test and the water-table fluctuation method. *Hydrogeology Journal*, 26(7), 2495–2505. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1790-6>
- Diaz Cabrera, P. (2001). Simulación numérica del acuífero superior del Valle de Mexicali, Baja California, México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3rd ed.). Waveland Press, Inc.
- Djaman, K., Koudahe, K., Allen, S., O'Neill, M., & Irmak, S. (2017). Validation of Valiantzas Reference Evapotranspiration Equation under Different Climatic Conditions. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 06(03). <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000196>
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y La Alimentación, (4), 100.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied hydrogeology* (4th ed.). Pearson Education Limited.
- Feirstein, E. J., Zamora, F., Vionnet, L. B., & Thomas, M. (2008). Simulation of groundwater conditions in the Colorado River Delta, Mexico (Master thesis) [University of Arizona]. <http://hdl.handle.net/10150/615772%09>
- Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1–S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- Gleick, P. H. (1998). This content downloaded from 128.163.2.206 on Sun. In *SYSTEMS 571 Ecological Applications* (Vol. 8, Issue 3).
- Glenn, E., Tanner, R., Mendez, S., Kehret, T., Moore, D., Garcia, J., & Valdes, C. (1998). Growth rates, salt tolerance and water use characteristics of native and invasive riparian plants from the delta of the Colorado River, Mexico. In *Journal of Arid Environments*.

- González, E., Sher, A. A., Tabacchi, E., Masip, A., & Poulin, M. (2015). Restoration of riparian vegetation: A global review of implementation and evaluation approaches in the international, peer-reviewed literature. *Journal of Environmental Management*, 158, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.033>
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Hinojosa Huerta, O., García-Hernández, J., Carrillo-Guerrero, Y., & Zamora-Hernández, E. (2007). Hovering over the Alto Golfo: The status and conservation of birds from the Río Colorado to the Gran Desierto. In *Dry Borders: Great Natural reserves of the Sonoran Desert* (pp. 383–407). University of Utah Press.
- IBWC. (2017). Extension of cooperative measures and adoption of a binational water scarcity contingency plan in the Colorado River Basin. <https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/4200Rpts/DecreeRpt/2018/43.pdf>
- Jafari, H., Sudegi, A., & Bagheri, R. (2019). Contribution of rainfall and agricultural returns to groundwater recharge in arid areas. *Journal of Hydrology*, 575(May), 1230–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.029>
- Jarchow, C. J., Nagler, P. L., Glenn, E. P., Ramírez-Hernández, J., & Rodríguez-Burgueño, J. E. (2017). Evapotranspiration by remote sensing: An analysis of the Colorado River Delta before and after the Minute 319 pulse flow to Mexico. *Ecological Engineering*, 106, 725–732. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.056>
- Kendy, E., Flessa, K. W., Schlatter, K. J., de la Parra, C. A., Hinojosa, O. M., Carrillo-Guerrero, Y. K., Guillen, E., Hinojosa Huerta, O. M., Carrillo-Guerrero, Y. K., & Guillen, E. (2017). Leveraging environmental flows to reform water management policy: Lessons learned from the 2014 Colorado River Delta pulse flow. *Ecological Engineering*, 106, 683–694. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.012>
- Labrecque, G., Chesnaux, R., & Boucher, M. A. (2020). Water-table fluctuation method for assessing aquifer recharge: application to Canadian aquifers and comparison with other methods. *Hydrogeology Journal*, 28(2), 521–533. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02073-1>
- Love, M., Baldera, A., & Robbins, C. (2018). The benefits of adaptive management: Three case studies from ecosystem restoration programs around the U.S. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17763.86567>
- Luecke, D. F., Pitt, J., Congdon, C., Glenn, E., Valdés-Casillas, C., & Briggs, M. (1999). *A Delta Once More: Restoring Riparian and Wetland Habitat in the Colorado River Delta*. Environmental Defense Fund.
- Martin, D. M. (2017). Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. *Restoration Ecology*, 25(5), 668–673. <https://doi.org/10.1111/rec.12554>
- Moreno-Casasola Barceló, P. (2009). Propuesta de extrapolación de una experiencia de restauración de humedales. (Issue Proyecto FH001).
- Mueller, E. R., Schmidt, J. C., Topping, D. J., Shafroth, P. B., Rodríguez-Burgueño, J. E., Ramírez-Hernández, J., & Grams, P. E. (2017). Geomorphic change and sediment transport during a small artificial flood in a transformed post-dam delta: The Colorado River delta, United States and Mexico. *Ecological Engineering*, 106, 757–775. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.009>

- Murphy, D. D., & Weiland, P. S. (2014). Science and structured decision making: Fulfilling the promise of adaptive management for imperiled species. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(3), 200–207. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0165-0>
- Murray, C., & Marmorek, D. (2003). Adaptive Management and Ecological Restoration. In *Conducting Restoration* (pp. 417–428). <http://biology.illinoisstate.edu/rcander/BSC337/Reading Assignment Two/Murray and Marmorek Adaptive Management.pdf>
- National Research Council (2002). *Riparian Areas: Functions and Strategies for Management*. National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/10327>
- Palmer, M., & Ruhi, A. (2019). Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 365(6459). <https://doi.org/10.1126/science.aaw2087>
- Pérez González, D. (2008). Modelización hidráulica de la relación acuífero-Río Colorado en el Tramo FFCC-Vado Carranza como elemento para la restauración de la zona riparia. Universidad Autónoma de Baja California.
- Pitt, J., & Kendy, E. (2017). Shaping the 2014 Colorado River Delta pulse flow: Rapid environmental flow design for ecological outcomes and scientific learning. *Ecological Engineering*, 106(January 2017), 704–714. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.12.002>
- Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., Kendy, E., Salcedo-Peredia, A., & Lomeli, M. A. (2017). Hydrological response to an environmental flood: Pulse flow 2014 on the Colorado River Delta. *Ecological Engineering*, 106, 633–644. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.003>
- Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., Zamora-Arroyo, F., Carreón-Diazconti, C., & Pérez-González, D. (2015). Mimic pulse-base flows and groundwater in a regulated river in semiarid land: Riparian restoration issues. *Ecological Engineering*, 83, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.006>
- Ramos Velázquez, M. G. (2008). Correlación del tipo de suelo-nivel freático-cobertura vegetal en el corredor ripario del río Colorado en el tramo FFCC-Vado Carranza. Universidad Autónoma de Baja California.
- Reid, W. V., Mooney, H. A., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S. R., Chopra, K., Dasgupta, P., Dietz, T., Kumar Duraipapp, A., Hassan, R., Kaspersen, R., Leemans, R., May, R. M., McMichael, T. (A. J. ., Pingali, P., Samper, C., Scholes, R., Watson, R. T., Zakri, A. H., ... Zurek, M. B. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being*. Island Press.
- Riis, T., Kelly-quinn, M., Aguiar, F. C., Manolaki, P., Bruno, D., Bejarano, M. D., Clerici, N., Fernandes, M. R., Franco, J. C., Pettit, N., Portela, A. P., Tammeorg, O., Tammeorg, P., Rodríguez-González, P. M., & Dufour, S. (2020). Global Overview of Ecosystem Services Provided by Riparian Vegetation. *BioScience*, 70(May), 501–514. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa041>
- Rodríguez-Burgueño, J. E. (2011). *Modelación geohidrológica transitoria de la relación Acuífero-Río de la zona FFC -Vado Carranza del Río Colorado con propósitos de manejo de la zona riparia*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Rodríguez-Burgueño, J. E., Shanafield, M., & Ramírez-Hernández, J. (2017). Comparison of infiltration rates in the dry riverbed of the Colorado River Delta during environmental flows. *Ecological Engineering*, 106, 675–682. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.014>
- Rood, S. B., Samuelson, G. M., Braatne, J. H., Gourley, C. R., Hughes, F. M. R., & Mahoney, J. M. (2005). Managing river flows to restore floodplain forests. *Frontiers in Ecology and the*

- Environment, 3(4), 193–201. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0193:MRFTRF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0193:MRFTRF]2.0.CO;2)
- SEMARNAT. (2002). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SEMARNAT-2000 QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS, ESTUDIO, MUESTREO Y ANÁLISIS. In *Diario Oficial de la Federación México*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Schlatter, K. J., Grabau, M. R., Shafroth, P. B., & Zamora-Arroyo, F. (2017). Integrating active restoration with environmental flows to improve native riparian tree establishment in the Colorado River Delta. *Ecological Engineering*, 106, 661–674. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.015>
- Shafroth, P. B., Schlatter, K. J., Gomez-Sapiens, M., Lundgren, E., Grabau, M. R., Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., & Flessa, K. W. (2017). A large-scale environmental flow experiment for riparian restoration in the Colorado River Delta. *Ecological Engineering*, 106, 645–660. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.016>
- Shamloo, N., Taghi Sattari, M., Apaydin, H., Valizadeh Kamran, K., & Prasad, R. (2021). Evapotranspiration estimation using SEBAL algorithm integrated with remote sensing and experimental methods. *International Journal of Digital Earth*, 14(11), 1638–1658.
- Shanafield, M., Gutiérrez-Jurado, H., Rodríguez-Burgueño, J. E., Ramírez-Hernández, J., Jarchow, C. J., & Nagler, P. L. (2017). Short-term and long-term evapotranspiration rates at ecological restoration sites along a large river receiving rare flow events. *Hydrological Processes*, 31(24), 4328–4337. <https://doi.org/10.1002/hyp.11359>
- Shuttleworth, J. W. (1993). Evaporation. In *Handbook of hydrology*. McGraw Hill.
- Sonoran Institute. (2013). Zona de restauración Laguna Grande. Retrieved January 28, 2022, from <https://www.sonoraninstitutemexico.org/wp-content/uploads/2014/03/COLORADO-RIVER-DELTA-PROGRAM-RESTORATION-PROJECT-LAGUNA-GRANDE-09152013-VERSI%C3%93N-ESPA%C3%91OL.pdf>
- Suding, K. N. (2011). Toward an Era of Restoration in Ecology: Successes, Failures, and Opportunities Ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42(1), 465–487. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145115>
- Suding, K. N., Gross, K. L., & Houseman, G. R. (2004). Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(1), 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.10.005>
- Sykes, G. (1937). *Colorado Delta*. Special publication no. 19. Carnegie Institution of Washington and the American Geographical Society of New York.
- Tschebotarioff, G. (1958). *Mecánica del suelo*. Madrid: Aguilar
- USBR. (2015). Law of the River. <https://www.usbr.gov/lc/region/pao/lawofrvr.html>
- USGS. (n.d.). Hydraulic head and factors causing changes in ground water levels. Circular 1217-Box A. Retrieved January 26, 2022, from <https://pubs.usgs.gov/circ/circ1217/html/boxa.html>
- Valiantzas, J. D. (2006). Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. *Journal of Hydrology*, 331(3–4), 690–702. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.012>
- Valdez-Villavicencio, J. H., Peralta-García, A., González-Gutiérrez, N. S., Hernández-Morlán, X. I., & Hinojosa-Huerta, O. (2021). Diversity of the herpetofauna in restored and disturbed

- sites in the Colorado River Delta, Baja California, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92. <https://doi.org/10.22201/IB.20078706E.2021.92.3763>
- Vandersande, M. W., Glenn, E. P., & Walworth, J. L. (2001). Tolerance of five riparian plants from the lower Colorado River to salinity drought and inundation. *Journal of Arid Environments*, 49(1), 147–159. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0839>
- Zamora-Arroyo, F., Cornelis, S., Pitt, J., Glenn, E. P., Nagler, P. L., Moreno, M., Garcia, J., Hinojosa-Huerta, O., Garza, M. de la, & Parra, I. (2005). Conservation Priorities in the Colorado River Delta. June 2014, 1–103.
- Zamora-Arroyo, F., Hinojosa-Huerta, O., Santiago, E., Brott, E., & Culp, P. (2008). Collaboration in Mexico: Renewed Hope for the Colorado River Delta. *Nevada Law Journal*, 8(January 2008), 871–8.

