



**Universidad Autónoma del Estado
de México**

**Instituto Interamericano de Tecnología y
Ciencias del Agua**



*Análisis del balance de masa de Nitrógeno y Fósforo en el
Distrito de Riego del Río Yaqui (Sonora) y su relación con
la calidad del agua subterránea y de la Bahía de Tóbari*

TESIS

Que para obtener el grado de Maestra en Ciencias del Agua

Presenta

BÁRBARA DEL ROSARIO ALMAZÁN BENÍTEZ

Directora

Dra. María Vicenta Esteller Alberich

Codirectores

Dra. Sofía E. Garrido Hoyos

Dr. José Luis Expósito Castillo

Toluca de Lerdo, noviembre de 2019

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a las siguientes instituciones y personas que me apoyaron durante mis estudios de maestría:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para mis estudios de maestría en Ciencias del Agua.

Al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), por el patrocinio para la realización de la Tesis.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por el financiamiento y apoyo para la investigación.

Al Distrito de Riego del Río Yaqui (DRRY), por la información proporcionada y las facilidades otorgadas durante el trabajo de campo.

Al laboratorio de edafología de la UAEMéx por las facilidades para realizar los análisis de suelos.

A la Dra. Esteller, directora de esta investigación, que me guio y apoyo durante el desarrollo de la tesis, a quien aprecio demasiado y siempre le estaré agradecida por dedicarme su tiempo y por sus invaluable consejos, sugerencias y recomendaciones.

A la Dra. Sofía por sus contribuciones tanto académicas como personales que siempre tendré presentes y por todo el apoyo para el desarrollo de la investigación.

Al Dr. José Luis por sus sugerencias y comentarios que contribuyeron e hicieron mejorar notablemente esta tesis.

Al Dr. Carlos Díaz por sus valiosas aportaciones que fortalecieron la estructura de esta investigación.

Al Dr. G. Pedro Morales, Dra. Edith Salcedo y Dr. Humberto Rosales por el tiempo y disponibilidad para trabajar en la revisión de esta tesis.

Dedicatoria

Con todo mi amor y cariño a mis queridos padres que me han apoyado y motivado siempre y han confiado en mí, gracias papá, gracias mami.

A mis hermanos que me hicieron compañía todo este tiempo, a mi novio por el apoyo emocional y motivacional que tanto necesité.

RESUMEN

La contaminación por actividades agrícolas, que puede afectar tanto a las aguas superficiales como subterráneas, ocurre, principalmente, debido a la aplicación de fertilizantes en cantidades mayores a las que los cultivos pueden necesitar para su desarrollo. El Distrito de Riego del Río Yaqui es uno de los distritos agrícolas con mayor extensión y producción en México, y en este distrito se adicionan a los cultivos grandes cantidades de fertilizantes cuyos componentes principales son Nitrógeno (N) y Fósforo (P).

El objetivo de esta investigación fue analizar el balance de masa de Nitrógeno (N) y Fósforo (P) en los diferentes componentes del balance hídrico en un área piloto del Distrito de Riego del Río Yaqui para evaluar la posible contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos producto de la actividad agrícola.

El Distrito de Riego del Río Yaqui tiene una extensión total de 255,000 hectáreas con un sistema de riego y drenaje muy extenso. El sistema de drenaje está conformado por drenes colectores principales y secundarios, y debido a su gran extensión y a la complejidad del sistema, se identificó un dren colector principal para realizar la caracterización del sistema y, posteriormente, dentro del área de drenaje de este dren, se seleccionó un bloque de 400 hectáreas como área piloto para la estimación del balance hídrico, así como del balance de masa de N y P.

Se estudiaron los cultivos de trigo y maíz ya que sus ciclos de cultivo se desarrollan en el mismo periodo del año con una duración muy similar y son los de mayor superficie cultivada. Para cada uno de estos tipos de cultivo se identificaron los periodos y cantidades de riego y fertilización. Se tomaron muestras de agua de riego, de drenaje y subterránea, así como muestras de suelos para su análisis en laboratorio.

Los resultados del balance hídrico indican que se presenta un exceso de riego en los primeros dos riegos del ciclo agrícola, principalmente, por lo que la eficiencia de riego es muy baja, pero a partir del tercer riego esta eficiencia aumenta. Dicho exceso de riego es debido a la necesidad de provocar un proceso de lavado para evitar la salinización de los suelos. Se pudo establecer que del 100% de agua de riego, un 23.7% fue aprovechada por los cultivos, 59.6% salió del sistema por escorrentía a través del sistema de drenaje y un 17% fue infiltración eficaz (recarga para el acuífero).

Los resultados de los balances de Nitrógeno señalan que, a menor rendimiento del cultivo, la cantidad de N que puede lixiviarse hacia el acuífero es mayor. Se estimó un valor de concentración máxima en el agua lixiviada de 54 mg/L de NO_3^- y un valor mínimo de 20 mg/L de NO_3^- . El primer valor se estimó considerando un aprovechamiento muy bajo de N por parte de la planta (para un rendimiento de 4 ton/ha) y el segundo considerando un aprovechamiento alto de N (para un rendimiento de 9 ton/ha). Por otro lado, en el agua de drenaje que descarga en la Bahía Tóbari se determinó una concentración máxima de 35 mg/L de NO_3^- .

En el caso del Fósforo, éste tiende a quedarse adsorbido en el suelo por lo que no se produce una lixiviación de P y en el agua de drenaje se determinaron concentraciones muy bajas, con valores máximos de 1.0 mg/L en noviembre de 2017 y de 0.7 mg/L en marzo de 2018.

Como conclusión sobre el funcionamiento del sistema de drenaje en el caso del balance hídrico se pudo establecer que la escorrentía hacia la Bahía de Tóbari representa la mayor salida del sistema, siendo la infiltración eficaz menor al escurrimiento.

Sobre el efecto de este sistema de drenaje sobre la calidad del agua subterránea, hay que señalar que este sistema evita la entrada de grandes cantidades de Nitrógeno al acuífero, por lo que favorece la protección de la calidad de las aguas subterráneas y esto se reflejó en las concentraciones de N medidas en los pozos, la cuales no superaron el límite permisible por la NOM-127 (10 mg/L). Por otra parte, el P no utilizado por los cultivos queda retenido, en un alto porcentaje, en el suelo, por lo que este elemento no se detectó en los pozos muestreados.

Con respecto a la calidad del agua de drenaje que se descarga a la bahía, ésta aporta cantidades de NO_3^- en torno a los 35 mg/L pero su presencia en la bahía es mínima (se detecta por debajo del límite de cuantificación) y en el caso de P las aportaciones son inferiores a 1 mg/L, lo cual también se refleja en las bajas concentraciones de P (0.1-0.2 mg/L) en el agua de la bahía.

ABSTRACT

Contamination by agricultural activities, which can affect both surface and groundwater, occurs mainly due to the application of fertilizers in amounts greater crops may need to develop. The Irrigation District of the Yaqui River is one of the agricultural districts with greater extension and production in Mexico, and in this district large amounts of fertilizers whose main components are Nitrogen (N) and Phosphorus (P) are added to the crops.

The objective of this research was to analyze the mass balance of nitrogen (N) and phosphorus (P) in the different components of the water balance in a pilot area District River Irrigation Yaqui to assess possible contamination of surface water and underground product of agricultural activity.

Irrigation District Yaqui River has a total area of 255,000 hectares with irrigation and drainage system extensive. The drainage system is made up of main and secondary collector drains, and due to its great extension and the complexity of the system, a main collector drain was identified to carry out the characterization of the system and, later, within the drainage area of this drain, a block of 400 hectares was selected as a pilot area for the estimation of the water balance, as well as the mass balance of N and P.

Wheat and corn crops were studied as their crop cycles develop in the same period of the year with a very similar duration and are those with the largest cultivated area. For each of these types of crops, periods and quantities of irrigation and fertilization were identified. Samples of irrigation, drainage and underground water were taken, as well as soil samples for laboratory analysis.

The results of the water balance indicate that there is an excess of irrigation in the first two irrigations of the agricultural cycle, mainly, so that the irrigation efficiency is very low, but from the third irrigation this efficiency increases. Such excess irrigation is due to the need to cause a washing process to avoid salinization of the soil. It was established that of 100% of irrigation water, 23.7% was used by the crops, 59.6% left the system through runoff through the drainage system and 17% was effective infiltration (recharge for the aquifer).

The results of the Nitrogen balances indicate that, at lower crop yield, the amount of N that can be leached into the aquifer is greater. A maximum concentration value in the leaching

water of 54 mg / L of NO_3^- and a minimum value of 20 mg/L of NO_3^- were estimated. The first value was estimated considering a very low use of N by the plant (for a yield of 4 ton/ha) and the second considering a high use of N (for a yield of 9 ton/ha). Furthermore, the drain water discharged into the bay Tóbari a maximum concentration of 35 mg/L NO_3^- determined.

In the case of phosphorus, it tends to remain adsorbed on the soil so leaching P does not occur and the drain water very low concentrations were determined, with maximum values of 1.0 mg/L in November 2017 and 0.7 mg/L in March 2018.

As a conclusion on the operation of the drainage system in the case of the water balance, it was established that runoff to the Tóbari Bay represents the largest exit of the system, with the effective infiltration being less than runoff.

About the effect of this drainage system on the quality of groundwater and the Bay of Tóbari, it should be noted that this system prevents the entry of large amounts of Nitrogen into the aquifer, so it favors the protection of the quality of the groundwater and this was reflected in the concentrations of N measured in the wells, which did not exceed the limit allowed by NOM-127 (10 mg/L). On the other hand, the P not used by the crops is retained, in a high percentage, in the soil, this element was not detected in the sampled wells.

With regard to the quality of drainage water that is discharged into the bay, it provides amounts of NO_3^- around 35 mg/L but its presence in the bay is minimal (detected below the quantitation limit) and In the case of P, the contributions are less than 1 mg/L, which is also reflected in the low concentrations of P (0.1-0.2 mg/L) in the bay water.

Contenido

| | |
|---|-----|
| RESUMEN | iii |
| INTRODUCCIÓN | xx |
| OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS | xxi |
| 1. ANTECEDENTES | 2 |
| 1.1 DISTRITO DE RIEGO DEL RÍO YAQUI (DR041) | 2 |
| 1.2 BALANCE HÍDRICO | 5 |
| 1.3 CICLO DEL NITRÓGENO..... | 6 |
| 1.4 TRANSFORMACIONES INTERNAS DEL NITRÓGENO | 9 |
| 1.5 EL CICLO DEL FÓSFORO | 13 |
| 1.6 TRANSFORMACIONES INTERNAS DEL FÓSFORO | 14 |
| 1.7 LA ZONA NO SATURADA..... | 14 |
| 2. ZONA DE ESTUDIO | 17 |
| 2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DR041 | 17 |
| 2.2 TIPOS DE CULTIVO, RIEGO Y FERTILIZACIÓN..... | 22 |
| 2.2.1 Trigo | 22 |
| 2.2.2 Maíz..... | 23 |
| 2.2.3 Riego y fertilización | 24 |
| 2.3 CLIMA..... | 26 |
| 2.4 GEOLOGÍA | 27 |
| 2.5 EDAFOLOGÍA | 29 |
| 2.6 ACUÍFERO DEL VALLE DEL YAQUI | 31 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 34 |

| | |
|--|----|
| 3.1 RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INFORMACIÓN DISPONIBLE | 34 |
| 3.2. DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO | 36 |
| 3.2.1 Riego (R_i) | 39 |
| 3.2.2 Riego efectivo (R_e) | 39 |
| 3.2.3 Evapotranspiración de referencia (ET_0) | 42 |
| 3.2.4 Evapotranspiración del cultivo (ET_c) | 47 |
| 3.2.5 Escurrimiento Superficial (E_s) | 49 |
| 3.2.6 Infiltración eficaz (bajo la zona radicular) (I_e)..... | 49 |
| 3.2.7 Eficiencia del riego o eficiencia de aplicación del riego (E_{ap}) | 50 |
| 3.3 ESTABLECIMIENTO DE LA RED DE MUESTREO, CAMPAÑAS DE MUESTREO Y PARÁMETROS IN SITU DEL AGUA | 50 |
| 3.4. ANÁLISIS QUÍMICO EN LABORATORIO DE MUESTRAS DE AGUA Y SUELO | 55 |
| 3.5 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE BALANCE DE NITRÓGENO (N) | 58 |
| 3.5.1 Nitrógeno en agua de riego (N_{ri})..... | 59 |
| 3.5.2 Nitrógeno por fertilización (N_{fert}) | 59 |
| 3.5.3 Fijación atmosférica de Nitrógeno | 60 |
| 3.5.4 Nitrógeno liberado en forma de gas (N_{gas}) | 60 |
| 3.5.5 Nitrógeno aprovechado por los cultivos (N_{plan}) | 60 |
| 3.5.6 Nitrógeno en agua de drenaje (N_{esc}) | 61 |
| 3.5.7 Nitrógeno en suelo (N_{sue})..... | 61 |
| 3.5.8 Lixiviación de Nitrógeno por debajo de la zona radicular (N_{lix}) | 61 |
| 3.6. ESTABLECIMIENTO DEL MODELO CONCEPTUAL DEL BALANCE DE FÓSFORO (P) | 61 |

| | |
|--|-----|
| 3.6.1 Fósforo por fertilización (Pfert)..... | 61 |
| 3.6.2 Fósforo en suelo (Psue) | 62 |
| 3.6.3 Fósforo aprovechado por los cultivos (Pplan)..... | 62 |
| 3.6.4 Fósforo en agua de drenaje (Pesc)..... | 63 |
| 3.6.5 Lixiviación de Fósforo por debajo de la zona radicular (Plix)..... | 63 |
| 3.7 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA..... | 63 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 65 |
| 4.1 RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INFORMACIÓN DISPONIBLE | 65 |
| 4.2 BALANCE HÍDRICO (Ciclo agrícola 2017-2018)..... | 65 |
| 4.2.1 Balance hídrico para una parcela de trigo (AC-1)..... | 65 |
| 4.2.2 Balance hídrico total de las parcelas de trigo | 74 |
| 4.2.3 Balance hídrico para una parcela de maíz (APH-M1)..... | 76 |
| 4.2.4 Balance hídrico total de las parcelas de maíz..... | 82 |
| 4.2.5 Balance hídrico general del bloque en estudio (trigo y maíz)..... | 84 |
| 4.2.6 Balance hídrico en el área afluente al dren colector Arroyo 16 | 85 |
| 4.2.7 Eficiencia de riego (Eap)..... | 88 |
| 4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE AGUA..... | 92 |
| 4.4 RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA DEL NITRÓGENO | 108 |
| 4.4.1 Entradas de Nitrógeno al sistema | 108 |
| 4.4.2 Salidas de Nitrógeno del sistema..... | 112 |
| 4.4.3 Balance de Nitrógeno en el bloque TD-8 | 115 |
| 4.4.4 Balance de Nitrógeno en el área afluente al Arroyo 16 (AR-16)..... | 118 |
| 4.5 BALANCE DE MASA DEL FÓSFORO (Ciclo agrícola 2017-2018)..... | 120 |
| 4.5.1 Entradas de Fósforo al sistema | 120 |

| | |
|--|-----|
| 4.5.2 Salidas de Fósforo al sistema | 120 |
| 4.5.3 Balance de Fósforo en el bloque TD-8..... | 122 |
| 4.5.4 Balance de Fósforo en el área afluente al Arroyo 16 (AR-16)..... | 123 |
| 4.6 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA..... | 125 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 128 |

Índice de figuras

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1 | Ciclo del Nitrógeno | 7 |
| Figura 1.2 | Ciclo del Fósforo | 13 |
| Figura 2.1 | Ubicación de la zona de estudio | 20 |
| Figura 2.2 | Esquema del dren colector Arroyo 16 | 21 |
| Figura 2.3 | Desarrollo del trigo durante el ciclo de cultivo | 22 |
| Figura 2.4 | Etapas de desarrollo del maíz | 23 |
| Figura 2.5 | Calendario de riegos (trigo) | 24 |
| Figura 2.6 | Aplicación de riegos y fertilización (ciclo noviembre 2017 – marzo 2018) | 25 |
| Figura 2.7 | Climograma | 26 |
| Figura 2.8 | Mapa geológico del área de estudio | 28 |
| Figura 2.9 | Mapa edafológico del área de estudio | 30 |
| Figura 2.10 | Elevación del nivel estático | 32 |
| Figura 3.1 | Diagrama metodológico | 35 |
| Figura 3.2 | Localización del bloque TD-8 | 36 |
| Figura 3.3 | Balace de agua en zona radicular del suelo | 38 |
| Figura 3.4 | Valores de Kc para el trigo en un ciclo de 135 días | 48 |
| Figura 3.5 | Valores de Kc para el trigo en un ciclo de 155 días | 48 |
| Figura 3.6 | Valores de Kc para el maíz en un ciclo de 220 días | 49 |
| Figura 3.7 | Localización del área total influente al dren colector Arroyo 16 y de los puntos de muestreo | 53 |
| Figura 3.8 | Localización de los puntos de muestreo en el dren colector y sus tributarios | 54 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 3.9 | Balance de Nitrógeno | 58 |
| Figura 3.10 | Balance de Fósforo | 62 |
| Figura 4.1 | Evapotranspiración de referencia (octubre/2017 – mayo/2018) | 70 |
| Figura 4.2 | Evapotranspiración del cultivo de trigo | 70 |
| Figura 4.3 | Balance hídrico por riego para la parcela de trigo (AC-1) | 72 |
| Figura 4.4 | Representación del fenómeno de infiltración eficaz en función de la evapotranspiración del cultivo | 73 |
| Figura 4.5 | Balance hídrico total para el cultivo de trigo en el ciclo noviembre-2017 a mayo-2018 | 76 |
| Figura 4.6 | Evapotranspiración del cultivo de maíz (Noviembre/2017 – marzo/2018) | 77 |
| Figura 4.7 | Balance hídrico por riego para la parcela de maíz (APH-1) | 80 |
| Figura 4.8 | Representación del fenómeno de infiltración eficaz en función de la evapotranspiración del cultivo | 81 |
| Figura 4.9 | Balance hídrico total para el cultivo de maíz durante el ciclo octubre-2017 – mayo -2018 | 84 |
| Figura 4.10 | Balance hídrico total del bloque TD-8 (trigo y maíz) | 85 |
| Figura 4.11 | Representación gráfica del balance hídrico en el bloque TD-8 y en el área afluyente al AR-16 | 87 |
| Figura 4.12 | Diagrama de Piper correspondiente a las muestras de noviembre, 2017 | 99 |
| Figura 4.13 | Diagrama de Piper correspondiente a las muestras de marzo 2018 | 100 |
| Figura 4.14 | Diagrama de Stiff representando el agua utilizada para riego (Canales) y Riego/consumo humano (Pozos) correspondiente al muestreo noviembre 2017 | 102 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 4.15 | Diagrama de Stiff representando el agua de drenaje a lo largo del área de estudio correspondiente al muestreo noviembre 2017 | 103 |
| Figura 4.16 | Diagrama de Stiff representando el agua utilizada para riego (Canales) y Riego/consumo humano (Pozos) correspondiente al muestreo de marzo 2018 | 104 |
| Figura 4.17 | Diagrama de Stiff representando el agua de drenaje a lo largo del área de estudio correspondiente al muestreo marzo, 2018 | 105 |
| Figura 4.18 | Concentración de NO_3^- en las muestras de agua del área de estudio (nov-2017) | 106 |
| Figura 4.19 | Concentración de P en las muestras de agua del área de estudio (nov-2017) | 106 |
| Figura 4.20 | Concentración de NO_3^- en las muestras de agua del área de estudio (mar-2018) | 107 |
| Figura 4.21 | Concentración de P total en las muestras de agua del área de estudio (mar-2018) | 107 |
| Figura 4.22 | Balances de N estimados para determinar el rango de validez de la estimación de N en infiltración eficaz | 117 |
| Figura 4.23 | Balance de Nitrógeno del área afluente al AR-16 | 119 |
| Figura 4.24 | Balance de Fósforo del área afluente al AR-16 | 124 |

Índice de tablas

| | | |
|------------|---|----|
| Tabla 1.1 | Principales fertilizantes utilizados para el cultivo de trigo | 2 |
| Tabla 1.2 | Casos de estudio sobre el DR 041 | 3 |
| Tabla 1.2 | Casos de estudio sobre el DR 041 (continuación) | 4 |
| Tabla 1.3 | Estudios sobre balance y lixiviación de nitratos | 11 |
| Tabla 1.3 | Estudios sobre balance y lixiviación de nitratos (continuación) | 12 |
| Tabla 3.1 | Puntos de muestreo de agua y suelo | 52 |
| Tabla 3.2 | Absorción de Fósforo por cultivos de maíz y trigo | 63 |
| Tabla 4.1 | Datos de Riego. Ciclo de cultivo de Trigo. Parcela AC-1 (noviembre de 2017 a abril de 2018) | 65 |
| Tabla 4.2 | Temperatura y densidad del suelo | 66 |
| Tabla 4.3 | Granulometría y textura del suelo en el bloque TD-8 | 66 |
| Tabla 4.4 | Parámetros agronómicos del suelo en el bloque TD-8 | 67 |
| Tabla 4.5 | Variables del balance hídrico para el cultivo de trigo (un día) | 68 |
| Tabla 4.6 | Variables del balance hídrico para el cultivo de trigo (ciclo de riegos) | 69 |
| Tabla 4.7 | Resultados del balance hídrico por ciclo para el cultivo de trigo para la Parcela AC-1 | 74 |
| Tabla 4.8 | Datos del balance hídrico por cultivo de trigo | 75 |
| Tabla 4.9 | Datos de riego ciclo de cultivo de maíz (noviembre de 2017 a abril de 2018) | 77 |
| Tabla 4.10 | Variables del balance hídrico para el cultivo de maíz. (un día) | 78 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabla 4.11 | VARIABLES DEL BALANCE HÍDRICO PARA EL CULTIVO DE MAÍZ (CICLO RIEGOS) | 78 |
| Tabla 4.12 | Resultados del balance hídrico por ciclo para el cultivo de maíz | 82 |
| Tabla 4.13 | Datos del balance hídrico por cultivo de maíz | 83 |
| Tabla 4.14 | Resultados del balance hídrico para el AR-16 | 85 |
| Tabla 4.15 | Eficiencia de aplicación de riego para la parcela de trigo AC-1 | 88 |
| Tabla 4.16 | Eficiencia de riego total para el cultivo de trigo | 89 |
| Tabla 4.17 | Eficiencia de riego para una parcela de maíz (APH, M-1) | 90 |
| Tabla 4.18 | Eficiencia de riego para el cultivo de maíz | 91 |
| Tabla 4.19 | Cálculo del error de balance iónico | 93 |
| Tabla 4.20 | Datos de campo de la campaña de muestreo de noviembre, 2017 | 94 |
| Tabla 4.21 | Datos de campo de la campaña de muestreo de marzo, 2018 | 95 |
| Tabla 4.22 | Cationes y aniones mayoritarios de las muestras de agua, nov de 2017 | 96 |
| Tabla 4.23 | Concentración de cationes y aniones mayoritarios de las muestras de agua, marzo 2018 | 97 |
| Tabla 4.24 | N en el agua de riego. Cultivo de trigo (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 109 |
| Tabla 4.25 | N en el agua de riego. Cultivo de maíz (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 110 |
| Tabla 4.26 | N aportado por fertilización y N en el agua de riego. Cultivo de trigo (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 111 |
| Tabla 4.27 | N aportado por fertilización y N en el agua de riego. Cultivo de maíz (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 111 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabla 4.28 | N en el agua de escorrentía. Cultivo de trigo (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 112 |
| Tabla 4.28 | N en el agua de escorrentía. Cultivo de trigo (noviembre de 2017 a marzo de 2018) (continuación) | 113 |
| Tabla 4.29 | N en el agua de escorrentía. Cultivo de maíz (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 113 |
| Tabla 4.29 | N en el agua de escorrentía. Cultivo de maíz (noviembre de 2017 a marzo de 2018) (continuación) | 114 |
| Tabla 4.30 | Nitrógeno liberado a la atmósfera (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 114 |
| Tabla 4.31 | Nitrógeno aprovechado por el cultivo (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 115 |
| Tabla 4.32 | Estimación del N residual en el suelo para el bloque TD-8 (nov/2017 – mar/2018) | 115 |
| Tabla 4.33 | Valores de las variables para la estimación del balance de Nitrógeno (noviembre de 2017 a marzo de 2018) | 116 |
| Tabla 4.34 | Balances de N para diferentes escenarios de producción de trigo y maíz | 117 |
| Tabla 4.35 | Balance de Nitrógeno para el área de estudio dren colector Arroyo-16) | 118 |
| Tabla 4.36 | Parámetros del suelo para la estimación del fósforo retenido en el suelo | 121 |
| Tabla 4.37 | VARIABLES del balance de masa de fósforo | 122 |
| Tabla 4.38 | Balance de Fósforo para el área de estudio dren colector Arroyo-16 | 123 |
| Tabla 4.39 | Parámetros evaluados para uso y consumo humano en agua de pozos según la NOM-127 y WHO | 126 |
| Tabla 4.40 | Parámetros evaluados para la protección de la vida acuática del agua de descarga y del agua de la bahía | 127 |

Lista de nomenclatura, símbolos y unidades

| | |
|-------------------------------|--|
| ET ₀ | Evapotranspiración de referencia (mm) |
| ET _c | Evapotranspiración del cultivo (mm) |
| ET _{ci} | Evapotranspiración del cultivo en el día de riego (mm) |
| K _c | Coeficiente del cultivo (adimensional) |
| Esc | Salida de agua a través del sistema de drenaje hacia la bahía (mm) |
| I _R | Infiltración de agua el día de riego (mm) |
| P _p | Infiltración eficaz, salida de agua hacia el acuífero (mm) |
| P | Precipitación (mm) |
| R _i | Agua de riego (mm) |
| Re | Riego efectivo (mm) |
| T _{max} | Temperatura máxima en un periodo de 24 horas [°K] |
| T _{min} | Temperatura mínima en un periodo de 24 horas [°K] |
| E _{ap} | Eficiencia de aplicación de riego |
| N _{ri} | Aporte de N por agua de riego (kg/m ³ /ha) |
| N _{fert} | Aporte de Nitrógeno por fertilización (kg/ha) |
| N _{fix} | Aporte de N por fijación atmosférica (kg/ha) |
| N _{plan} | Nitrógeno aprovechado por el cultivo (kg/ha) |
| N _{gas} | Nitrógeno liberado en forma de gas (kg/ha) |
| N _{esc} | Nitrógeno disuelto en el agua de drenaje (kg/m ³ /ha) |
| N _{sue} | Nitrógeno residual en el suelo (kg/ha) |
| N _{lix} | Nitrógeno lixiviado al acuífero (kg/m ³ /ha) |
| Ca ²⁺ | Calcio (mg/L) |
| Mg ²⁺ | Magnesio (mg/L) |
| Na ⁺ | Sodio (mg/L) |
| K ⁺ | Potasio (mg/L) |
| P | Fósforo (mg/L) |
| CO ₃ ²⁻ | Carbonatos (mg/L) |

| | |
|---------------|---|
| HCO_3^- | Bicarbonatos (mg/L) |
| Cl^- | Cloruros |
| NO_3^- | Nitratos |
| NO_2^- | Nitritos |
| PO_4^{3-} | Fosfatos |
| SO_4^{2-} | Sulfatos |
| N_2O | Óxido de Nitrógeno (g N_2O -N/ha) |
| θCc | Capacidad de campo (%) |
| θPmp | Punto de marchitez permanente (%) |
| HTU | Humedad total utilizable (%) |
| Rn | Radiación neta en la superficie de la planta [$MJ/m^2/d$] |
| G | Flujo térmico del suelo [$MJ/m^2/d$] |
| T | Temperatura media [$^{\circ}C$] |
| U_2 | Velocidad del viento medida a 2 m de altura (m/s) |
| $(e_a - e_d)$ | Déficit de la presión de vapor (kPa) |
| Δ | Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/ $^{\circ}C$) |
| G | Constante psicrométrica (kPa/ $^{\circ}C$) |
| e_a | Presión de vapor de saturación a temperatura T (kPa) |
| Pa | Presión atmosférica (kPa) |
| z | altura sobre el nivel del mar (m) |
| R_{ns} | Radiación neta entrante de onda corta [$MJ/m^2/d$] |
| R_{nl} | Radiación neta saliente de onda larga [$MJ/m^2/d$] |
| α | Albedo o coeficiente de reflexión de la cubierta |
| R_s | Radiación solar entrante [$MJ/m^2/d$] |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann (4.903×10^{-9}) [$MJ/m^2/d/^{\circ}K^4/d$] |
| e_a | Presión de vapor actual (Kpa) |
| R_s/R_{so} | Radiación relativa de onda corta (factor) |
| R_{so} | Radiación calculada con cielo despejado ($MJ/m^2/d$) |
| exp | Número de Euler |
| R_a | Radiación extraterrestre [$MJ/m^2/d$] |

| | |
|------------|---|
| G_{sc} | Constante solar (0,0820) [MJ/ m ² / min] |
| δ | Declinación solar [rad] |
| φ | Latitud [rad] |
| ω_s | Ángulo a la hora de la puesta de Sol [rad] |
| J | Día juliano |
| Wm | Agua necesaria y disponible para la evapotranspiración del cultivo (mm) |
| Wf | Agua de riego aplicada a la parcela (mm) |
| WHO | World Health Organization |

INTRODUCCIÓN

La contaminación por actividades agrícolas puede afectar a los cuerpos de agua superficiales y a los subterráneos, debido, principalmente, a los fertilizantes aplicados a los cultivos de forma excesiva. En México se conoce muy poco el impacto del sector agropecuario en los recursos hídricos debido a que no hay información oficial sobre las fuentes de contaminación del agua (Aguilar & Pérez, 2007).

La actividad agrícola en el Distrito de Riego 041 (DR041) del Río Yaqui, Sonora, se basa en el cultivo intensivo de trigo y maíz, principalmente; aplicándose grandes cantidades de fertilizantes que no son aprovechados al cien por ciento por los cultivos. El excedente del fertilizante puede ser transportado por el agua de escorrentía, a través del sistema de drenaje, hacia la Bahía de Tóbari, así como por lixiviación hacia el acuífero (Acuífero del Valle del Yaqui).

El DR041 es una de las áreas de producción agrícola más importantes de México y es considerado la “cuna de la revolución verde” (SAGARPA, 2011). En las áreas de gran actividad agrícola, como es el caso de este distrito de riego, se adiciona fertilizantes a los suelos, los cuales son el origen de la contaminación por Nitrógeno (N) y Fósforo (P) en el agua. El ión nitrato tiene carga negativa, al igual que los componentes del suelo, por lo que no se adsorbe y queda presente en solución. Por ello, ante la presencia de flujo de agua a través del suelo-zona no saturada, el nitrato tiende a lixiviarse y contaminar las aguas subterráneas. La cantidad de nitrato lixiviado depende de la dosis aplicada, la capacidad de extracción del cultivo, las prácticas agronómicas, la cantidad de agua percolada, las propiedades físicas y químicas del suelo, así como de la cantidad y distribución de las lluvias y/o riegos (Portocarrero et al., 2015). En el caso del Fosforo, este suele quedar adsorbido en las partículas sólidas del suelo y es transportado, por escorrentía, hacia los cuerpos de agua superficial.

Partiendo de lo anterior, en esta investigación se tuvo como objetivo identificar la presencia de Nitrógeno y Fósforo por medio del balance de masa para evaluar la contaminación por N y P, producto de la actividad agrícola del Distrito de Riego del Río Yaqui, en cuerpos de agua superficiales, en este caso la Bahía de Tóbari; así como en cuerpos de agua subterráneos (acuífero del Valle del Yaqui).

OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

Estimar el balance de masa de Nitrógeno (N) y Fósforo (P) en un área piloto del Distrito de Riego del Río Yaqui para evaluar la posible contaminación, por efecto de las actividades agrícolas, de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

De este objetivo general, se desprendieron los siguientes objetivos específicos:

1. Recopilar información existente para su análisis, síntesis (clima, edafología, usos de suelo, DEM, geología, hidrología e hidrogeología) e integración en una base de datos.
2. Definir el modelo conceptual del funcionamiento del balance hídrico en un área agrícola para identificar las entradas y salidas de agua así como también las entradas y salidas de N y P.
3. Estimar el balance hídrico del área en estudio para establecer sus cambios en el sistema, producto de la actividad agrícola en la zona.
4. Establecer el balance de masa de Nitrógeno y Fósforo en la zona de estudio para estimar las entradas y salidas (hacia el acuífero y hacia la Bahía de Tóbari) de ambos elementos.
5. Evaluar la calidad del agua subterránea en el área piloto y del agua en la Bahía de Tóbari para identificar el posible impacto de la infiltración del agua de riego y de las descargas del drenaje.



CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

1.1 DISTRITO DE RIEGO DEL RÍO YAQUI (DR041)

México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en superficie con infraestructura de riego (CONAGUA, 2012). En el año 2015, se contabilizaron 6.6 millones de hectáreas irrigadas (CONAGUA, 2016). En este sentido destaca la aportación de los 85 distritos de riego (DR), que contribuyen también a mejorar la calidad de vida de los habitantes del medio rural. Los DR son proyectos de irrigación desarrollados por el Gobierno Federal desde 1926, año de creación de la Comisión Nacional de Irrigación, e incluyen diversas obras, tales como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales y caminos, entre otros (FAO-AQUASTAT, 2014).

El Distrito de Riego del Río Yaqui (DR041) se localiza en la cuenca baja del río Yaqui, entre los 26°45' y 27°40' de latitud Norte y 109°45' y 110°20' de longitud Oeste, abarcando parcialmente los municipios de Cajeme, Bácum, San Ignacio Río Muerto, Benito Juárez, Etchojoa y Navojoa. Este distrito aprovecha los escurrimientos del río Yaqui para riego a través de un sistema de presas. Para este riego, se emplea de estas presas, un volumen de aproximadamente 2,900 hm³ anuales. Además de cerca de 300 hm³ de agua subterránea. Con estos volúmenes se riegan aproximadamente 233,000 ha, las que mediante segundos cultivos, equivalen a unas 302,000 ha físicas regadas, principalmente de trigo, soya, cártamo y maíz (DRRY, 2017).

Para el desarrollo de estos cultivos se utilizan diversos fertilizantes en diferentes etapas del cultivo y con cantidades variables. En la Tabla 1.1 se enlistan los fertilizantes que se aplican con mayor frecuencia.

Tabla 1.1 Principales fertilizantes utilizados para el cultivo de trigo (Agronomía del Trigo en el Estado de Sonora, SAGARPA, 2011)

| <i>Nombre</i> | <i>Grado equivalente</i> | <i>Composición química</i> |
|----------------------------------|--------------------------|--|
| Amoniaco | 82N-18H | NH ₃ |
| Urea | 46-0-0 | NH ₂ CONH ₂ |
| UAN-32 | 32-0-0 | Solución de urea [CO(NH ₂) ₂] y nitrato de amonio [NH ₄ NO ₃] |
| Nitrato de amonio | 33-3-0 | NH ₄ NO ₃ |
| Sulfato de amonio | 21-0-0 24S | (NH ₄),(SO ₄) |
| Fosfato Monoamónico (MAP) | 11-52-0 | NH ₄ H ₂ PO ₄ |

Como antecedentes de estudios llevados a cabo en el DR041, en la Tabla 1.2 se presentan diferentes investigaciones realizadas.

Tabla 1.2 Casos de estudio sobre el DR 041

| <i>Referencia</i> | <i>Título</i> | <i>Enfoque</i> | <i>Conclusión</i> |
|-------------------------------------|--|--|--|
| <i>Grahmann et al. (2016)</i> | Nitrogen fertilizer placement and timing affects bread wheat (Triticum aestivum) quality and yield in an irrigated bed planting system | Se estudió la relación entre las técnicas de aplicación de fertilizante nitrogenado y el tiempo, con el fin de saber con cuál técnica se obtiene el mayor rendimiento y la mejor calidad en los cultivos de trigo del Valle del Yaqui. | El manejo del fertilizante nitrogenado en sistemas de cultivo de trigo con riego por surcos debe combinar la división de la dosis de N y el uso de los discos en la cama y en el surco antes de la siembra, dependiendo de las necesidades del cultivo en el momento de la aplicación. |
| <i>Monreal et al. (2011)</i> | Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas s: caso del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora, México. | Definición de las unidades hidroestratigráficas del acuífero del Valle del Yaqui mediante mapas geológicos y modelos. | Dado que no existe una metodología establecida para definir las unidades hidroestratigráficas de un acuífero, se propone una metodología con base en la recopilación de mapas y análisis litológico. |
| <i>Cortés-Jiménez et al. (2009)</i> | Índices de calidad del agua del acuífero del valle del Yaqui, Sonora | Estudio de la composición iónica del agua de los cuerpos de agua superficiales y del acuífero en el Valle del Yaqui para evaluar la calidad para riego y consumo humano. | Existen pozos de agua que no cumplen con los criterios de calidad para riego debido al alto contenido de cloruro y sodio en el agua. |
| <i>Ahrens et al. (2008)</i> | A synthesis of nitrogen transformations and transfers from land to the sea in the Yaqui Valley agricultural region of northwest Mexico | Balance del Nitrógeno, considerando las entradas en las áreas agrícolas (aguas arriba), identificando los procesos de transporte y transformación, y definiendo las salidas a la bahía de Tóbari (aguas abajo). | La variabilidad temporal caracterizó las diferentes transformaciones de Nitrógeno. La nitrificación y la desnitrificación en los primeros días posteriores a la adición de fertilizantes y el riego provocaron altas pérdidas de N gaseoso y de lixiviación. Una variabilidad temporal relativamente alta puede ser una característica fundamental de este y otros sistemas. |

Tabla 1.2 Casos de estudio sobre el DR 041 (continuación)

| <i>Referencia</i> | <i>Título</i> | <i>Enfoque</i> | <i>Conclusión</i> |
|------------------------------|--|--|---|
| <i>Schoups et al. (2006)</i> | Sustainable conjunctive water management in irrigated agriculture: Model formulation and application to the Yaqui Valley, Mexico | Estrategias para lograr mayor sustentabilidad en la agricultura de riego. Se realizó un modelo de simulación donde se incluyó el factor agrícola para la optimización del uso de agua superficial y subterránea. | El beneficio del uso de aguas subterráneas para irrigación en el caso del Valle del Yaqui se consideró no factible porque la agricultura está dominada por el trigo, que es un cultivo de bajo valor y el agua subterránea se bombearía desde un acuífero costero. |
| <i>Riley et al. (2001)</i> | Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico | Aplicación de un modelo (NLOSS) para simular la lixiviación de Nitrógeno y establecer varios escenarios con la aplicación de una menor cantidad de Nitrógeno para así poder disminuir posibles problemas de lixiviación. | Los resultados de este estudio indican que el manejo de fertilizantes puede influir sustancialmente en las pérdidas por lixiviación de Nitrógeno: Aquellas prácticas agrícolas que vinculen más estrechamente la aplicación de fertilizante con la demanda de la planta pueden reducir sustancialmente las pérdidas de Nitrógeno por lixiviación. |

1.2 BALANCE HÍDRICO

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masa, también conocido como ecuación de continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (UNESCO, 1971).

La estimación del balance hídrico consiste en cuantificar y sumar los flujos de entrada y salida de una cuenca, así como aquéllos de consumo y retorno que ocurren en su interior, para obtener la variación del volumen de agua durante el intervalo en el que se cuantifican los flujos (Gómez-Reyes, 2013).

Para su aplicación, la ecuación del balance hídrico podrá simplificarse o hacerse más compleja, dependiendo de los datos disponibles, del objeto del cálculo, y de la masa de agua (cuenca de un río, lago o embalse, etc.)

El modelo conceptual del balance hídrico de García *et al.* (2018), plantea la estimación de un balance hídrico en la zona radicular a partir del cual se puede obtener el déficit o demanda de agua y, a partir de dicha información, se propone el diseño de un colector de agua por debajo de dicha zona radicular para almacenar el agua excedente después de un periodo de lluvia. El modelo se basa en el método de Papineau *et al.* (1992), utilizando la variable de precipitación efectiva.

La precipitación efectiva es el agua de lluvia que se infiltra y puede llegar a estar disponible en la zona ocupada por las raíces de los cultivos y ser utilizada para satisfacer sus requerimientos (Olmedo *et al.*, 2017).

La precipitación efectiva es considerada una entrada en el balance hídrico; sin embargo, pueden existir zonas en donde la entrada de agua sea de otra forma, un ejemplo es el Distrito de Riego del Río Yaqui en donde se maneja como entrada un sistema de riego para la agricultura, por lo que en este caso se considera un riego efectivo en lugar de la precipitación efectiva.

En México, el estudio del balance hídrico no incluye a menudo la presencia de zonas agrícolas. Flores & Ruíz (1998), señalan que un modelo adecuado a las condiciones de México sería aquel que usara variables de fácil acceso y consulta sobre clima, suelo, y cultivos, y con posibilidad de usarlo bajo diversas condiciones. En la investigación de Flores & Ruíz (1998) se lleva a cabo un balance hídrico para la estimación de la humedad disponible para el cultivo de maíz de temporal en Tepatitlán, Jalisco.

Estrada-Botello *et al.* (2001), realizaron el balance hídrico en una parcela con drenaje subterráneo midiendo cada componente del balance hídrico directamente en el campo. Después de estimar dicho balance hídrico, se realizó la estimación del balance de Nitrógeno en la parcela experimental. Como conclusión se señala que el drenaje agrícola subterráneo acelera la percolación del agua a través del perfil del suelo lo que causa, a su vez, la aceleración del lavado de los nitratos.

Así mismo, Sánchez *et al.* (2011), estimaron el valor de las variables de la ecuación del balance hídrico a nivel diario para una zona de cultivo de temporal en el Estado de Durango con la finalidad de identificar periodos de déficit o de exceso de humedad en el suelo, que a su vez son la base para calendarizar riegos, o zonificar cultivos en áreas de temporal.

Otra investigación que considera dentro de su estudio sobre el balance hídrico la presencia de zonas agrícolas con cultivo de trigo en el Estado de México es la de Teófilo *et al.* (2019), quienes estiman la percolación profunda tomando en cuenta la zona radicular del cultivo en la primera capa del suelo.

1.3 CICLO DEL NITRÓGENO

El Nitrógeno es un elemento esencial para la vida de todos los seres vivos, en especial para las plantas que lo necesitan en altas cantidades ya que su crecimiento, desarrollo y producción dependen del mismo por lo que, en las áreas agrícolas, se emplean grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados.

El estudio del ciclo de Nitrógeno (N) permite entender cómo se comporta este elemento en el ambiente y en los diversos subsistemas (suelo-atmósfera-agua). Este ciclo se puede considerar un sistema abierto, el cual está conformado por el Nitrógeno atmosférico que se incorpora al sistema y el Nitrógeno que pasa a las aguas superficiales y subterráneas; o bien

un sistema cerrado, que es el del ciclo de Nitrógeno en el suelo donde los microorganismos juegan un papel muy importante para que se lleven a cabo las transformaciones de N (nitrificación, mineralización, reducción, etc.), y con entradas, salidas y transferencia de Nitrógeno entre los diferentes subsistemas.

La atmósfera constituye la fuente natural principal de Nitrógeno; y una vez que el Nitrógeno se incorpora al suelo, el ciclo se vuelve bastante complejo. En la Figura 1.1 se muestra el esquema del ciclo del Nitrógeno.

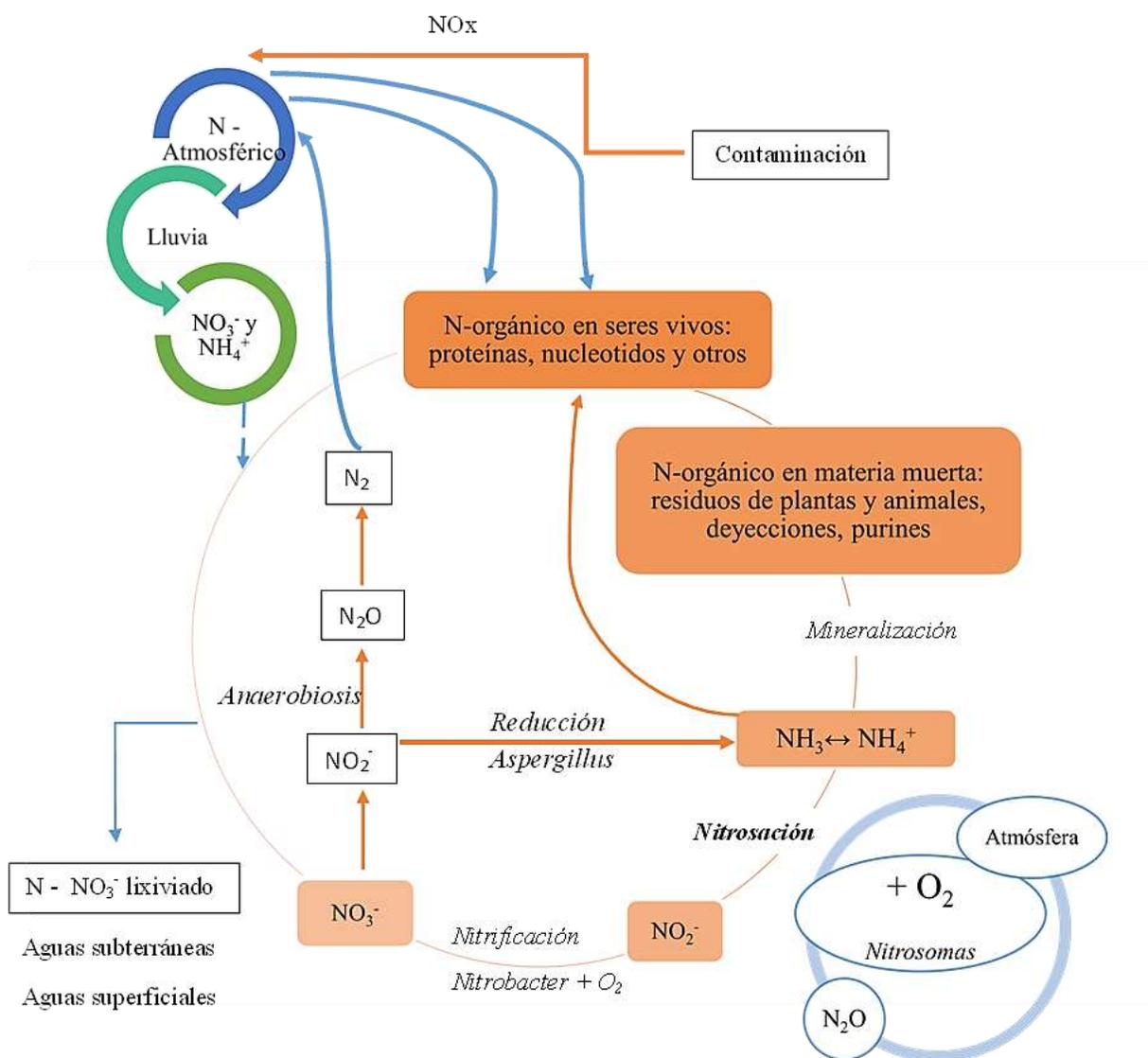


Figura 1.1 Ciclo del Nitrógeno (modificado de Porta et al., 2003)

El Nitrógeno proveniente de la atmósfera tiene dos formas principales de depósito en el suelo: depósitos seco y húmedo. El depósito seco se relaciona con el polvo atmosférico y se deposita por acción del viento o por gravedad. El depósito húmedo se refiere a las formas del Nitrógeno disueltas en el agua de lluvia.

La mayor parte del Nitrógeno orgánico se encuentra en la capa superficial del suelo combinado con materia orgánica. La diferencia entre las distintas fracciones de Nitrógeno orgánico se basa en los ácidos minerales que hidrolizan los constituyentes nitrogenados (Porta et al., 2003). También puede estar en forma inorgánica, como nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amonio intercambiable (NH_4^+), amonio no intercambiable o fijado a las partículas minerales (NH_4^+), Nitrógeno molecular (N_2 , gas) y óxido nitroso (N_2O , gas) (Lampkin, 1998).

Se estima que las tasas de entrada de Nitrógeno reactivo a la biósfera terrestre superan, en la actualidad, al doble los niveles preindustriales por causa de cambios en las prácticas agrícolas, incluyendo el uso de fertilizantes nitrogenados (Galloway *et al.* 2004).

Las pérdidas de Nitrógeno pueden deberse a la exportación de cultivos, lixiviación, erosión, desnitrificación y volatilización (Schulten & Schnitzer, 1998; Manahan, 2007); siendo la lixiviación la que provoca pérdidas de Nitrógeno en forma de nitrato hacia el agua subterránea. La ingesta de agua con nitratos tiene un efecto dañino a la salud humana, animal y medio ambiente ya que este ión tiene elevados niveles de toxicidad (Tundisi, 2003).

En los ecosistemas naturales, este ciclo del Nitrógeno es más o menos cerrado, es decir, los aportes están en equilibrio con las pérdidas. Sin embargo, en los ecosistemas agrícolas, este ciclo se ve perturbado por la exportación de importantes cantidades de N con la producción de cultivos (cosechas) (González, 2012).

1.4 TRANSFORMACIONES INTERNAS DEL NITRÓGENO

En la mayoría de los ecosistemas, el Nitrógeno se mueve del suelo a la planta y de la planta (residuos) de nuevo al suelo, a través de la biomasa microbiana, pasando por diferentes transformaciones, las cuales se describen a continuación.

Adsorción y fijación del NH_4^+ : La adsorción es un cambio dinámico entre la matriz del suelo y el agua que contiene el amonio en solución. Además de adsorberse, este ión se puede fijar de manera permanente en los espacios existentes entre las láminas de los minerales de arcilla. En la etapa de fijación, el Nitrógeno elemental cambia a formas en las cuales puede ser utilizado por las plantas que, generalmente, pueden fijar mejor NH_4^+ que NO_3^- (Rice, 1995).

Mineralización e inmovilización: La mineralización de Nitrógeno se define como la transformación del N desde un estado orgánico a uno inorgánico (NH_4^+ o NO_3^-). El proceso es llevado a cabo por organismos heterotróficos del suelo que utilizan sustancias orgánico-nitrogenadas como fuente de energía. La inmovilización del Nitrógeno se puede definir como la transformación de compuestos de Nitrógeno inorgánico, por la acción de bacterias anaerobias, a un estado orgánico (Stein & Klotz, 2016).

Nitrificación: Se define como la oxidación biológica del ión amonio (NH_4^+) o amoníaco (NH_3) a nitrato (NO_3^-) por parte de bacterias nitrificantes autótrofas y heterótrofas (Nitrosomonas y Nitrobacter) (Cheng *et al.*, 2004).

Asimilación por las plantas: La mayor parte del Nitrógeno del suelo que absorben las plantas es en forma de nitrato (NO_3^-). Los procesos químicos y biológicos que se producen en un suelo bien drenado hacen que la especie de Nitrógeno prevalente en la zona radicular sea el NO_3^- . Por otra parte, en suelos con baja aireación, la forma disponible de Nitrógeno es principalmente el NH_4^+ , ya que la nitrificación está limitada, y además el NO_3^- añadido en forma de fertilizante sufre procesos de desnitrificación rápidamente (Olson & Kurtz, 1982).

Para que el Nitrógeno en forma de NO_3^- pueda ser aprovechado por las plantas, este tiene que circular hacia las raíces de la planta, lo cual sucede por medio del flujo advectivo del agua en el suelo. Este flujo se genera como respuesta a la transpiración que se da en la porción superficial del cultivo (Olson & Kurtz, 1982). Es importante mencionar que la difusión tiene una incidencia mucho menor que la advección en suelos bien drenados.

Desnitrificación: Es la conversión del nitrato en Nitrógeno gaseoso (N_2) y en óxidos de Nitrógeno. Esto ocurre en condiciones anaerobias, ya que la falta de Oxígeno obliga a los microorganismos a emplear el Oxígeno del nitrato en su respiración (Fernández & Leiva, 2003)

Lixiviación: La lixiviación del Nitrógeno ocurre en orden decreciente como: $NO_3^- > NH_4^+ > N$ -orgánico. La lixiviación de NO_3^- se debe a que su carga negativa es repelida por los coloides del suelo donde predominan la misma carga (Gonçalves *et al.*, 2000).

Para conocer la naturaleza de estos procesos de transformación y estimar las pérdidas y entradas de Nitrógeno se puede aplicar un balance de Nitrógeno (Nbudget) en donde se toma en cuenta como entradas: la fijación biológica de N (Nfix), deposición atmosférica (Ndep), y la aplicación de fertilizantes (Nfert) y de estiércol animal (Nman), y como salidas: la extracción por cosecha (Nwithdr), el corte y el consumo de pasto (Npas) y la lixiviación (Nlix). Una formulación para evaluar el balance del N en el suelo es la propuesta por Bouwman *et al.* (2013):

$$N_{budget} = N_{fix} + N_{dep} + N_{fert} + N_{man} - N_{withdr} - N_{pas} - N_{lix} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Estudios relacionados con el ciclo y balance del Nitrógeno se resumen en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Estudios sobre balance y lixiviación de nitratos

| Referencia | Título | Enfoque | Conclusión |
|----------------------------|--|---|--|
| Ascott et al. (2017) | Global patterns of nitrate storage in the vadose zone | Mediante modelación se realizó el estudio de los patrones de almacenamiento de nitrato en la zona no saturada a nivel mundial para un periodo comprendido entre 1900 y 2000, reportando el comportamiento general del almacenamiento. | La estimación del almacenamiento de nitrato en la zona no saturada tiene un valor mayor de incertidumbre en comparación con la estimación en la zona saturada, ya que en la zona no saturada puede producirse un transporte rápido y el almacenamiento observado puede estar limitado y, en consecuencia, es probable que las estimaciones del modelo sean sobreestimadas. |
| Ascott et al. (2016) | Quantification of nitrate storage in the vadose (unsaturated) zone: a missing component of terrestrial N budgets | Se realizó el balance del Nitrógeno en acuíferos bajo suelos agrícolas en diferentes regiones de Inglaterra y Gales para estimar la presencia de nitratos en el agua subterránea. | Se comprobó la hipótesis de que la zona no saturada es una zona importante de almacenamiento de Nitrógeno. La metodología puede ayudar a los gestores ambientales en la aplicación de medidas de mitigación para la mejora de la calidad del agua. |
| Meyer-Aurich et al. (2016) | Risk efficiency of irrigation to cereals in northeast Germany with respect to nitrogen fertilizer | Se evaluó la eficiencia de los fertilizantes de Nitrógeno en cultivos sin riego (temporal) y con riego para saber si el riego aumentaba la eficiencia. | La eficiencia del Nitrógeno en los cultivos no está correlacionada con la cantidad de agua de riego aplicada, por lo que se puede recomendar un sistema eficiente de irrigación utilizando menor cantidad de agua. |

Tabla 1.3 Estudios sobre balance y lixiviación de nitratos (continuación)

| Referencia | Título | Enfoque | Conclusión |
|-------------------------|---|--|---|
| Van Meter et al. (2016) | The nitrogen legacy: emerging evidence of nitrogen accumulation in anthropogenic landscapes | Se aplicó un modelo para estimar el balance a nivel global de Nitrógeno presente en suelos para el periodo 1957-2010 | Se proporciona evidencia directa, a gran escala, de la acumulación de N en las zonas de raíces de los suelos agrícolas, lo cual puede explicar en gran parte la "falta de Nitrógeno" identificada en los estudios de balance de masa. |
| Pei et al. (2015) | Impacts of varying agricultural intensification on crop yield and groundwater resources: comparison of the North China Plain and US High Plains | Se compararon los impactos de la actividad agrícola en dos sitios de estudio para proponer medidas de agricultura sustentable. | La sostenibilidad relativa a la calidad del agua subterránea podría mejorarse mediante la reducción de la aplicación de fertilizantes y haciendo coincidir la demanda de nutrientes con el suministro tanto espacialmente como temporalmente, ya que la lixiviación de N es un problema crítico dentro del área de estudio. |

1.5 EL CICLO DEL FÓSFORO

El ciclo del Fósforo forma parte de los ciclos biogeoquímicos, al igual que el Nitrógeno, pero difiere con respecto de éste en que no forma compuestos volátiles que le permitan pasar a la atmósfera y desde allí retornar hacia el suelo (Navarro & Navarro, 2013) (Figura 1.2). Este es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos y su presencia en los sistemas terrestres mejora, en gran medida, la productividad biológica.

Desde el punto de vista agronómico se tiene que (Navarro & Navarro, 2013):

- ✓ Una cantidad pequeña de Fósforo total se encuentra normalmente presente en los suelos.
- ✓ Existe una falta de aprovechamiento del Fósforo natural, ya que casi en su totalidad no es aprovechado por la planta.
- ✓ Los cultivos eliminan poca cantidad de Fósforo.
- ✓ Las pérdidas por lixiviación son mínimas.

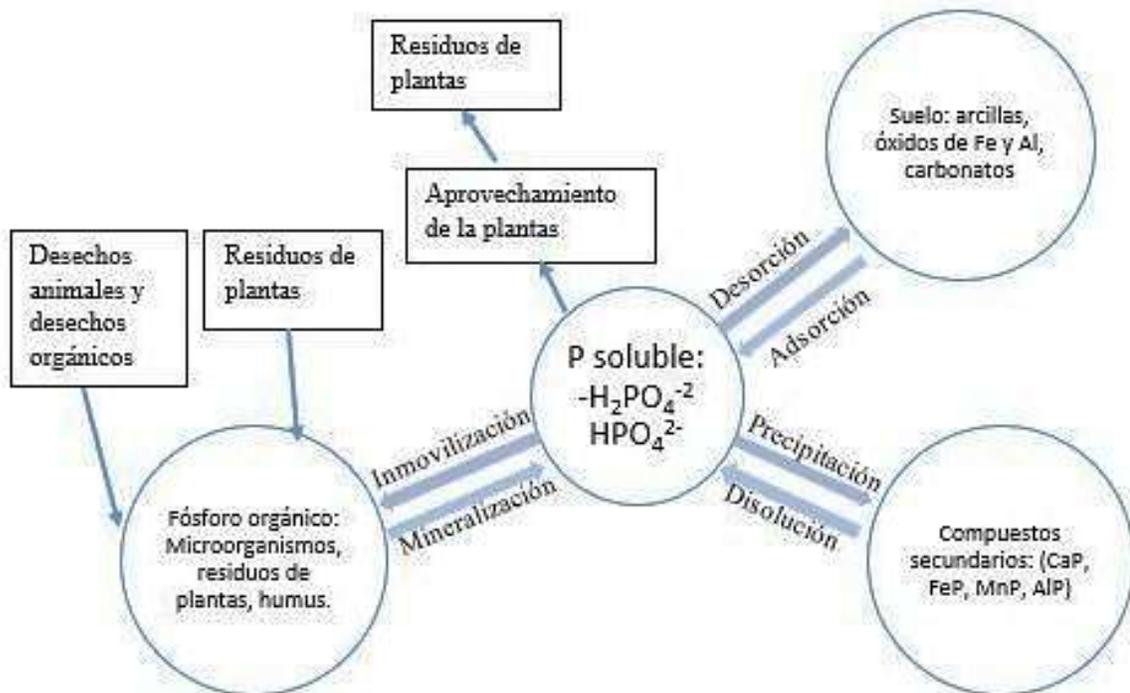


Figura 1.2 Ciclo del Fósforo (modificado de Navarro & Navarro, 2013).

1.6 TRANSFORMACIONES INTERNAS DEL FÓSFORO

La principal contribución a la dinámica del Fósforo en los suelos está dada por los procesos de mineralización-inmovilización microbianos, que poseen un papel esencial, especialmente en la rizósfera. Estos procesos dependen de un gran número de factores y constituyen uno de los problemas más complicados de la química agrícola. Estos factores están relacionados con las especies vegetales presentes, el tipo de suelos y las variables ambientales (Richardson & Simpson, 2011; Primo & Carrasco, 1987).

Los procesos y transformaciones que afectan al Fósforo y que se deben considerar son:

Fijación por arcillas: Los iones fosfato negativos (por ejemplo: PO_4^{3-}) no se fijan directamente a las arcillas, pero pueden hacerlo a través de cationes bivalentes.

Fijación por la materia orgánica: En suelos con alto contenido de carbono y gran proliferación de microorganismos, el Fósforo soluble puede ser consumido por éstos, para su multiplicación y acumulado en el suelo en forma orgánica, y en la propia sustancia bacteriana transformado en humus (White, 1987).

Adsorción - Precipitación: La adsorción del fosfato (PO_4^{3-}) en la superficie de las partículas del suelo es muy rápida. Después de esta reacción inicial de adsorción, el fosfato continúa reaccionando con el suelo dando lugar a una fase inmóvil como consecuencia de su precipitación y/o lenta difusión dentro de la matriz del suelo (Gerritse, 1993). También este fosfato adsorbido puede sufrir fácilmente un intercambio iónico.

Para conocer como pueden ser estos procesos de transformación y estimar las pérdidas y entradas de Fósforo en un sistema se aplica un balance de masa similar al descrito para el Nitrógeno.

1.7 LA ZONA NO SATURADA

La zona comprendida entre la superficie del suelo y el nivel piezométrico de las aguas subterráneas es conocida como zona no saturada o zona vadosa. En esta zona, los poros están llenos tanto de agua como de gas. En ésta, el espacio de poro efectivo para conducción es mucho menor que cuando el medio se satura y el espacio de los poros se llena normalmente con ambas fases de gas y líquida. Los microorganismos pueden estar presentes en la mayoría

de los poros, excepto en suelos con grano fino donde los diámetros de los poros son pequeños (Harvey *et al.*, 1995).

Hay que señalar la importancia de los procesos que ocurren en el suelo, en la zona no saturada y en los humedales ribereños en relación con la eliminación o almacenamiento del excedente de Nitrógeno y Fósforo de suelos agrícolas (Billen *et al.*, 2011). Aspectos tanto hidráulicos (régimen del flujo del agua, propiedades hidrodinámicas, conductividad hidráulica, etc.) como hidroquímicos (reacciones agua-medio sólido, reacciones de intercambio iónico, de precipitación, oxidación, reducción, procesos biológicos, etc.) inciden en estos procesos (Díaz-Delgado *et al.*, 2005).



CAPÍTULO 2

ZONA DE ESTUDIO

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DR041

El DR041 está dividido en unidades, después en zonas, módulos y, finalmente, en secciones de riego. Esta división tiene estrecha relación con la organización operativa del distrito. Cada módulo puede contener una o más secciones y tiene una organización presidida por un gerente de módulo. Para fines de la distribución del agua, varios bloques son atendidos por un jefe de sección o “canalero”, quien turna las solicitudes de riego al jefe de zona. Por último, el jefe de zona reporta las solicitudes de sus secciones de riego al gerente técnico y éste al jefe de unidad para terminar, operativamente hablando, en el gerente de operación, quien a su vez solicita el agua al DR041, donde se ordenan los movimientos de la presa Oviachic. Se cuenta con 42 módulos de riego que administran la red menor y con una Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL), encargada de la red mayor. El DR administra las obras de cabeza: presas y diques, y la relación con la Comisión Federal de Electricidad (DRRY, 2018).

El canal Alto del Yaqui, que sirve como límite oriental y físico oficial del DR, beneficia sólo la superficie localizada en su margen derecha. Este canal tiene una longitud de 120 km que se utilizan para conducir $90 \text{ m}^3/\text{s}$. En los primeros 42 km prácticamente no se tienen tomas para riego. Este primer tramo está revestido de concreto, excepto en las partes correspondientes a dos vasos de regulación que se tienen en su trayecto: el primero, llamado El Potrero, con superficie máxima inundada de 30 ha y que está a 3.5 km del inicio del canal y, el segundo, llamado Agua Caliente, con superficie inundada al nivel del vertedor de 700 ha, y que se ubica a 10.2 km del origen. Además, ese mismo tramo incluye tres túneles de 7 m de diámetro que, en total, dan una longitud de 1.7 km. Este canal irriga una superficie de 100,000 hectáreas (DRRY, 2018).

El canal Bajo del Yaqui, en su primer tramo, tiene una capacidad de diseño de $110 \text{ m}^3/\text{s}$; sin embargo, nunca se ha operado con tal caudal porque no se ha permitido que la demanda crezca a ese grado. El máximo gasto que ha circulado por este tramo ha sido de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ y en su tramo final de $90 \text{ m}^3/\text{s}$. Este canal permite la irrigación de una superficie de 120,000 hectáreas (DRRY, 2018).

Durante el cultivo de trigo y maíz se realizan varias aplicaciones de riego, generalmente en el cultivo de trigo son 4 riegos, el primero es el riego de pre-siembra que es aplicado por lo regular 3 días antes de la siembra y el resto de los riegos son conocidos como riegos de auxilio. En el caso del maíz, es necesaria la aplicación de 6 riegos incluido el de pre-siembra

Los cultivos para poder crecer y desarrollarse necesitan absorber agua del suelo. Cuando el contenido de humedad es bajo se dificulta la absorción, por ello es necesario regar para reponerla y que quede disponible para las plantas. Existen diferentes métodos de riego. (Demin, 2014). Los más frecuentes en la zona de estudio son:

Riego por gravedad: La energía que distribuye el agua por la parcela es la derivada de su propio peso al circular libremente por el terreno a favor de la pendiente. Con este método de riego se suele mojar la totalidad del terreno y requiere el reparto del agua mediante surcos, eras, tablares, etc.

Riego por aspersión: El agua es conducida a presión. Al llegar a los emisores (aspersores) produce gotas que mojan todo el terreno de forma similar a como lo haría la lluvia (WWF, 2005).

En este contexto un parámetro importante es el porcentaje de eficiencia global de riego. Se define como eficiencia global de riego (E_g) de una determinada zona regable, a la relación entre volumen de agua puesto a disposición de los cultivos para su zona radicular y el volumen total suministrado a la citada zona de riego (Salvatierra, 2006). Es un factor importante que se puede tomar como referencia a la hora de calcular el agua distribuida a las zonas agrícolas. En el caso del DR041 la eficiencia de conducción de riego se ha estimado en un 65% (Pedroza González & Hinojosa Cuéllar, 2014).

En el DR041 se distribuyen, en promedio al año, por la red de canales más de 2,000 hm^3 de agua, estimándose que el acuífero recibe aportaciones de 400 a 500 hm^3 procedentes de la infiltración. Por otro lado, para dar salida a los volúmenes de agua excedentes de riego y evitar la salinidad de los suelos, se han construido a la fecha 431 km de drenes colectores y 1,920 km de drenes primarios y secundarios, además de 668 km de drenes parcelarios, mismos que permiten abatir los problemas de salinidad (DRRY, 2018).

Uno de los drenes colectores primarios del sistema de drenaje es conocido como dren colector Arroyo 16 (AR16), el cual fue seleccionado como área de estudio para el proyecto de investigación titulado “Estimación y dispersión de contaminantes en el río Yaqui (Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales”, y que se ha ejecutado en colaboración IMTA-UAEMex, CiAD y del que es parte esta Tesis.

El dren colector AR16 se ubica al sur de Ciudad Obregón, tiene una longitud total de 26 km, y a dicho dren descarga el agua de un área compuesta por 49 bloques de cultivo de 400 ha cada uno, conformando un área total de influencia de 19,600 hectáreas. El sistema de riego es principalmente por gravedad utilizando agua que proviene de la presa Oviachic la cual es conducida por dos canales de riego (canal alto y canal bajo). Una vez regadas las parcelas, el agua excedente es drenada por el sistema de drenaje compuesto por un dren colector primario (Arroyo 16) al que llega el agua a través de una red de drenes parcelarios y secundarios.

La zona de estudio está acotada a la cuenca hidrológica, no topográfica, del dren colector AR16, la cual está delimitada por la superficie agrícola que descarga el agua de drenaje hacia dicho dren como se muestra en la Figura 2.1.

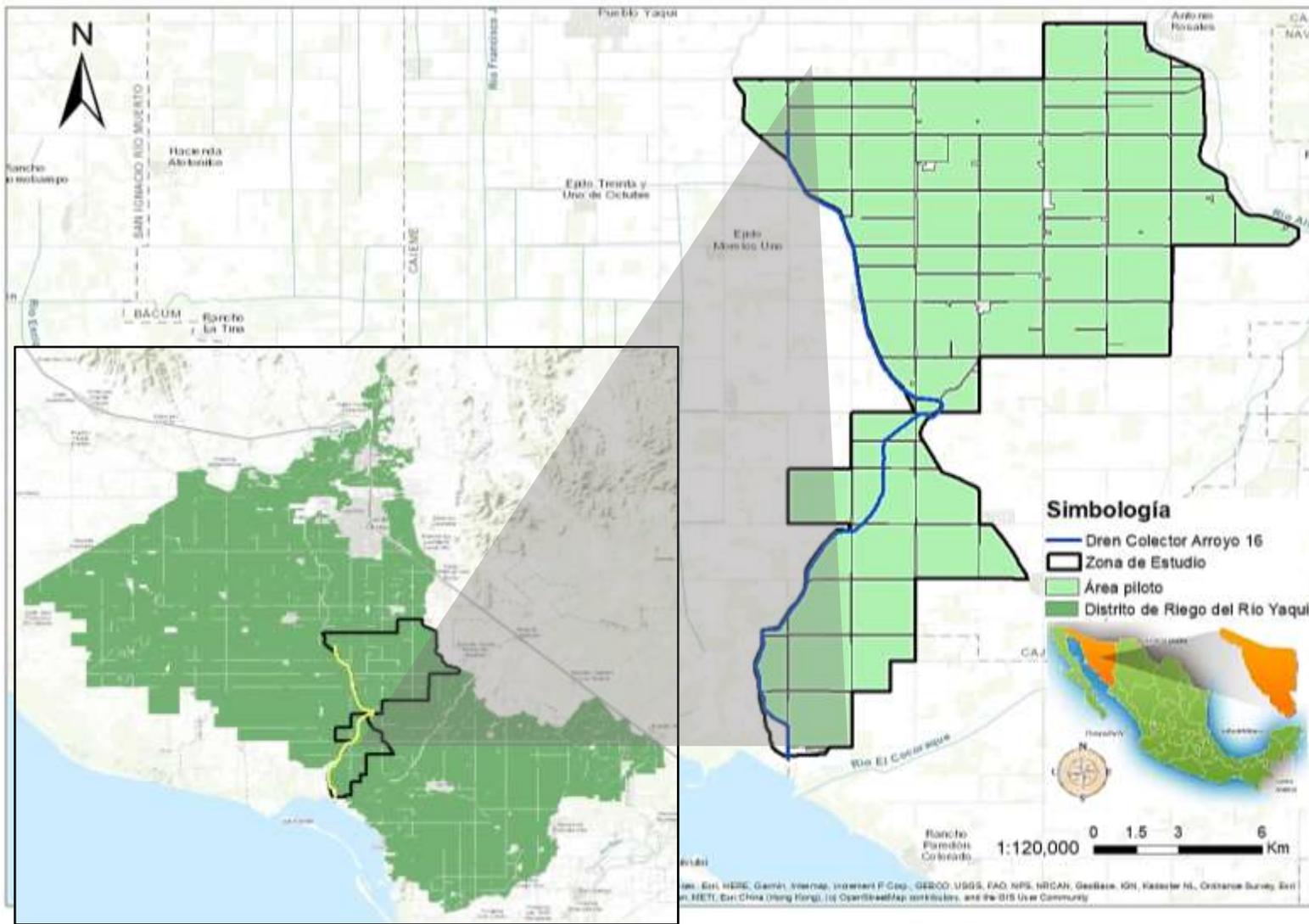


Figura 2.1 Ubicación de la zona de estudio

En la Figura 2.2 se esquematiza los bloques (con su número de identificación), tributarios y el dren colector Arroyo 16.

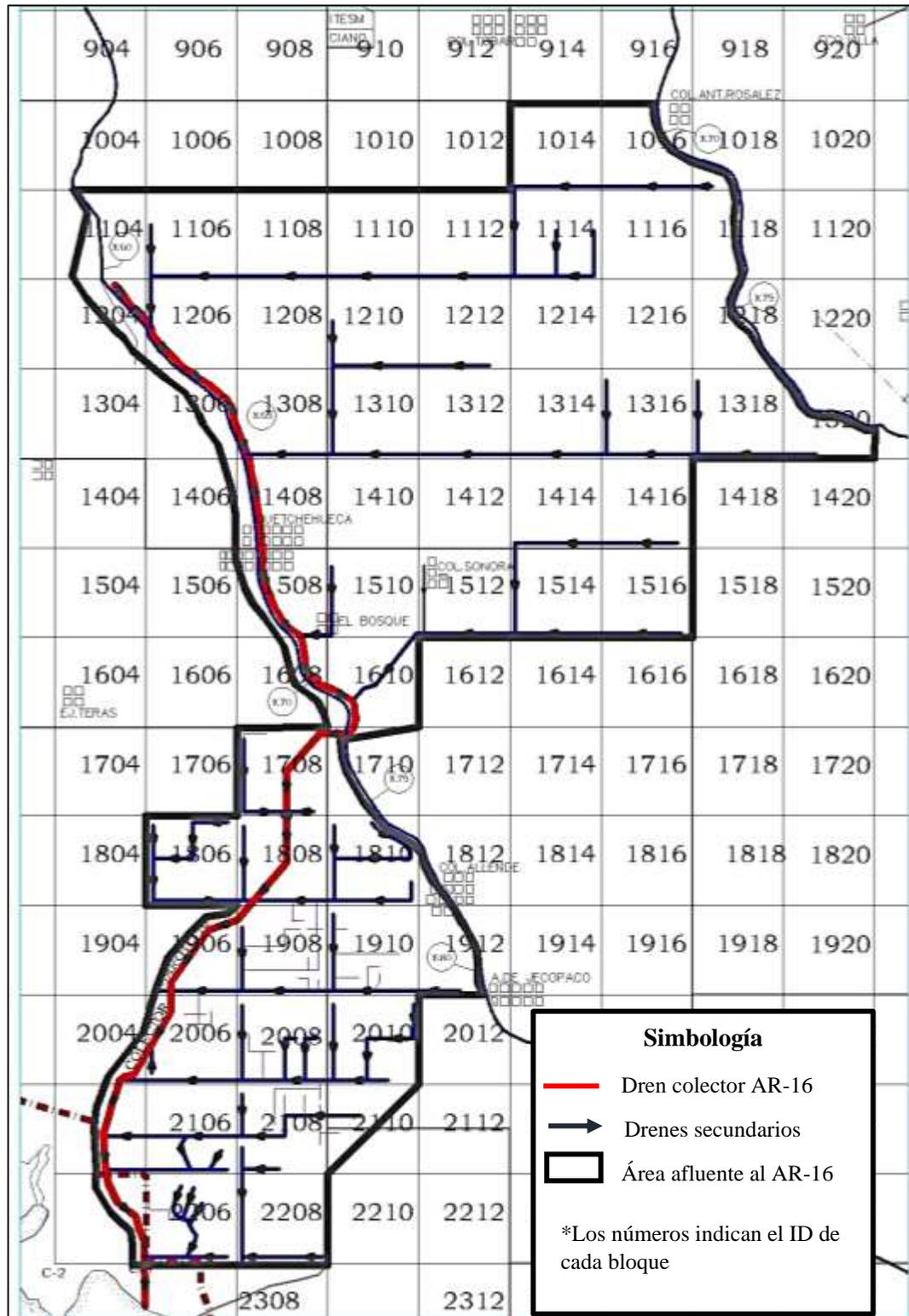


Figura 2.2 Esquema del dren colector Arroyo 16 (DRRY, 2017).

2.2 TIPOS DE CULTIVO, RIEGO Y FERTILIZACIÓN

Los cultivos presentes durante el periodo noviembre-2017 a abril-2018 fueron fundamentalmente trigo y maíz. Dichos cultivos se describen a continuación.

2.2.1 Trigo

La variedad más común de trigo cultivado es el Trigo harinero (*Triticum aestivum*) que es una planta gramínea con una altura de 30 a 150 cm, su tallo es recto y cilíndrico, su hoja es lanceolada con un ancho de 0.5 a 1 cm y una longitud de 1.5 a 2.5 cm, y cada planta tiene de 4 a 6 hojas. Este cultivo requiere suelos profundos y con buen drenaje para el desarrollo del sistema radicular (SAGARPA, 2017).

Las raíces principales, que son muy numerosas, se concentran mayoritariamente en los primeros 20 a 30 cm, siendo lo normal que alcancen una profundidad aproximada de 50 cm; y bajo condiciones muy favorables, pueden penetrar hasta aproximadamente 1 m. La profundidad de penetración y la dispersión lateral que presentan las raíces del trigo son menores que las del centeno, iguales que las de la cebada y mayores que las de la avena. Para el trigo puede considerarse como óptima una profundidad de suelo de 60 cm (Peterson, 1965).

En la figura 2.3 se muestra de forma gráfica el desarrollo del trigo en el ciclo de cultivo.

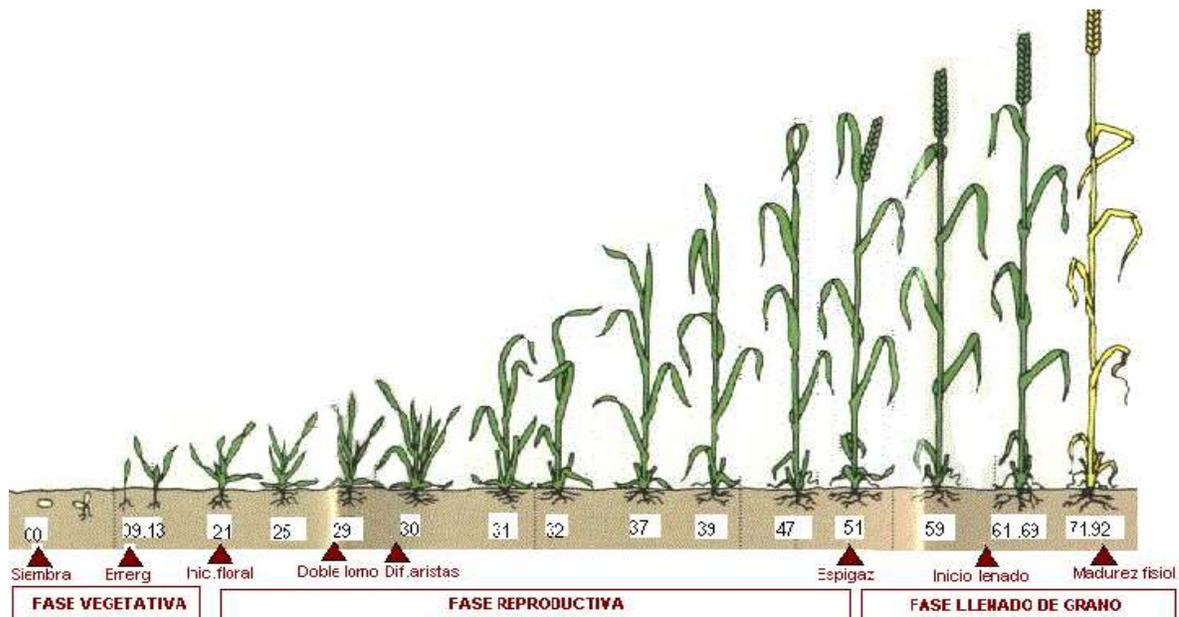


Figura 2.3 Desarrollo del trigo durante el ciclo de cultivo, (Slafer & Rawson, 1994)

2.2.2 Maíz

El cultivo de maíz grano (*Zea mays L.*) se desarrolla en suelos preferentemente franco-limosos, franco-arcillosos y franco-arcillosos-limosos, con una profundidad mayor o igual a 1 m de profundidad y un pH de 5.5 a 7.5. La planta es de porte robusto con tallo simple y erecto; puede alcanzar 4 m de altura, no tiene ramificaciones ni entrenudos, pero sí una médula esponjosa (SIAP, 2018).

Al estado de seis hojas, el sistema de raíces principales se encuentra bien establecido, en tanto que, con plantas de 8 a 10 hojas, y en un suelo sin limitaciones, las raíces deberán alcanzar una profundidad promedio de 45 cm y tener una extensión a lo ancho de aproximadamente 35 cm. En la Figura 2.4 se esquematiza el crecimiento de la planta de maíz a medida que pasan los días del ciclo de cultivo.

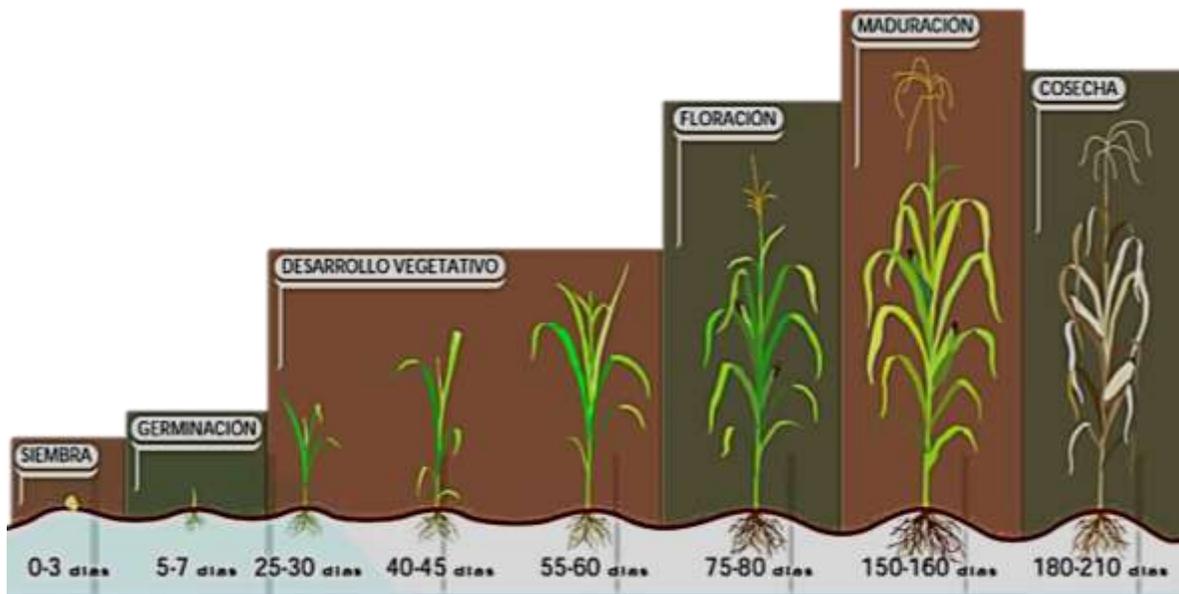


Figura 2.4 Etapas de desarrollo del maíz (CESAVEG, 2007)

2.2.3 Riego y fertilización

Los fertilizantes y riegos son aplicados según la calendarización que se muestra en la Figura 2.5. De acuerdo con Ortiz (2009) se aplica un riego de pre-siembra, o riego de germinación, de 3 a 4 días antes de la siembra del cultivo, un segundo riego (primer riego de auxilio) es aplicado de 50 a 55 días después de la siembra, el tercer riego (segundo riego de auxilio) se debe aplicar en la etapa de espigamiento-floración que comienza de 77 a 82 días a partir de la siembra y, finalmente, el cuarto riego (tercer riego de auxilio) que se suministra después de 102 a 105 días contados a partir de la siembra.

La aplicación de fertilizantes se realiza en dos fases, la primera es antes de la siembra en la que se aplica la mayor cantidad de fertilizante y la segunda, generalmente, se aplica antes del primer riego de auxilio, aunque puede existir alguna variación de la aplicación ya que depende del criterio de los usuarios.

Cada bloque dentro de la zona de estudio tiene una fecha de siembra distinta por lo que en la Figura 2.6 se muestra de manera general el esquema de riegos y aplicación de fertilizante.

Figura 2.5 Calendario de riegos (trigo)

| N Ú M E R O D E R I E G O S | | | | | | |
|---|---|--------|--|--------|---|--------|
| 1 | 2 | | 3 | | 4 | |
| PRIMER RIEGO | PRIMER AUXILIO | | SEGUNDO AUXILIO | | TERCER AUXILIO | |
| TIERRA SECA | INICIO DE ENCAÑE | | ESPIGAM.-FLORACION | | GRANO LECHOSO | |
|  |  | |  | |  | |
| Lámina neta 20 cm | Lámina neta 15 cm | | Lámina neta 15 cm | | Lámina neta 10 cm | |
| SIEMBRA | TEMPRANA | TARDIA | TEMPRANA | TARDIA | TEMPRANA | TARDIA |
| DIAS DESP. DE LA SIEMBRA | 55 | 50 | 82 | 77 | 105 | 102 |

Para realizar los riegos en un periodo uniforme establecido, si se siembra en época temprana se cuentan 55 días a partir de la siembra y si es siembra tardía se riega a los 50 días de sembrado el cultivo, es decir, se adelanta 5 días el riego y así se van adaptando los demás riegos de auxilio.

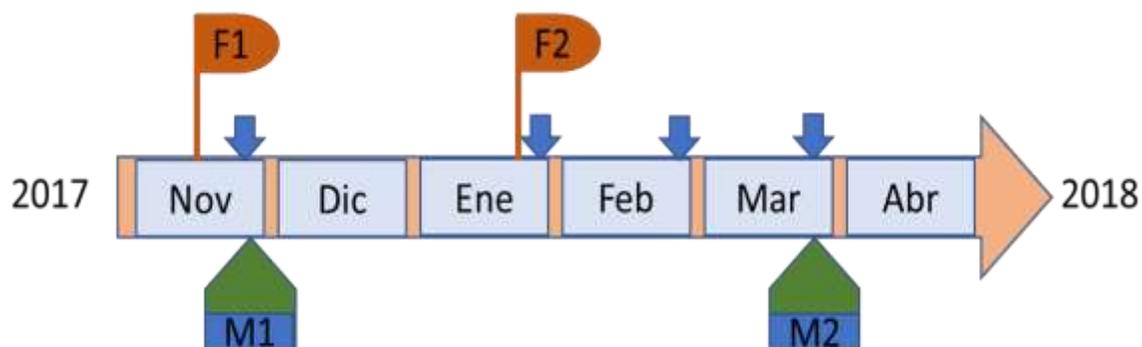


Figura 2.6 Aplicación de riegos y fertilización (ciclo noviembre 2017 – marzo 2018). (modificado de Grahmann et al. 2018).

*Las banderillas F1 y F2 indican la aplicación de fertilizantes, las marcas M1 y M2 indican los periodos de muestreo y las flechas azules indican los riegos aplicados

Adicionalmente, se realiza, por parte de los agricultores, una serie de actividades de tipo organizativo para mejorar la producción agrícola como son:

- Limpieza de canales (Módulo de riego que le corresponda).
- Factura de semilla (Casa comercial donde se adquirió la semilla, o bien, certificado de auto consumo otorgado por el SNICS).
- Soporte técnico y carta compromiso (Técnico autorizado por la SAGARPA).
- Autorización de semilla (SAGARPA Coordinación Fitosanitaria (Sanidad Vegetal)).
- Densidad de semilla autorizada por SAGARPA.

2.3 CLIMA

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificado por García (2004), el clima correspondiente al área de estudio es BW(h´)w, el cual es un clima muy árido, cálido, con temperatura media anual mayor de 22 °C, y con una temperatura del mes más frío de 18 °C. La precipitación total anual en promedio llega a 298.5 mm, agosto es el mes de mayor precipitación con 81.6 mm, y mayo es el de menor, con 0.3 mm (INEGI, 2000).

Durante el periodo de estudio de acuerdo con datos de la estación meteorológica (1610-31) de la base de datos del DRRY la precipitación fue nula desde octubre de 2017 hasta abril de 2018, y la temperatura media osciló entre los 12°C y los 32°C con el valor más bajo en el mes de febrero y el más alto en octubre. En la Figura 2.7 se presenta el climograma para el periodo de estudio en donde se observa que no se produce precipitación y la variación de la temperatura media diaria.

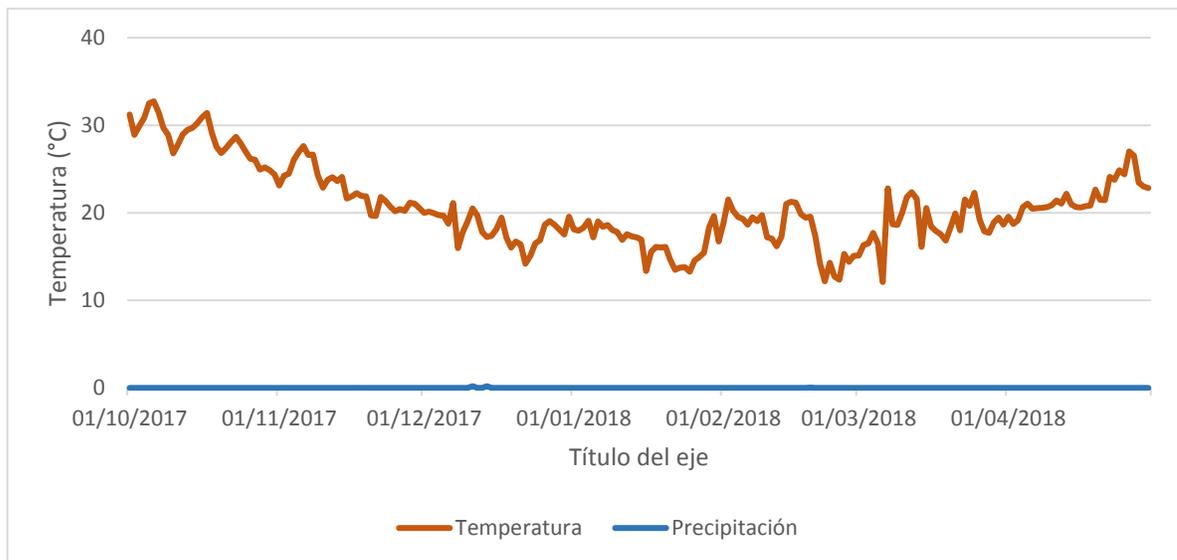


Figura 2.7 Climograma (octubre 2017-abril 2018)

2.4 GEOLOGÍA

En la Figura 2.8 se presenta el mapa geológico que conforma el área de estudio, destacando por su extensión la formación de aluvión del Cuaternario.

Para la caracterización geológica se tomó como base el mapa de Monreal *et al.* (2003), y para su interpretación se consultó la información del estudio de disponibilidad de agua del acuífero del Valle del Yaqui publicado por CONAGUA (2018).

Los materiales predominantes en el área de estudio se describen a continuación.

Aluvión (Qal). Los depósitos aluviales son muy importantes en el área pues forman la mayor superficie de área aflorante de las rocas, además de constituir el acuífero en explotación en el Valle del Yaqui.

El aluvión está constituido por arcillas, limos, arenas y gravas con un grado de redondez que varía de redondeado a subredondeado, entre los que destacan gran cantidad de granos de cuarzo, y feldespatos. Localmente presenta estratificación cruzada, así como presencia de gradación y algunos lentes. El espesor de esta unidad se va incrementando desde las montañas al norte y oriente, donde es de 60 a 100 m, hacia la línea de costa donde se estima, de acuerdo con un análisis morfológico, alcanza los 400 m. Como es la unidad más reciente y aún tiene cauces fluviales y llanuras activas, se considera una edad de principios del Cuaternario al periodo reciente (CONAGUA, 2018).

Depósitos lagunares (Qdl). Se han cartografiado estos depósitos por las numerosas lagunas costeras que existen actualmente en el frente deltaico. La litología de estos depósitos está constituida por una alternancia de lutitas y limos (CONAGUA, 2018).

Depósitos costeros (Qdc). Se denominan así todas las estructuras sedimentarias que se han formado en la línea de costa, entre las que destacan las barras, los bancos y los tómbolos (CONAGUA, 2018).

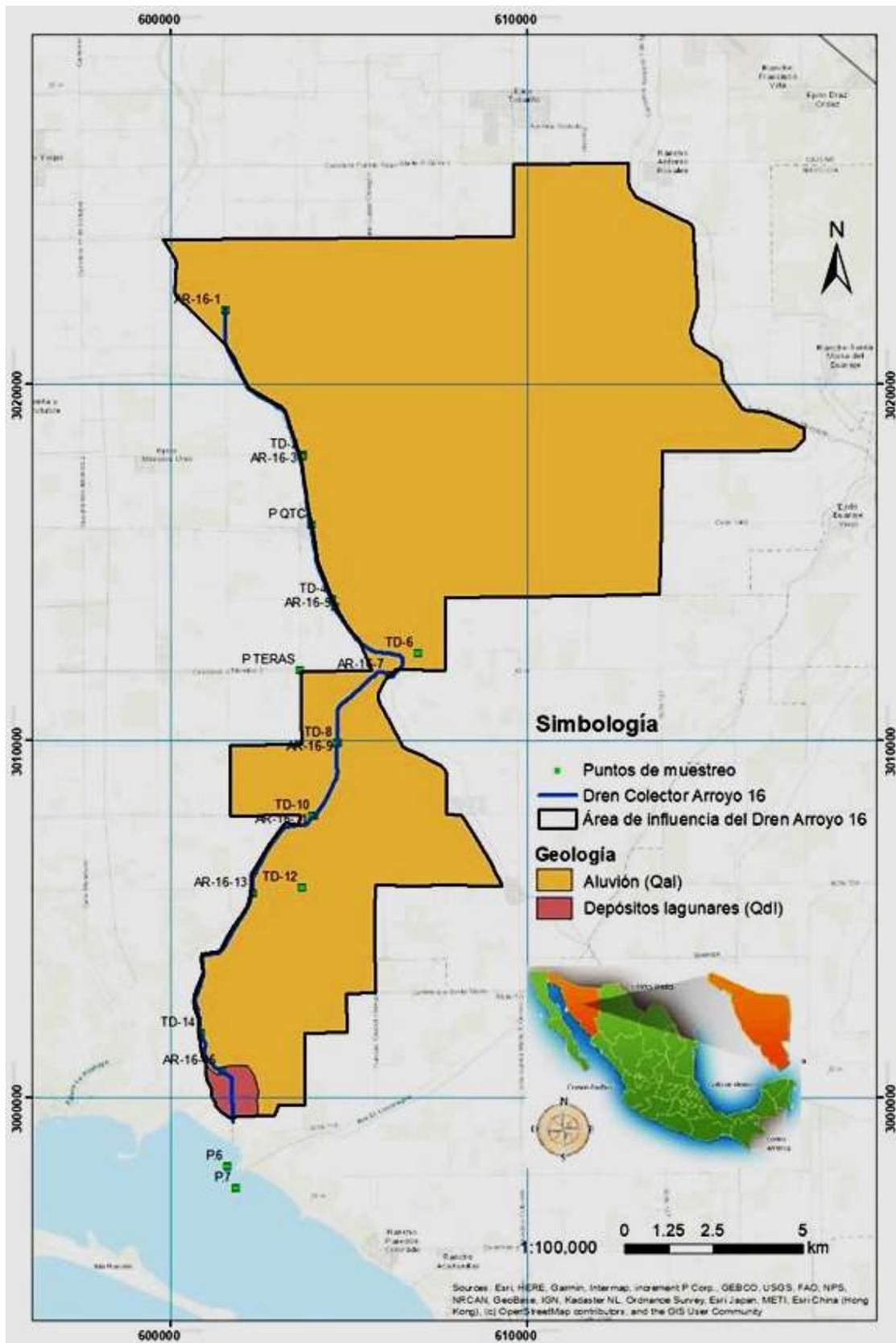


Figura 2.8 Mapa geológico del área de estudio (extraído de Monreal et al., 2003).

2.5 EDAFOLOGÍA

El mapa edafológico del área de estudio se extrajo de los datos de la Serie II de Edafología a escala 1:250,000 de INEGI (2014). En el mapa de la Figura 2.9 se pueden distinguir dos tipos de suelos, los cuales son descritos a continuación.

Suelos Vertisoles. Es el tipo de suelo que ocupa casi toda la superficie de la zona de estudio. Son suelos minerales de desarrollo reciente, con horizonte superficial de poco espesor, muy arcillosos, que durante la estación seca se contraen y presentan grietas anchas y profundas, y durante la estación lluviosa se expanden. Tienen formación de micro relieve en la superficie.

El contenido de materia orgánica en los vertisoles presenta valores de moderadamente altos a bajos, el pH es de extremadamente ácido a ligeramente ácido, la capacidad de intercambio catiónico es de muy alta a media, y tienen altos contenidos de Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Potasio (K^+) y Sodio (Na^+). El porcentaje de la saturación de bases es alto y muestran diferencias en el porcentaje de carbonatos (Pereira *et al.*, 2011).

Suelos Solonetz: Connotativo de suelos con altas concentraciones de sales. Se caracterizan por tener un subsuelo arcilloso con terrones duros en formas de columnas o prismas debido al alto contenido de sales de sodio.

Estos suelos se localizan en zonas donde se acumulan sales, en particular, el álcali de sodio. Su vegetación natural es muy escasa y cuando existe es de pastizal o matorral. No tienen uso agrícola y su recuperación es difícil y costosa (INEGI, 2004).

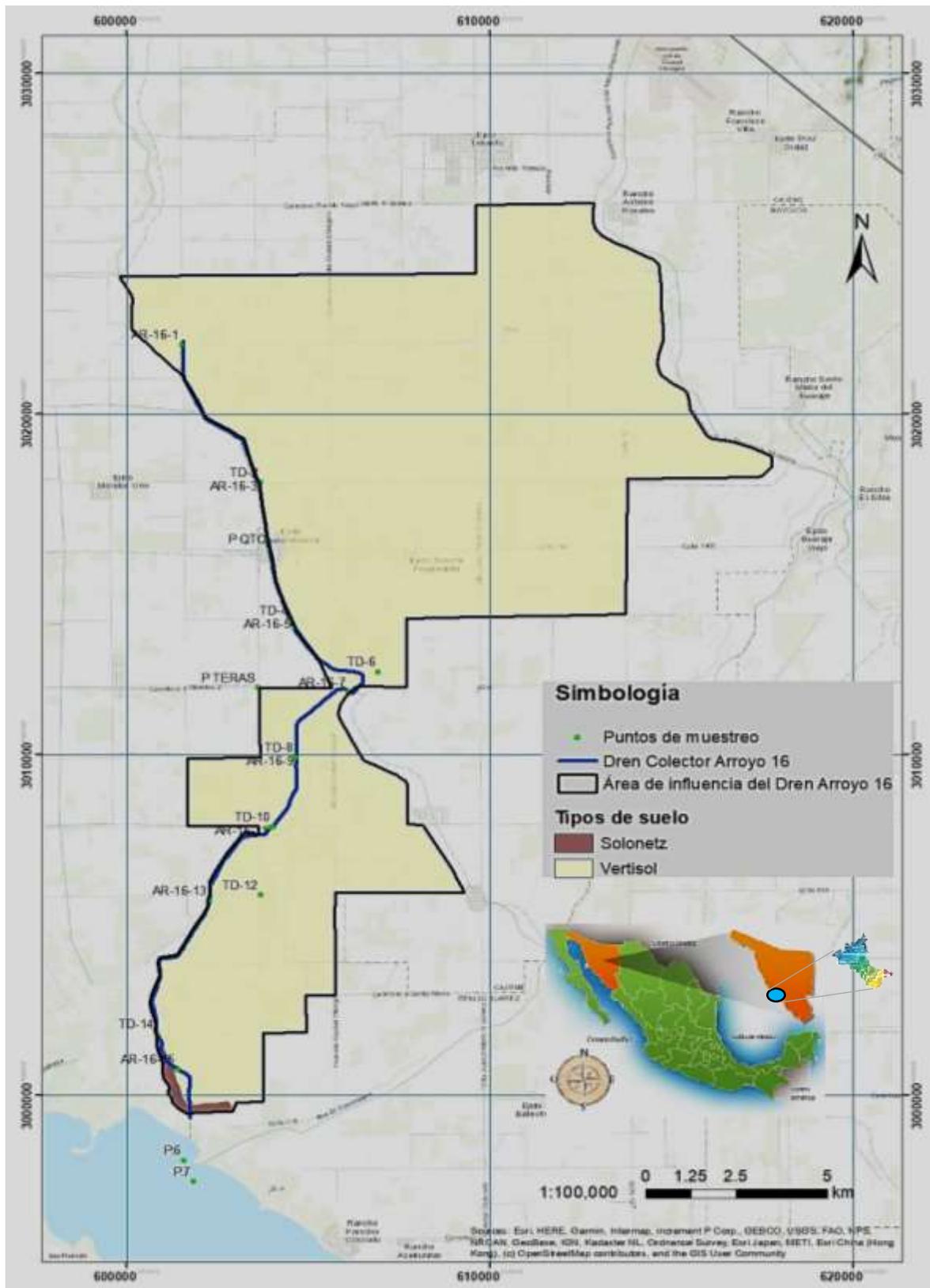


Figura 2.9 Mapa edafológico del área de estudio, elaboración basada en datos INEGI (2014).

2.6 ACUÍFERO DEL VALLE DEL YAQUI

El acuífero Valle del Yaqui queda comprendido dentro de la Región Hidrológica No.9 Sonora sur. Se trata de un sistema compuesto por dos acuíferos; uno de tipo libre en la zona próxima a la superficie, denominado acuífero superior y otro por debajo de éste, el cual es un acuífero regional, de amplia extensión y de espesor y composición variable; por lo tanto, su tipo varía de libre, semiconfinado a confinado (DRRY, 2003). Los dos acuíferos constituyen un sistema hidráulicamente independiente.

Los valores de transmisividad varían entre $8.53 \cdot 10^{-2}$ m²/s y $3.21 \cdot 10^{-7}$ m²/s, siendo el promedio de $1.3 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Las transmisividades más altas corresponden a las porciones oeste y sureste del área (CONAGUA, 2018).

La Comisión Nacional del Agua reporta una extracción para el uso agrícola de 354.3 hm³/año, para el público urbano de 7.8 hm³/año y para el industrial de 1.8 hm³/año.

En el estudio de disponibilidad (CONAGUA, 2018), se estimó como recarga del acuífero un total de 564.1 hm³ al año, dichas entradas se dividen en recarga natural 105 hm³/año que es tan solo un 18.6% del total de la recarga al acuífero, recarga inducida, en la que se considera la entrada por el exceso de agua aplicada al riego y por fugas en los canales de riego (retorno de riego: entrada de agua proveniente del riego en la zona agrícola producto del agua que no es aprovechada por los cultivos y alcanza a percolar hacia el acuífero), con un valor de 346.5 hm³/año y que representa el 61.4% de la recarga total estimada, y la entrada por flujo subterráneo horizontal estimada en 112.5 hm³/año (20% de la recarga total). El total de descarga o salida estimado fue de 478 hm³/año, que se dividen en el volumen de agua subterránea concesionado (428 hm³/año) y la descarga natural comprometida (50 hm³/año); lo cual permite estimar una disponibilidad de 86 hm³/año (CONAGUA, 2018).

En la Figura 2.10 se muestra la elevación del nivel estático del acuífero del Valle del Yaqui, y donde se observa en la zona sur, donde se encuentra la zona de drenaje del dren AR16, niveles piezométricos entre 5 y 20 msnm y una dirección de flujo hacia la costa (NE-SW).

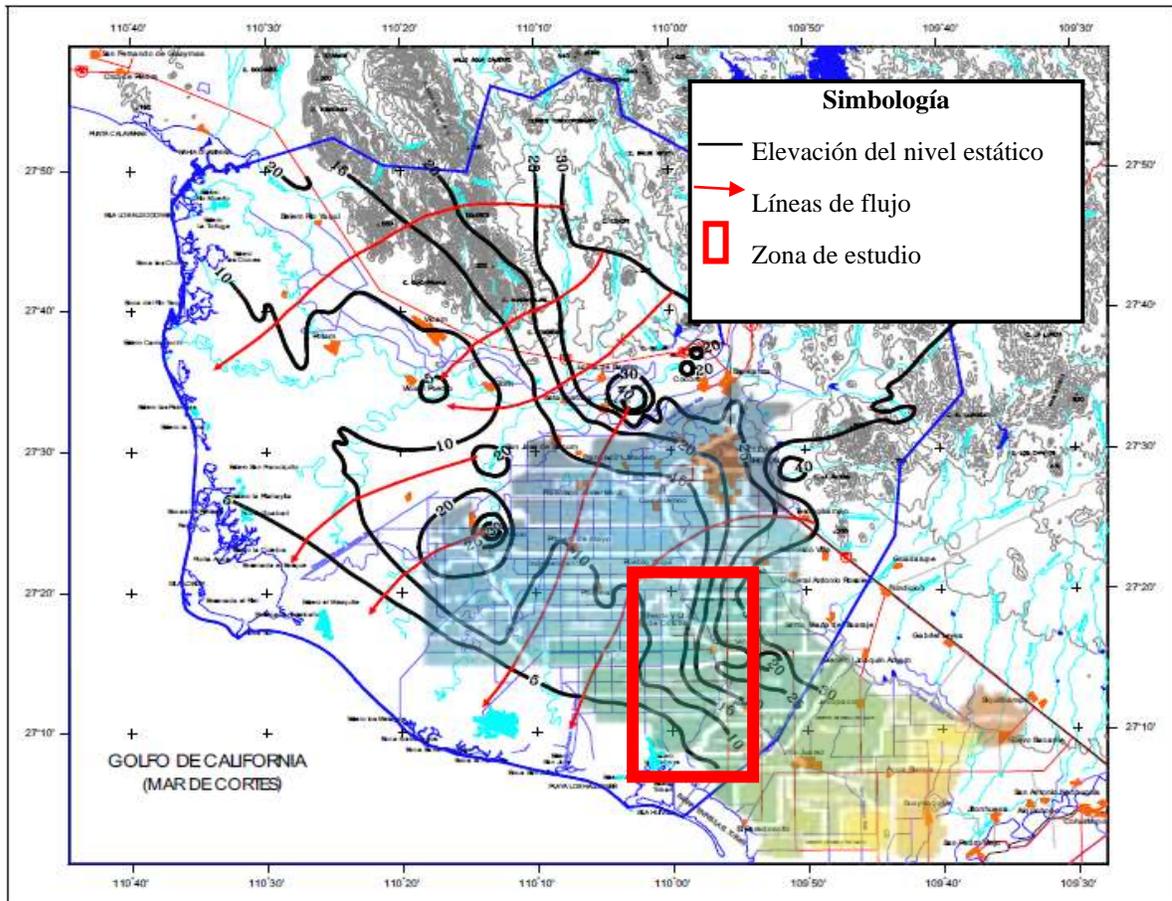


Figura 2.10 Elevación del nivel estático en el año 2002 (CONAGUA, 2018)

De acuerdo con estudios hidrogeoquímicos, existen cuatro tipos de familias de agua, las cuales son de menor a mayor presencia: Sulfatadas-Sódicas (NaSO_4); Bicarbonatadas-Sódicas (NaHCO_3); Cloruradas-Magnésicas (MgCl) y Cálcidas-Cloruradas (CaCl).

Esta hidroquímica está muy influenciada por la dinámica que afecta al flujo subterráneo debido al intercambio entre aguas superficiales y subterráneas al producirse la influencia del Distrito de Riego sobre el aporte de agua al acuífero a través de los canales de riego, y como es de esperarse los pozos cercanos a estos canales reciben aportaciones del agua que circula por dichos canales (Cortés-Jiménez *et al.*, 2009; Rangel-Medina *et al.*, 2013).



CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso metodológico propuesto para el cumplimiento de los objetivos se muestra en la Figura 3.1

3.1 RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se realizó la búsqueda, recopilación, análisis y síntesis de información del área de estudio, principalmente, sobre clima, hidrología, geología, uso de suelo y vegetación, así como de las características del acuífero. Esta información fue tratada en los SIG TerrSet y ArcMap versión 10.5 como capas de información.

Así mismo, se recopiló información sobre las actividades agrícolas (tipos de cultivo, fertilizantes aplicados, periodos de cultivo, láminas de riego, sistema de drenaje), y estudios previos realizados, así como información de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio, así como en sus proximidades

Toda esta información permitió elaborar un modelo conceptual sobre el balance hídrico del sistema, identificando las posibles entradas y salidas de agua, prestando especial atención al papel que tiene el sistema de drenaje en dicho balance. También se elaboró otro modelo conceptual en relación con el balance de masa de N y P.

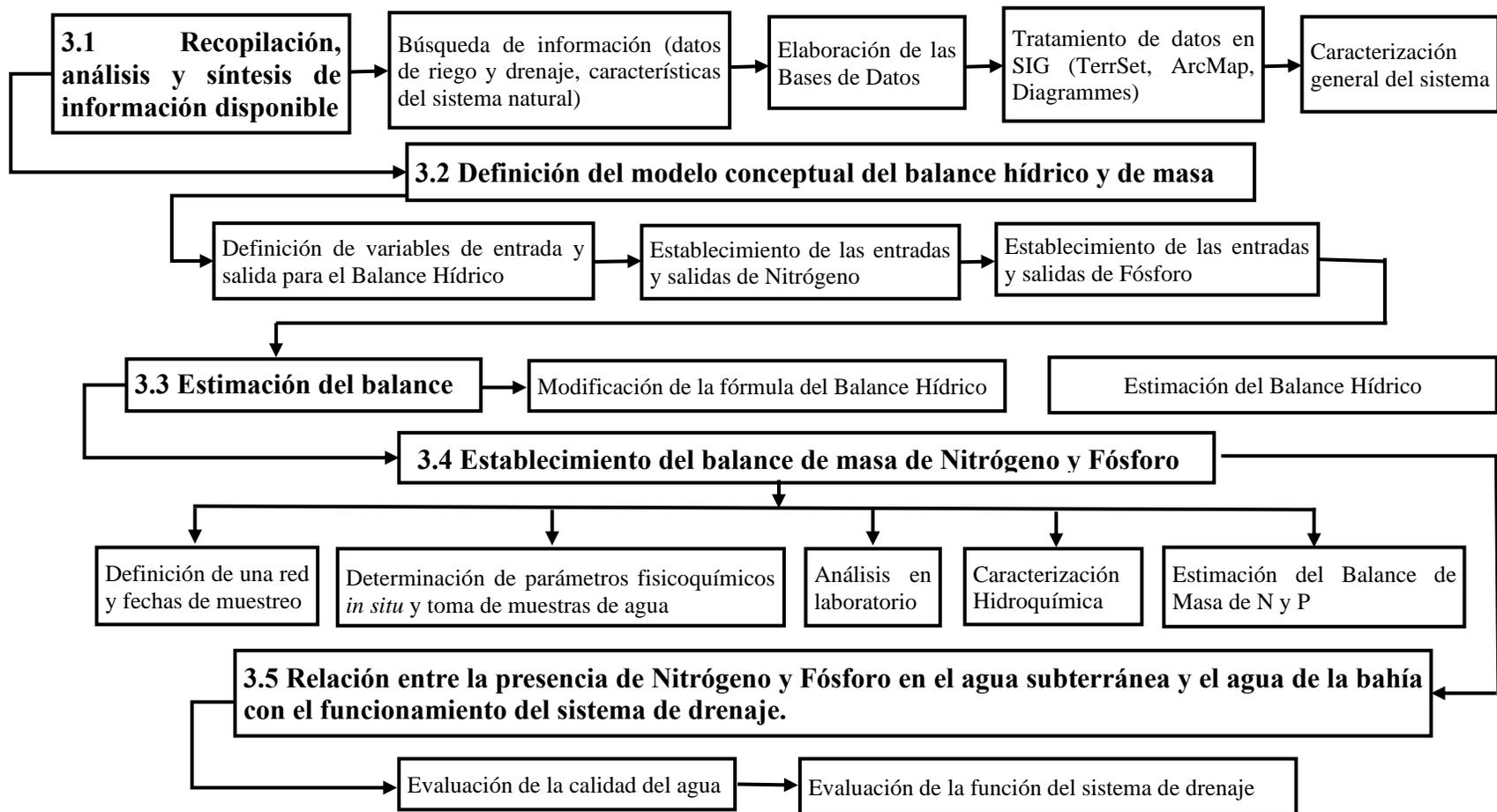


Figura 3.1 Diagrama metodológico

3.2. DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO

El sistema hídrico en la zona de estudio es muy complejo (Capítulo 2), por lo cual, para la estimación del balance hídrico, y posteriormente para la estimación del balance de masa, se seleccionó un bloque representativo o bloque tipo que cumple con todos los criterios para poder llevar a cabo dicha estimación.

El bloque en estudio drena el agua de riego hacia el punto de descarga TD-8 (Figura 3.2) y tiene una superficie de 4 km² (400 hectáreas), en el cual se han cultivado 163 hectáreas de trigo y 189 hectáreas de maíz durante un ciclo de cultivo (noviembre, 2017-abril, 2018), además se han sembrado 45 hectáreas con avena, alfalfa y otros cultivos de corto ciclo que para esta investigación no fueron considerados. El área restante (3 hectáreas) es ocupada por los drenes y carreteras dentro del bloque.



Figura 3.2 Localización del bloque TD-8

*En el cuadro rojo se encuentra el bloque de 4km²

El estudio del balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de la masa, en su forma como ecuación de continuidad (UNESCO, 1971). Ésta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.

Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en la forma más general estará representado por la ecuación 3.1 (UNESCO, 1971).

$$P + QsI - ETo - QsO - QuO - \Delta S - v = 0 \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde:

P: Precipitación (mm)

QsI: Entrada de agua superficial (mm)

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm)

QsO: Salida de agua superficial (mm)

QuO: Salida de agua subterránea (mm)

ΔS : Variación de almacenamiento (mm)

v: Término residual (mm)

Con base en la dinámica del sistema, se realizó una modificación a esta ecuación general del balance, de este modo la ecuación se dividió en dos partes; la ecuación 3.2 que corresponde a la estimación del balance hídrico durante el día de riego y con la cual se buscó estimar el escurrimiento superficial (E_s), y la ecuación 3.3 que corresponde a la estimación del balance en un periodo inter riego (considerando los días posteriores al riego hasta un día antes del siguiente riego) con la que se estimó la infiltración eficaz (I_e).

$$E_s = R_i - R_e \quad \text{Ec. (3.2)}$$

R_i : Agua de riego (mm)

R_e : Riego efectivo (mm)

E_s : Escurrimiento o salida de agua a través del sistema de drenaje hacia la bahía (mm)

$$I_e = R_e - \sum ETc_i - 1 \quad \text{Ec. (3.3)}$$

I_e : Infiltración eficaz (mm)

$\sum ETc_i - 1$: Suma de la evapotranspiración del cultivo a partir del día siguiente al riego y un día antes del siguiente riego (mm)

La dinámica del agua en el sistema se ejemplifica en la Figura 3.3.

Como condiciones iniciales para la estimación del balance de agua en el suelo se plantearon las siguientes:

1. Existen dos tipos de cultivo en el bloque en estudio (trigo y maíz), los cuales tienen un ciclo de cultivo similar con un suministro de riego diferente en volumen, número de eventos de riego y secuencia de aplicación.
2. Previo a los riegos en la zona, el suelo se encuentra en un punto de marchitez permanente, es decir, no hay humedad en el suelo.
3. La precipitación fue inexistente en el periodo de estudio, por lo que no es considerada para fines del balance.

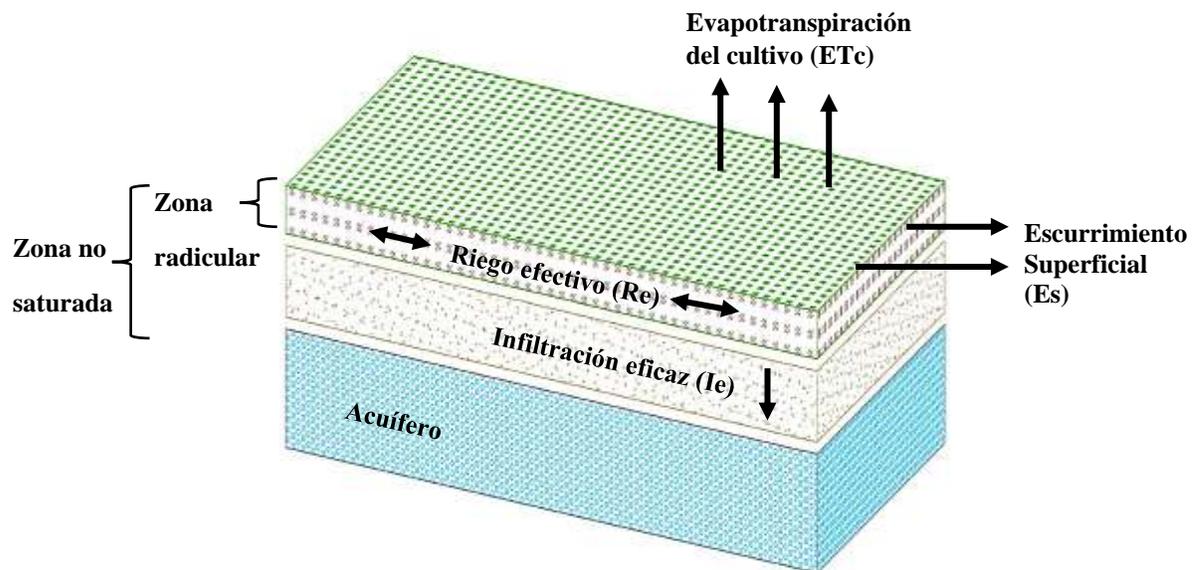


Figura 3.3 Balance de agua en zona radicular del suelo. Elaboración propia con base en la Allen et al. (2006).

3.2.1 Riego (Ri)

La cantidad de agua aplicada en cada riego es medida por el DR debido a que cada productor solicita el volumen de agua requerido en función del tipo y superficie de cultivo. Dicha información ha sido proporcionada por los administradores de DR para fines de esta investigación.

3.2.2 Riego efectivo (Re)

Como en la zona de estudio no existe precipitación durante el ciclo del cultivo, la estimación del valor de la precipitación efectiva de la ecuación original (Ecuaciones 3.4 y 3.5, Quiñonez *et al.* (1997)), se ha sustituido por el término riego efectivo (Re). Por lo tanto, en la ecuación 3.4 se ha sustituido la estimación de la precipitación efectiva (Pe) por la del riego efectivo (Re), la cual se presenta en la ecuación 3.6.

La estimación del riego efectivo diario (Re) es muy compleja pues depende de varios factores, pero puede evaluarse para el pronóstico del riego en tiempo real empleando esta ecuación 3.6 que consideran valores de evapotranspiración del cultivo en el día de riego (ET_c) y del riego (R_i) en mm, y requiere el cálculo de la humedad total utilizable (HTU) en mm (ecuación 3.5) (Quiñonez *et al.*, 1997).

$$Pe = f(HTU) [1.25 P_i^{0.824} - 2.93] 10^{0.000955 ET_{c_i}} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Pe: Precipitación efectiva (mm)

P_i: Precipitación en el día i (mm)

ET_c_i: Evapotranspiración del cultivo en el día del riego (mm)

$$f(HTU) = 0.53 + 0.0116 HTU - (8.94 \times 10^{-5} (HTU)^2) + (2.32 \times 10^{-7} (HTU)^3) \quad \text{Ec. (3.5)}$$

$$Re = f(HTU) [1.25 R_i^{0.824} - 2.93] 10^{0.000955 ET_{c_i}} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

Re: Riego efectivo (mm)

HTU: Humedad total utilizable (mm)

R_i: Lámina de riego aplicada en el día i (mm)

ET_c_i: Evapotranspiración del cultivo en el día i (mm)

f (HTU): Es una constante calculada a partir de la HTU de la ecuación 3.5

Para la estimación del riego efectivo es necesario conocer los parámetros agronómicos del suelo como la granulometría y textura, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y la humedad totalmente aprovechable.

Los métodos para determinar los parámetros agronómicos del suelo fueron:

a) Granulometría y textura

Con la finalidad de obtener los valores de los parámetros agronómicos, se recolectaron muestras de suelo en dos puntos del bloque a diferentes profundidades (20, 40 y 60 centímetros) y se efectuó el análisis de granulometría con el método de Bouyoucos (1963) en el Laboratorio de Edafología de la UAEMex. Anexo I

A partir de la granulometría del suelo se determinó la capacidad de campo (θ_{Cc}), el punto de marchitez permanente y la humedad total utilizable (HTU); parámetros que condicionan las características hídricas del suelo (Fuentes y García, 2003).

b) Capacidad de campo (θ_{Cc})

La capacidad de campo de un suelo (θ_{Cc}) representa la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en un suelo en contra de la fuerza de gravedad, después de un riego o lluvia que ha humedecido todo el suelo (Flores, 2010).

La estimación de la capacidad de campo se realizó utilizando la fórmula de Peele (1937). Con esta fórmula (ecuación 3.7) se estimó la capacidad de campo a tres profundidades diferentes de suelo (20, 40 y 60 centímetros).

$$\theta_{Cc} = 0.48 Ac + 1.62 L + 0.023 Ar + 2.62 \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Donde:

θ_{Cc} : Humedad a la capacidad de campo expresada como humedad gravimétrica (%)

Ac: contenido de arcilla (%)

L: contenido de limo (%)

Ar: contenido de arena (%)

c) Punto de marchitez permanente (θ_{Pmp})

El concepto de coeficiente o punto de marchitez permanente deriva de las experiencias de Briggs y Shantz (1911). Cuando el suelo alcanza la capacidad de campo, éste va perdiendo agua, progresivamente, por evapotranspiración al ser el agua absorbida por las plantas, llegando un punto en que las plantas ya no pueden absorber más agua debido a que no existe más agua disponible, por lo que se marchitan irreversiblemente.

En este momento, el suelo ha alcanzado el punto de marchitez permanente. Este estado marca el límite inferior de aprovechamiento del agua por las plantas (Fuentes & García, 2003).

Para su estimación se emplea la ecuación 3.8 (Briggs & Shantz, 1911).

$$\theta_{Pmp} = 0.302 Ac + 0.102 L + 0.0147 Ar \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Donde:

θ_{Pmp} : Humedad al punto de marchitez permanente, como humedad gravimétrica (%)

Ac: contenido de arcilla (%)

L: contenido de limo (%)

Ar: contenido de arena (%)

d) Humedad totalmente utilizable (HTU)

El término de humedad totalmente utilizable, o también conocida como humedad aprovechable, se refiere al agua disponible para las plantas que está retenida en un suelo homogéneo, y su valor se encuentra entre los contenidos de agua de capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Salcedo-Pérez *et al.*, 2007).

Conociendo el espesor colonizado por la raíz (Pr), se infiere que la humedad total utilizable (HTU) expresada en lámina de agua a partir de la ecuación (3.9)(Quiñonez *et al.*, 1997):

$$HTU = Pr (\theta_{CC} - \theta_{Pmp}) \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Donde:

θ_{CC} : Contenido de humedad en el suelo dado por la capacidad de campo (%)

θ_{Pmp} : Contenido de humedad en el suelo dado por el punto de marchitez permanente (%)

3.2.3 Evapotranspiración de referencia (ET_0)

A partir de los datos meteorológicos proporcionados por el DR041 a través del sitio de información meteorológica (<http://www.drryaqui.org.mx/drrymet/estaciones>), se realizó la estimación de la evapotranspiración de referencia por el método de Penman-Monteith (FAO, 1990).

La estación meteorológica se ubica a 500 metros del bloque TD-8, tiene la clave de identificación Est_P1610-31, coordenadas 605702.93 mE y 3012427 mN y una elevación de 22 msnm. Esta estación reporta datos diarios de temperatura (T °C), precipitación (mm), radiación solar (W/m^2), velocidad del viento (km/h), punto de rocío (°C), humedad relativa (%), presión barométrica (mm Hg), horas de frío (h) y ráfagas de viento (km/h) medidos cada 10 minutos.

Con los datos obtenidos de la estación se calculó el promedio diario para las variables temperatura, velocidad del viento, punto de rocío, humedad relativa y radiación solar; así como la suma de la precipitación. Dichas variables son las que se utilizaron en la estimación de la evapotranspiración de referencia.

Como parte del tratamiento de datos, a partir de los valores obtenidos de la estación, se realizaron las siguientes conversiones de unidades:

I.- Velocidad del viento de (km/h) a (m/s)

Donde: 1 km/hr equivale a 0.277778 m/s

II.- Radiación solar de (W/m^2) a ($MJ/m^2/d$)

Donde: 1 W/m^2 equivale a 0.0864 $MJ/m^2/d$

Latitud de la estación de grados decimales a radianes

Donde: 1 grado decimal (° dec) equivale a 0.0174533 radianes (ϕ)

Para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0), se aplicó la fórmula de la ecuación 3.10 (Allen *et al.*, 2006).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia [mm/d]

R_n : Radiación neta en la superficie de la planta [MJ/m²/d]

T : Temperatura media [°C]

U_2 : Velocidad del viento medida a 2 m de altura [m/s]

$(e_a - e_d)$: déficit de la presión de vapor [kPa]

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

G : Constante psicrométrica (1) [kPa/°C]

900: Factor de conversión

Para el desarrollo de la ecuación fue necesario estimar por separado cada una de las variables que intervienen en la fórmula general.

a) Pendiente de la curva de presión de vapor (Δ)

$$\Delta = \frac{4098e_a}{(T+237.3)^2} \quad \text{Ec. (3.11)}$$

Donde:

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

e_a : Presión de vapor de saturación a temperatura T [kPa]

T : Temperatura del aire [°C]

b) Presión atmosférica (P_a)

$$P_a = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Ec. (3.12)}$$

Donde:

P_a : Presión atmosférica a una altura z [kPa]

z : altura sobre el nivel del mar [m]

c) Constante psicrométrica (γ)

Para obtener el valor de la constante psicrométrica (γ) se utilizó la ecuación 3.13, que requieren datos como la presión atmosférica (P_a) en kPa y la elevación sobre el nivel del mar (Z) en metros (Allen *et al.*, 2006).

$$\gamma = Pa (0.665 \times 10^{-3}) \quad \text{Ec. (3.13)}$$

Donde:

γ : Constante psicométrica [kPa/°C]

Pa: Presión atmosférica [kPa]

d) Radiación (Rn)

Para periodos diarios, como la magnitud del flujo de calor (G) bajo la superficie de referencia es relativamente pequeña, ésta puede ser ignorada y entonces $G=0$ en la ecuación 3.10 y solo se estima Rn (Allen *et al.*, 2006).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Ec. (3.14)}$$

Donde:

R_{ns} : Radiación neta entrante de onda corta (MJ/m²/d)

R_{nl} : Radiación neta saliente de onda larga (MJ/m²/d)

- **Radiación neta entrante de onda corta (Rns)**

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \approx 0.77 * R_s \quad \text{Ec. (3.15)}$$

Donde:

α : Albedo o coeficiente de reflexión de la cubierta = 0.23 valor medio para hierba.

R_s : Radiación solar entrante (MJ/m²/d)

En este caso la radiación solar se midió en la estación meteorológica.

- **Radiación neta saliente de onda larga (Rnl)**

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K^4} + T_{min,K^4}}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad \text{Ec. (3.16)}$$

Donde:

R_{nl} : Radiación neta de onda larga [MJ/m²/d]

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = 4.903×10^{-9} [MJ/m²/d/°K⁴/d]

Tmax: Temperatura máxima en un periodo de 24 horas [°K]

Tmin: Temperatura mínima en un periodo de 24 horas [°K]

e_a : Presión de vapor de saturación [Kpa]

R_s/R_{so} : Radiación relativa de onda corta (factor)

R_s : Radiación solar medida o calculada [MJ/m²/d]

R_{so} : Radiación calculada con cielo despejado [MJ/m²/d]

De esta expresión no se conoce e_a ni R_{so} .

- **Presión de vapor de saturación (e_a)**

$$e_a = 0.611 * \exp\left(\frac{17.27*T}{T+237.3}\right) \quad \text{Ec. (3.17)}$$

Donde:

e_a : presión de vapor de saturación (kPa)

T: Temperatura (°C)

exp: es el valor de 2,7183 (número de Euler)

- **Radiación calculada con cielo despejado (R_{so})**

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \approx (0.75)R_a \quad \text{Ec. (3.18)}$$

Donde:

R_{so} : Radiación calculada con cielo despejado [MJ/m²/d]

R_a : Radiación extraterrestre [MJ/m²/d]

De esta ecuación no se conoce el valor de Radiación extraterrestre (R_a), por lo que se empleó además la ecuación 3.19

- **Radiación extraterrestre (R_a)**

$$R_a = \frac{24*60}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \text{sen}\varphi \text{sen}\delta + \text{cos}\varphi \text{cos}\delta \text{sen}\omega_s) \quad \text{Ec. (3.19)}$$

Donde:

R_a : Radiación extraterrestre [MJ/ m²/d]

G_{sc} : Constante solar [MJ/ m²/ min] = 0,0820

d_r : Distancia relativa Tierra-Sol

δ : Declinación solar [rad]

φ : Latitud [rad]

ω_s : Ángulo a la hora de la puesta de Sol [rad]

con valores:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\varphi) \quad \text{Ec. (3.20)}$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) = 1 + 0.033 \cos(0.0172J) \quad \text{Ec. (3.21)}$$

$$\delta = 0.409 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) = 0.409 \text{sen}(0.0172J - 1.39) \quad \text{Ec. (3.22)}$$

Donde:

J: Día Juliano.

3.2.4 Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ET_c , y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo con las condiciones climáticas reinantes (FAO, 1990).

De acuerdo con el enfoque del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo ET_c se estima como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_0 , por el coeficiente del cultivo K_c , como se aprecia en la ecuación 3.23 (Fuentes y García, 2003).

La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_0 . Por lo tanto, mientras ET_0 representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas (FAO, 1990).

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad \text{Ec. (3.23)}$$

Donde:

ET_c : Evapotranspiración del cultivo (mm/d)

K_c : Coeficiente del cultivo (adimensional)

ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm/d)

Para desarrollar la ecuación, y así estimar la evaporación del cultivo, es necesario conocer las etapas de crecimiento y el K_c correspondiente a cada etapa para los cultivos de trigo y maíz.

a) Coeficiente del cultivo de trigo (K_c Trigo)

El cultivo de trigo se dividió en dos ciclos con diferente duración, uno con 155 días de desarrollo y el otro con 135 días. La duración del ciclo influye en la clasificación de las etapas y asignación de los valores de K_c correspondientes (Figuras 3.5 y 3.6).

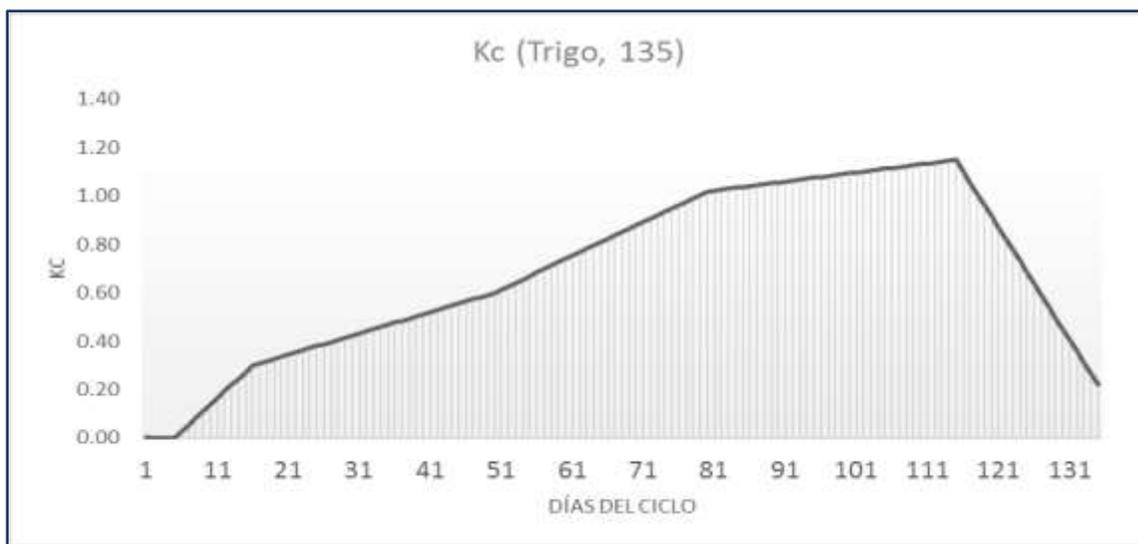


Figura 3.4 Valores de K_c para el trigo en un ciclo de 135 días. Elaboración propia con base en datos de SAGARPA (2011).

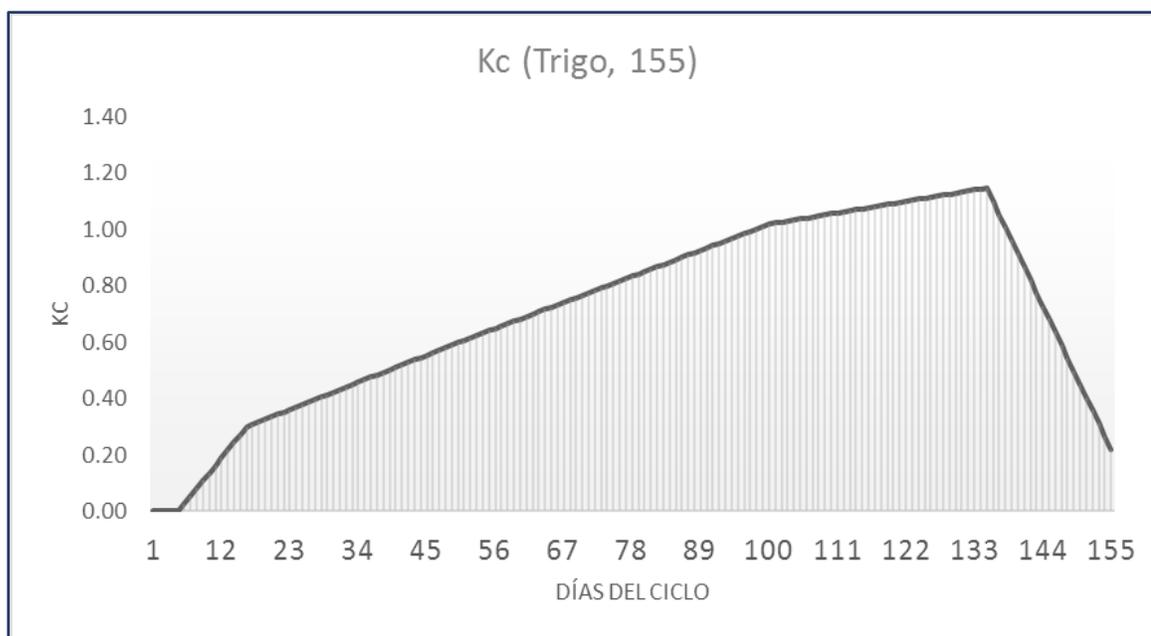


Figura 3.5 Valores de K_c para el trigo en un ciclo de 155 días. Elaboración propia con base en datos de SAGARPA (2011).

b) Coeficiente del cultivo de maíz (K_c Maíz).

En el caso del maíz se ha considerado un ciclo de cultivo de 220 días, y cuyos valores de K_c se presentan en la Figura 3.7.

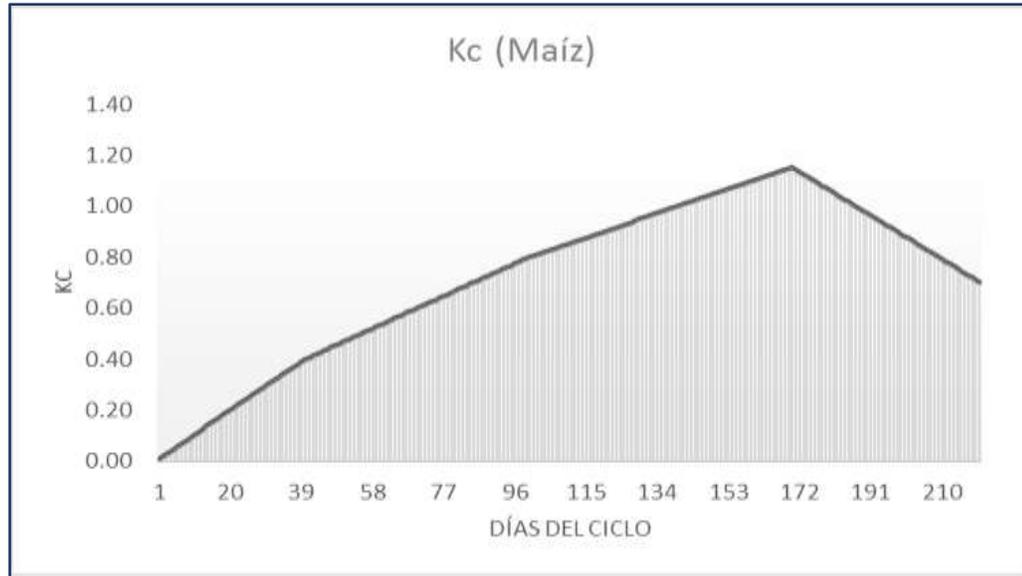


Figura 3.6 Valores de K_c para el maíz en un ciclo de 220 días. Elaboración propia con base en datos de Brouwer et al. (1988).

3.2.5 Escurrimiento Superficial (E_s)

El escurrimiento superficial es producto del flujo de agua en el terreno junto con el escurrimiento en corrientes (Aparicio, 2016). Para el caso de esta investigación, el escurrimiento superficial se representa como el resultado del agua que fluye a través de los drenes colectores. Se estima con la ecuación 3.24.

$$E_s = R_i - R_e \quad \text{Ec. (3.24)}$$

Donde:

E_s : Escurrimiento superficial (mm)

R_i : Riego (mm)

R_e : Riego efectivo (mm)

3.2.6 Infiltración eficaz (bajo la zona radicular) (I_e)

La infiltración eficaz es la cantidad de agua infiltrada que llega hasta el acuífero y que contribuye a la alimentación de éste. La infiltración eficaz se expresa algunas veces en

porcentaje con relación con la cantidad de agua recibida en superficie durante la duración de referencia (Glossaire-Eau & Milieux Aquatiques, 2019). En el caso de esta investigación dicha variable se estimó con la ecuación 3.25 que se obtuvo de Papineau *et al.* (1992).

$$I_e = R_e - \sum ETc_i - 1 \quad \text{Ec. (3.25)}$$

Donde:

I_e: Infiltración eficaz (mm)

R_e: Riego efectivo (mm)

$\sum ETc_i-1$: Suma de la evapotranspiración del cultivo a partir del día siguiente al riego y un día antes del siguiente riego (mm)

3.2.7 Eficiencia del riego o eficiencia de aplicación del riego (E_{ap})

Una vez estimado el balance se efectuó una estimación de la eficiencia de aplicación del riego. La eficiencia de aplicación es un parámetro que cuantifica cuanto del agua aplicada es realmente utilizada por las plantas (Flórez-Tuta *et al.*, 2013), y permite determinar la fracción de agua no retenida en la zona de las raíces en relación con el agua aplicada en el perfil del suelo. Su estimación se lleva a cabo con la ecuación 3.26 (Flórez-Tuta *et al.*, 2013).

$$E_{ap} = \left(\frac{W_m}{W_f} \right) * 100 \quad \text{Ec. (3.26)}$$

Donde:

W_m: Agua necesaria y disponible para la evapotranspiración del cultivo (mm)

W_f: Agua de riego aplicada a la parcela (mm)

3.3 ESTABLECIMIENTO DE LA RED DE MUESTREO, CAMPAÑAS DE MUESTREO Y PARÁMETROS *IN SITU* DEL AGUA

En la investigación de González-Pérez (2018) se definió una red de muestreo con puntos estratégicos a lo largo del dren de descarga Arroyo 16 y sus tributarios, así como en pozos, canales de riego y en la Bahía de Tóbari. Dicha red de muestreo se utilizó también para fines de esta investigación. En la Figura 3.8 se observa el esquema de localización del área de estudio, así como de los puntos en que se tomaron muestras de agua y de suelo para su análisis.

Las fechas de muestreo se definieron con base en la fecha en que se llevó a cabo el primer riego del cultivo de trigo y el último riego. La primera campaña de muestreo se efectuó del 26 de noviembre al 01 de diciembre de 2017 y la segunda del 18 al 22 de marzo de 2018; y el muestreo de suelo se llevó a cabo durante esta segunda campaña. Los puntos de muestreo de suelo están localizados en parcelas agrícolas en las que se cultiva principalmente trigo, ubicadas en la proximidad de los puntos de muestreo de agua.

La red de muestreo está conformada por los puntos descritos en la tabla 3.3 y la ubicación de los puntos correspondiente al muestreo de suelo, al dren colector, tributarios, pozos, canales de riego y puntos en la bahía se detallan en la Figura 3.9.

Tabla 3.1 Puntos de muestreo de agua y suelo. Los puntos AR-16 corresponden al dren colector principal Arroyo 16 y los puntos TD corresponden a drenes tributarios a lo largo del dren principal.

| ID | Nombre | Latitud | Longitud | Elevación | Tipo de Agua | Muestras de Suelo |
|-----------|---------------|----------------|-----------------|------------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | Canal Bajo | 109.95° | 27.50° | 28 msnm | Riego (superficial) | |
| 2 | Canal Alto | 109.95° | 27.51° | 55 msnm | Riego (superficial) | |
| 3 | AR-16-1 | 109.95° | 27.28° | 33 msnm | Drenaje | X |
| 4 | TD-2 | 109.95° | 27.28° | 21 msnm | Drenaje | |
| 5 | AR-16-3 | 109.94° | 27.24° | 21 msnm | Drenaje | X |
| 6 | TD-4 | 109.94° | 27.24° | 19 msnm | Drenaje | X |
| 7 | AR-16-5 | 109.93° | 27.23° | 19 msnm | Drenaje | |
| 8 | TD-6 | 109.93° | 27.23° | 19 msnm | Drenaje | |
| 9 | AR-16-7 | 109.94° | 27.21° | 19 msnm | Drenaje | X |
| 10 | TD-8 | 109.94° | 27.21° | 16 msnm | Drenaje | |
| 11 | AR-16-9 | 109.95° | 27.19° | 15 msnm | Drenaje | X |
| 12 | TD-10 | 109.95° | 27.19° | 13 msnm | Drenaje | |
| 13 | AR-16-11 | 109.95° | 27.17° | 14 msnm | Drenaje | X |
| 14 | TD-12 | 109.97° | 27.17° | 10 msnm | Drenaje | |
| 15 | AR-16-13 | 109.98° | 27.14° | 7 msnm | Drenaje | X |
| 16 | TD-14 | 109.98° | 27.13° | 8 msnm | Drenaje | X |
| 17 | AR-16-15 | 109.97° | 27.51° | 0 msnm | Drenaje | |
| 18 | Quetchehueca | 110.05° | 27.36° | 24 msnm | Pozo | |
| 19 | Teras | 110.03° | 27.36° | 18 msnm | Pozo | |
| 20 | P6 | 109.97° | 27.09° | 0 msnm | Bahía | |
| 21 | P7 | 109.96° | 27.08° | 0 msnm | Bahía | |

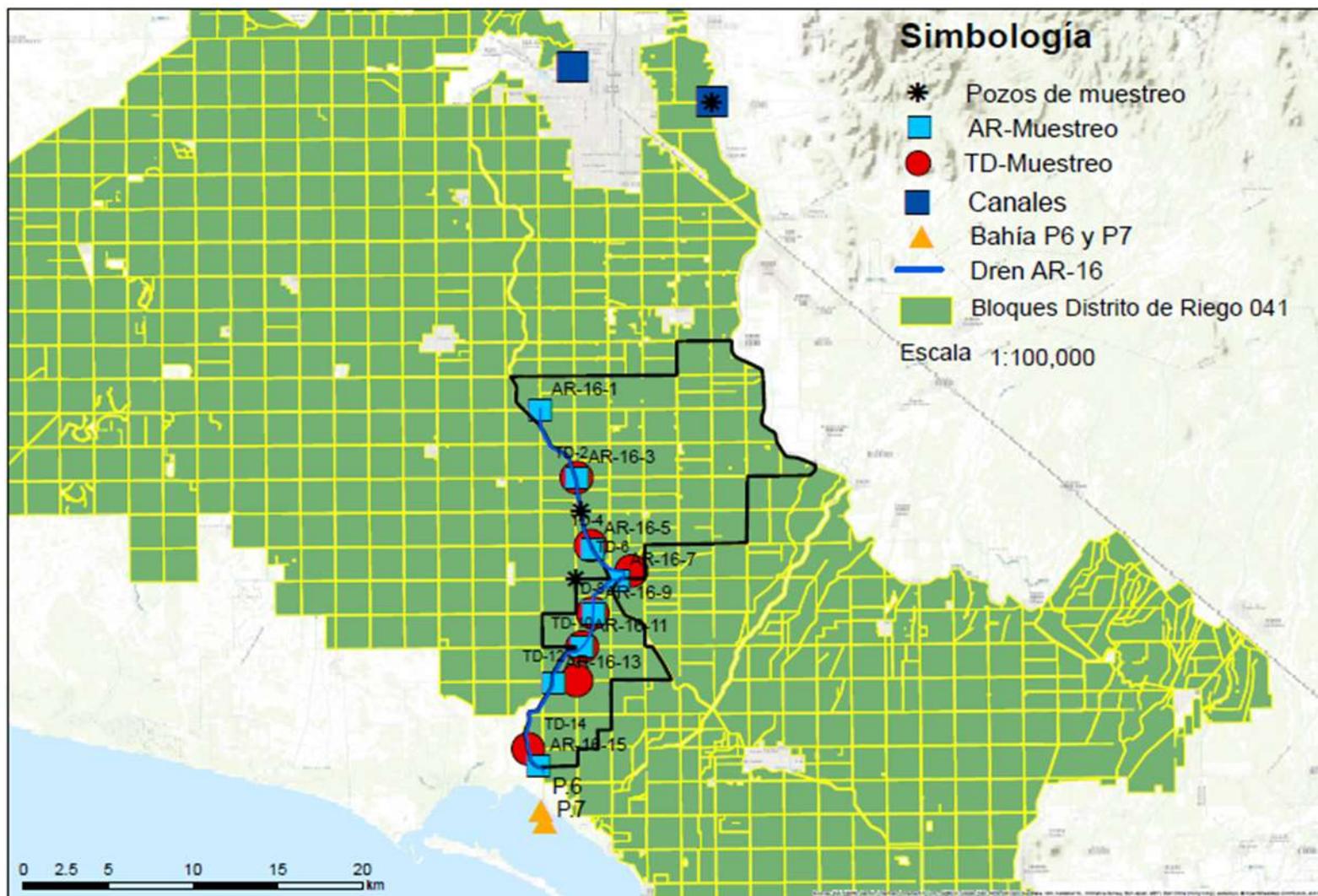


Figura 3.7 Localización del área total influente al dren colector Arroyo 16 y de los puntos de muestreo

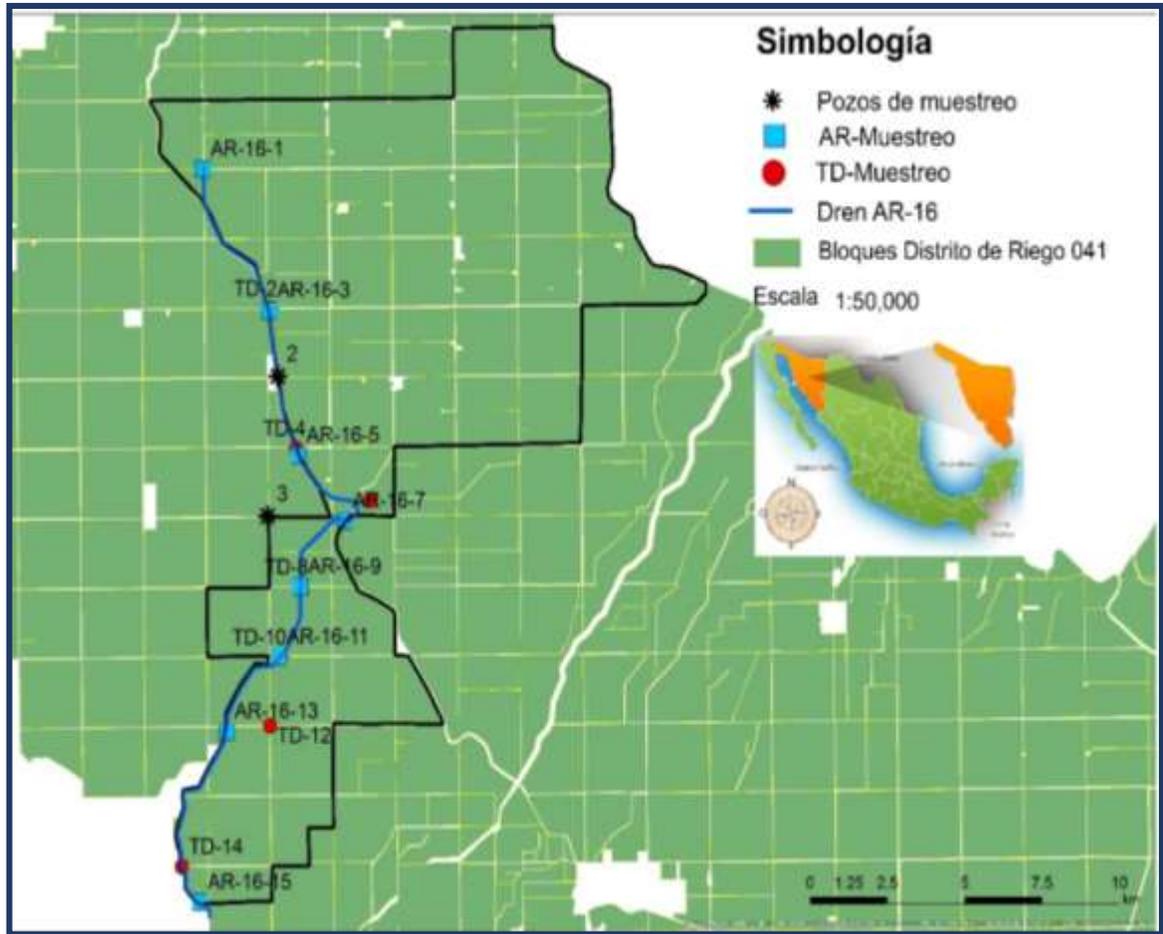


Figura 3.8 Localización de los puntos de muestreo en el dren colector y sus tributarios.

*Los puntos AR-16 corresponden al dren colector principal Arroyo 16, los puntos TD corresponden a drenes tributarios a lo largo del dren principal y los números 2 y 3 a los pozos Quetchehueca y Teras, respectivamente.

Se determinaron los parámetros in situ en el agua, con un multiparamétrico de la marca Hanna modelo HI 9829. Estos parámetros fueron: pH, sólidos disueltos totales, temperatura, oxígeno disuelto, potencial Redox y conductividad eléctrica. Con el kit de Alcalinidad DTR marca La Motte con código 3467-01 se realizó la prueba de alcalinidad.

La alcalinidad medida en campo fue transformada en HCO_3^- (bicarbonatos) y en CO_3^{2-} (carbonatos) con base en las ecuaciones 3.27 y 3.28 (Deutsch, 1997):

$$\text{HCO}_3^- (\text{mg/L}) = \frac{\text{Alcalinity} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{CaCO}_3 \right)}{\left(1 + \frac{2 \cdot 10^{-10.3}}{10^{-\text{pH}}} \right) * 50} * 61 \quad \text{Ec. (3.27)}$$

$$CO_3^{2-} (mgL^{-1}) = \frac{\text{Alkalinity} \left(\frac{mg}{L} CaCO_3 \right)}{\left(2 + \frac{10^{-pH}}{10^{-10.3}} \right) * 50} * 60 \quad \text{Ec (3.28)}$$

Para el análisis de cationes en agua (agua de riego, agua de drenaje, agua subterránea, agua en la bahía), se filtró la muestra en el sitio usando un dispositivo plástico de filtrado con vacío, el cual cuenta con un soporte para filtro de plástico o TFE y un filtro de membrana (policarbonato o acetato de celulosa) prelavado y con diámetro de poro de 0.40-0.45µ. Una vez filtrada se acidificó con ácido nítrico a un pH de 2. Se recolectó un volumen representativo de la muestra en función del número de cationes a determinar. Las muestras para el análisis de aniones se recolectaron directamente sin ningún pretratamiento. Todas las muestras se preservaron en refrigeración hasta su análisis en laboratorio.

Las muestras de suelo se recolectaron en un perfil 20, 40 y 60 cm de profundidad con una barrena Riverside, posteriormente se guardaron en bolsas herméticas de plástico y en refrigeración.

Para estas mismas fechas de muestreo, se aforó el caudal del dren y sus tributarios en diferentes puntos con un equipo perfilador de corriente acústico de efecto Doppler, ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) RiverSurveyor-M9 de SonTek. Los datos obtenidos se analizaron con el software RiverSurveyor Live proporcionado por SonTek. Estos aforos tuvieron como objetivo conocer el caudal de agua para la estimación de la carga contaminante y del balance hídrico y de masa.

3.4. ANÁLISIS QUÍMICO EN LABORATORIO DE MUESTRAS DE AGUA Y SUELO

Los análisis de concentración de los cationes mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , y K^+) se efectuaron mediante un equipo de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP) Thermo iCAP 6500 Duo View en el Laboratorio de Geoquímica de la UNAM, Campus Juriquilla.

Los análisis de aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ PO_4^{3-}) se llevaron a cabo en el Laboratorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por volumetría y espectrofotometría con base en los procedimientos expuestos en la normatividad mexicana. También se analizaron en el Laboratorio de Geoquímica de la UNAM Campus Juriquilla,

por medio de Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (Dionex ICS-2500 HPLC/IC) con bomba de gradiente cuaternario y Detectores de conductividad, UV-Vis, amperometría y voltametría.

Se realizó el cálculo del error de balance de aniones y cationes para determinar el grado de fiabilidad de los análisis de laboratorio. El principio de electroneutralidad requiere que la suma de los iones positivos (cationes) sea igual a la suma de los iones negativos (aniones) (Custodio y Llamas, 1983).

Así, el error en un equilibrio catiónico-aniónico puede ser representado por la ecuación 3.29 (Custodio y Llamas, 1983):

$$\text{Error de Balance Iónico} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} * 100 \quad \text{Ec. (3.29)}$$

El porcentaje de error resultante debe ser menor a 5%, en caso de ser mayor la muestra se debe analizar de nuevo con el fin de validar la información (Custodio & Llamas, 1983).

Las unidades de análisis de las muestras fueron en mg/L, por ello antes de calcular el porcentaje de error de balance se transformaron a unidades (mEq) aplicando la ecuación 3.30.

$$mEq = \frac{mg}{\text{peso atómico}} * \text{valencia} \quad \text{Ec. (3.30)}$$

Así se obtienen los datos en las unidades requeridas para la aplicación de la fórmula de balance iónico.

Se elaboraron gráficas de interpretación hidroquímica tales como: Piper y Stiff utilizando el software Diagrammes 6.5 de acceso libre. Este software ha sido desarrollado por el Laboratoire d'Hydrogéologie de la Universidad de Avignon (Francia). Para construir este tipo de gráficos se tomaron los valores en mg/L correspondiente a los aniones y cationes dados por el análisis químico realizado a la muestra en el laboratorio para posteriormente transformarlos en miliequivalentes (mEq) .

Los diagramas triangulares de Piper permiten representar un gran número de muestras en un sólo gráfico. En éstos, los triángulos de aniones y cationes ocupan los ángulos inferiores izquierdo y derecho con sus bases alineadas. La parte central del diagrama posee forma de rombo y sobre éste se proyectan los puntos de cada uno de los triángulos por medio de una

recta paralela al borde superior del rombo. La intersección de estas dos rectas representa la composición del agua con respecto a una determinada agrupación de aniones y cationes.

Para interpretar el diagrama con más detalle, debe considerarse que para su construcción es necesario que los iones estén reducidos a porcentaje de miliequivalentes por litro (mEq/L). A cada vértice de un triángulo le corresponde el 100% de un catión o un anión (Custodio, y Llamas, 1983).

Como resultado se obtiene una serie de puntos, donde los puntos representados permiten clasificar las aguas en diversas familias, definida cada una de ellas por los aniones y cationes mayoritarios en el agua.

En los Diagramas de Stiff o Poligonales se representan la concentración en mEq/L de aniones (hacia la derecha) y cationes (hacia la izquierda) en semirrectas paralelas, uniendo los extremos generando un polígono. Sobre cada semirrecta se toma un sólo ión. La forma de las figuras resultantes da idea del tipo de agua, se presta a comparaciones, y resulta fácilmente demostrativa al insertarlas en mapas hidroquímicos (Custodio, y Llamas, 1983).

En el caso del suelo, para conocer su contenido en Fósforo se aplicó el procedimiento de Olsen *et al.* (1982) que se encuentra descrito en la NOM-021-SEMARNAT-2000. El método consiste en la determinación de Fósforo disponible tanto en suelos neutros como alcalinos.

Anexo II.

3.5 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE BALANCE DE NITRÓGENO (N)

Para la estimación del balance de Nitrógeno en el sistema, se definió un modelo conceptual con las variables que se consideran en esta investigación, el cual se presenta en la Figura 3.10.

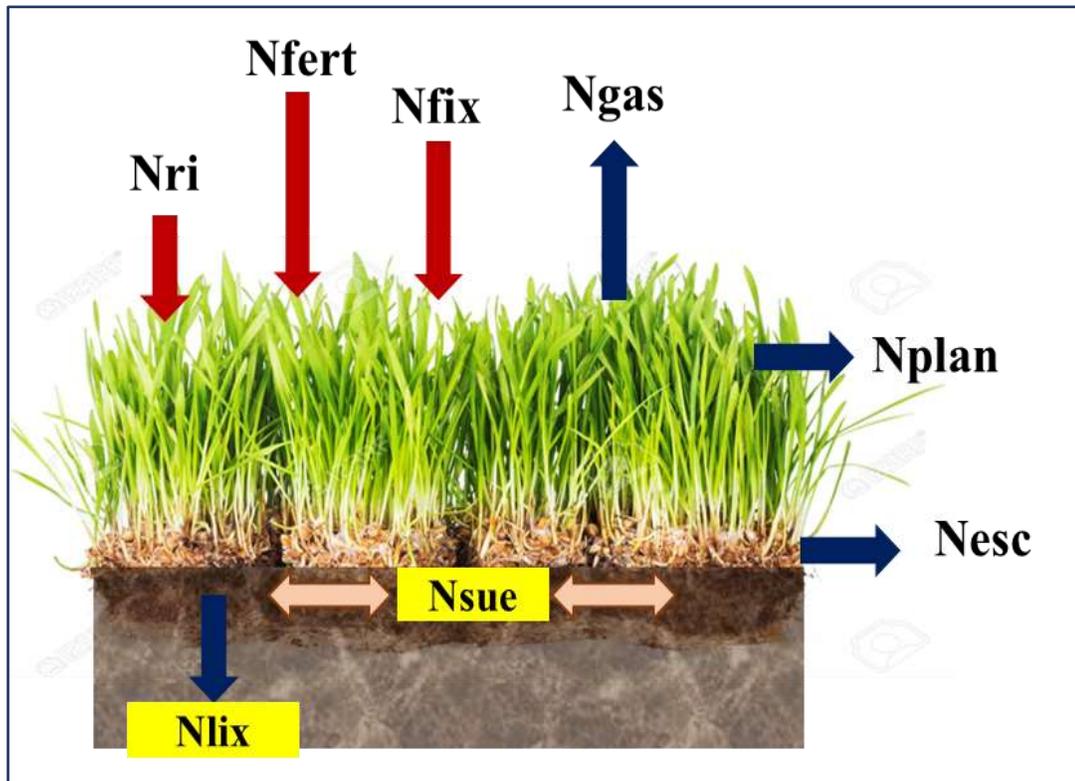


Figura 3.9 Balance de Nitrógeno

*(*Nri*: Nitrógeno en el agua de riego, *Nfert*: Nitrógeno del fertilizante, *Nfix*: Nitrógeno incorporado por fijación atmosférica, *Ngas*: Nitrógeno que se pierde a la atmósfera en forma de gas, *Nplan*: Nitrógeno absorbido por la planta, *Nesc*: Nitrógeno en el agua de drenaje, *Nsue*: Nitrógeno residual en suelo; *Nlix*: Nitrógeno lixiviado).

Se propuso la ecuación 3.31 (basada en la ecuación de Bouwman *et al.* (2013)) para estimar el N que se lixivia, donde como variables de entrada se consideraron el agua de riego, el fertilizante aplicado y la fijación atmosférica del N, y como variables de salida el N aprovechado por la planta, el N liberado a la atmósfera en forma de gas, N retenido en suelo, y el N presente en el agua de escorrentía, y como variable a conocer el N lixiviado.

$$N_{lix} = (N_{ri} + N_{fert} + N_{fix}) - (N_{plan} + N_{gas} + N_{esc} + N_{sue}) \quad \text{Ec. (3.31)}$$

Donde:

Nri: Aporte de N por agua de riego (kg/m³/ha)

Nfert: Aporte de N por fertilización (kg/ha)

Nfix: Aporte de N por fijación atmosférica (kg/ha)

Nplan: N aprovechado por el cultivo (kg/ha)

Ngas: N liberado en forma de gas (kg/ha)

Nesc: N disuelto en el agua de drenaje (kg/m³/ha)

Nsue: N residual en el suelo (kg/ha)

Nlix: N lixiviado al acuífero (kg/m³/ha)

3.5.1 Nitrógeno en agua de riego (Nri)

El agua de riego se analizó en laboratorio lo que permitió determinar la concentración de nitratos. Las muestras de agua proceden del primer riego (noviembre/2017), que corresponde al riego de pre-siembra, y del cuarto riego de auxilio (marzo/2018). El valor de la concentración de nitratos se transformó en N, con base en su estequiometría. La concentración de N utilizada fue el promedio de los dos muestreos.

3.5.2 Nitrógeno por fertilización (Nfert)

Las dosis y tipos de fertilizantes utilizados para el cultivo de trigo y maíz se determinaron con base en las recomendaciones hechas por INIFAP a los agricultores del Valle del Yaqui.

En el caso del cultivo de trigo, previo al riego de pre-siembra, se aplican dosis de 300 kg/ha de Urea (con 138 kg de N), 200 kg/ha amoníaco (con 164 kg de N), y 150 kg/ha de Fosfato monoamónico (MAP) (con 17 kg de N). La segunda aplicación de fertilizantes se realiza durante el primer riego de auxilio en donde se adiciona fertilizante líquido (amoníaco) con una dosis de 70 kg/ha (con 32 kg de N) (Cortés, 2009).

En el caso del maíz, la cantidad de fertilizante aplicada que se recomienda es de 450 kg/ha de fertilizante, dividiendo en dos aplicaciones; la primera de 300 kg/ha de fertilizante (con 240 kg de N), y una de auxilio de 150 kg/ha de fertilizante (con 69 kg de N) (INIFAP, 2005).

3.5.3 Fijación atmosférica de Nitrógeno

Grahmann *et al.* (2018) en su investigación “*High N fertilizer application to irrigated wheat in Northern Mexico for conventionally tilled and permanent raised beds: Effects on N balance and short term N dynamics*” realizaron un estudio del balance de Nitrógeno en el campo experimental del CIMMYT (Campo experimental Norman E. Borlaug, ubicado en el DR041) en una parcela de cultivo durante el ciclo de noviembre 2013 a mayo 2014, en el que se midió el aporte y las salidas de N directamente en la parcela y determinaron para el Valle del Yaqui una fijación atmosférica de 2.5 kg/ha de N, valor que se tomó en esta investigación.

3.5.4 Nitrógeno liberado en forma de gas (N_{gas})

En la investigación “*Nitrous oxide (N₂O) flux responds exponentially to nitrogen fertilizer in irrigated wheat in the Yaqui Valley, Mexico*” de Millar *et al.* (2018) se elaboraron curvas de respuesta de emisiones de N en función a las unidades de fertilizante aplicado (kg de N) con un porcentaje de confianza de 95% durante los periodos 2012-2013 y 2013-2014 en un bloque del campo experimental del CIMMYT. Estas curvas permitieron definir una ecuación para estimar el N liberado en forma de gas, por lo que el N en forma de gas fue estimado con la ecuación 3.32.

$$N_2O = 258 \times \exp(0.0068 \times N) \quad \text{Ec. (3.32)}$$

Donde:

N₂O: Óxido de Nitrógeno (g N₂O-N/ha)

exp: Número de Euler (2.71827)

N: Tasa de Nitrógeno aplicada al cultivo (kg/ha)

3.5.5 Nitrógeno aprovechado por los cultivos (N_{plan})

El N aprovechado por los cultivos se estimó utilizando la cantidad de N aprovechada por los cultivos de trigo y maíz reportado en el informe técnico del INIFAP (2005), en el cual se establece que el trigo aprovecha de 22 a 32 kg de N por tonelada de grano producido, y en el

caso del maíz, el aprovechamiento oscila de 20 a 29 kg de N por tonelada de grano producido. El rendimiento estimado, en este mismo informe técnico, en el norte de México para maíz es de 10 ton/ha y para trigo de 9 ton/ha.

3.5.6 Nitrógeno en agua de drenaje (Nesc)

El N en el agua de drenaje se determinó tomando muestras de agua en el punto TD-8 (punto de salida del drenaje del bloque) durante el primer riego (noviembre/2017) y durante el cuarto riego (marzo/2018). En laboratorio se analizó la presencia de nitratos. El valor de la concentración de nitratos se transformó en N, con base en su estequiometría.

3.5.7 Nitrógeno en suelo (Nsue)

El N residual en el suelo se estimó a partir de los valores obtenidos en la investigación de Grahmann et al. (2018), en la cual, para una parcela experimental dentro del Distrito de Riego del Río Yaqui, se calculó que del total de N aplicado con el fertilizante un 18% permanece como residual en el suelo. Otros autores señalan valores comprendidos entre el 14 y 24% (Yamaguchi, 1991)

3.5.8 Lixiviación de Nitrógeno por debajo de la zona radicular (Nlix)

El N lixiviado al acuífero se estimó con la ecuación del balance de N descrita anteriormente (ecuación 3.31).

3.6. ESTABLECIMIENTO DEL MODELO CONCEPTUAL DEL BALANCE DE FÓSFORO (P)

El modelo conceptual para la estimación del balance de Fósforo se planteó como se muestra en la figura 3.11. Los distintos componentes de este balance se describen a continuación.

3.6.1 Fósforo por fertilización (Pfert)

A partir de las dosis y tipos de fertilizante se estimó la cantidad de P aplicado a los cultivos de trigo y maíz. En el caso del cultivo de trigo, previo al riego de pre-siembra, se aplican dosis de 150 kg/ha de Fosfato monoamónico (MAP) con 78 kg de P. La segunda aplicación de fertilizantes se realiza durante el primer riego de auxilio en donde se adiciona fertilizante líquido (amoniaco) con una dosis de 70 kg/ha sin ningún aporte de P (Cortés, 2009).

En el caso del maíz, la cantidad de fertilizante aplicada que se recomienda es de 600 kg/ha de fertilizante, dividido en dos aplicaciones; la primera de 300 kg/ha de amoníaco sin aporte de P, además 150 kg/ha de Fosfato monoamónico (MAP) con 78 kg de P, y una de auxilio de 150 kg/ha de fertilizante sin aporte de P (INIFAP, 2005).

3.6.2 Fósforo en suelo (Psue)

Para conocer el contenido de P en suelo se tomaron muestras de suelo a diferentes profundidades (0.2, 0.4 y 0.6 m), que posteriormente fueron analizadas en laboratorio por el procedimiento de Olsen et al. (1982).

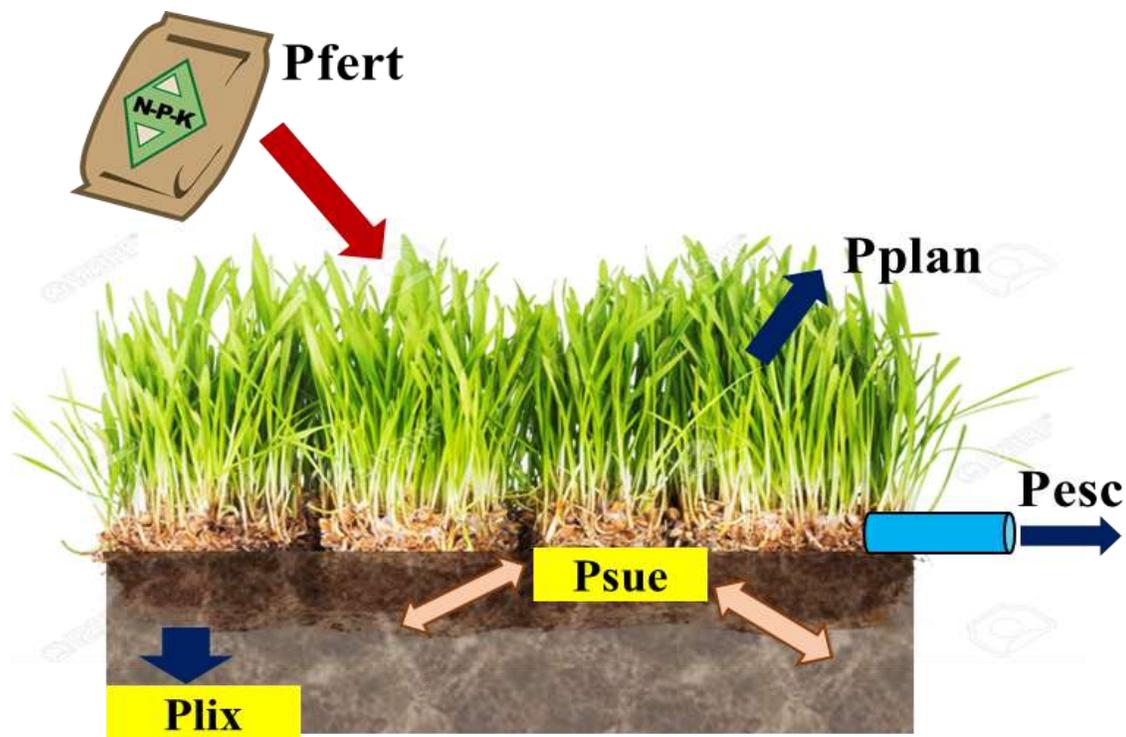


Figura 3.11 Balance de Fósforo

*(Entradas: P_{fert} : Fósforo del fertilizante, Salidas: P_{plan} : Fósforo absorbido por la planta, P_{esc} : Fósforo en el agua de drenaje, P_{sue} : fósforo residual en suelo; P_{lix} : fósforo lixiviado)

3.6.3 Fósforo aprovechado por los cultivos (Pplan)

Para estimar el valor del Fósforo aprovechado por los cultivos de trigo y maíz se propuso la utilización del valor propuesto por García *et al.* (2015), autores que estimaron, en función de los requerimientos de P por tonelada de producción, un índice de aprovechamiento de Fósforo por los cultivos de trigo, maíz, alfalfa y soya.

Tabla 3.2 Absorción de Fósforo por cultivos de maíz y trigo (García et al., 2015).

| Cultivo | Producción (ton/ha) | P absorbido (kg) | Requerimiento P (kg/ton) |
|---------|---------------------|------------------|--------------------------|
| Trigo | 4 | 20 | 5 |
| Maíz | 10 | 40 | 4 |

3.6.4 Fósforo en agua de drenaje (Pesc)

A partir de los análisis químicos realizados, se estimó un valor de P en el agua de drenaje en el punto TD-8 de 0.262 mg/L de P (2.62×10^{-4} kg/m³- P) en el muestreo de noviembre de 2017 y de 0.104 mg/L de P (1.04×10^{-4} kg/ m³- P) en el muestreo de marzo de 2018.

3.6.5 Lixiviación de Fósforo por debajo de la zona radicular (Plix)

Para estimar el Fósforo que podría lixiviarse al acuífero se aplicó la ecuación 3.33, donde como resultado del balance de P se obtuvo el valor de P lixiviado.

$$Plix = Pfert - (Pplan + Psue + Pesc) \quad \text{Ec. (3.33)}$$

Plix: Fósforo lixiviado (kg)

Pfert: Fósforo aplicado por fertilización (kg)

Pplan: Fósforo aprovechado por los cultivos (kg)

Psue: Fósforo adsorbido en el suelo (kg)

Pesc: Fósforo liberado en el agua de escorrentía (kg)

3.7 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

La evaluación de la calidad del agua se realizó tomando en cuenta los criterios establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, ya que el abastecimiento público de las poblaciones asentadas en la zona de estudio proviene de agua a través de varios pozos destinados al uso y consumo humano.

La evaluación de la calidad del agua para la protección de la vida acuática en la Bahía de Tóbari se llevó a cabo con base en Ley Federal de Derechos - Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (2016), en la que se señalan los valores para la protección de la vida acuática.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se recopilaron datos de clima, hidrología, geología, características del acuífero, actividades agrícolas (tipos de cultivo, fertilizantes y plaguicidas aplicados, periodos de cultivo, láminas de riego, sistema de drenaje), así como estudios previos realizados llevados a cabo por diversos centros de investigación y organismos gubernamentales. Esta información ya procesada se incluyó en el Capítulo 3.

4.2 BALANCE HÍDRICO (Ciclo agrícola 2017-2018)

El balance hídrico se estimó para un bloque compuesto por 24 parcelas de trigo con diferente extensión, sumando una extensión total de 163 hectáreas, y por 18 parcelas de maíz que sumaron un área total de 189 hectáreas dentro del bloque.

Como ejemplo, a continuación, se presenta en detalle la estimación del balance hídrico para una parcela de trigo y, posteriormente, para una de maíz. Ese mismo procedimiento se llevó a cabo para cada una de las parcelas de trigo y maíz restantes, para finalmente obtener el balance hídrico para el bloque y para el total del área drenada por el dren colector AR16.

4.2.1 Balance hídrico para una parcela de trigo (AC-1)

La Tabla 4.1 contiene la información sobre las dotaciones (láminas) de riego de una parcela de trigo con un ciclo de cultivo de 155 días. Se llevaron a cabo 5 riegos en la parcela, con láminas de riego que decrecen en el tiempo debido a que el cultivo requiere menor cantidad de agua al final del ciclo.

Tabla 4.1 Datos de riego para el ciclo de cultivo de trigo (nov/2017 – abr/2018). Parcela AC-1

| <i>Productor</i> | <i>Superficie total (ha)</i> | <i>Fecha</i> | <i>Riego</i> | <i>Superficie regada(ha)</i> | <i>Lámina (mm)</i> |
|----------------------------|------------------------------|--------------|--------------|------------------------------|--------------------|
| <i>Agrícola Chairez, 1</i> | 5 | 30/11/2017 | 1 | 5.0 | 142.6 |
| <i>Agrícola Chairez, 1</i> | 5 | 03/02/2018 | 2 | 1.5 | 172.8 |
| <i>Agrícola Chairez, 1</i> | 5 | 04/02/2018 | 2 | 3.5 | 138.9 |
| <i>Agrícola Chairez, 1</i> | 5 | 03/03/2018 | 3 | 5.0 | 138.2 |
| <i>Agrícola Chairez, 1</i> | 5 | 26/03/2018 | 4 | 5.0 | 77.8 |
| <i>Agrícola Chairez, 1</i> | 5 | 09/04/2018 | 5 | 5.0 | 72.0 |

A partir de la información de la tabla 4.1 y de los parámetros agronómicos (granulometría y textura, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y humedad total utilizable), se estimó el riego efectivo (Re). A continuación, se presentan los datos empleados para esta estimación.

a) Granulometría y textura

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados de temperatura y densidad obtenidos en la prueba de laboratorio, a partir de los cuales se realizó la clasificación granulométrica por medio de las ecuaciones del método de Bouyoucos (1963). En la Tabla 4.3 se encuentra detallado el porcentaje de arena, arcilla y limo, con base en el cual se realizó la clasificación textural.

Tabla 4.2 Temperatura y densidad del suelo

| ID | 40 seg | | | 2 hrs | | |
|------------|-----------|----------------|--------------------------|-----------|----------------|--------------------------|
| | Temp (°C) | Densidad (g/L) | Densidad corregida (g/L) | Temp (°C) | Densidad (g/L) | Densidad corregida (g/L) |
| TD8 P1-20 | 19 | 32 | 31.91 | 20 | 15 | 15.18 |
| TD8 P1-60 | 19 | 31 | 30.91 | 20 | 19 | 19.18 |
| TD10 P2-20 | 19 | 22 | 21.91 | 20 | 7 | 7.18 |
| TD10 P2-40 | 19 | 29 | 28.91 | 20 | 19 | 19.18 |
| TD10 P2-60 | 19 | 31 | 30.91 | 20 | 17 | 17.18 |

Tabla 4.3 Granulometría y textura del suelo en el bloque TD-8 (Cr: textura franco arcilloso)

| ID | Granulometría | | | Textura |
|-----------|---------------|-------------|----------|---------|
| | Arena (%) | Arcilla (%) | Limo (%) | |
| TD8 P1-20 | 36.18 | 36.36 | 27.46 | Cr |
| TD8 P1-60 | 38.18 | 40.36 | 21.46 | Cr |
| TD8 P2-20 | 42.18 | 38.36 | 19.46 | Cr |
| TD8 P2-40 | 32.18 | 38.36 | 29.46 | Cr |
| TD8 P2-60 | 38.18 | 34.36 | 27.46 | Cr |

El suelo del bloque en estudio tiene un comportamiento homogéneo con clasificación general de suelo franco arcilloso (Cr). El suelo franco arcilloso tiene como característica ser de textura fina. En bibliografía (Grahmann *et al.*, 2016) se ha señalado que el valor de densidad

aparente característico de estos suelos es de 1.35 g/cm³ en promedio, con valores que oscilan de 1.3 a 1.4 g/cm³, poseen una porosidad total entre el 7 a 19% y valores de conductividad hidráulica de 0.25 a 1.5 cm/h y un promedio de 0.8 cm/h (Flores, 2010).

b) Capacidad de campo (Cc), punto de marchitez permanente (Pmp), humedad total utilizable (HTU) y f(HTU)

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados de los cuatro parámetros agronómicos que se emplearon para la estimación del riego efectivo (Re). Los valores obtenidos concuerdan con los promedios que otros autores como Fuentes & García (2003) y Flores (2010) que señalan valores entre 25 y 35 % en capacidad de campo (Cc) y de 11 a 15 % para el caso del punto de marchitez permanente (Pmp).

Hay que resaltar que, del total de agua a capacidad de campo, y por encima del punto de marchitez permanente, el porcentaje de humedad aprovechable (HTU) varía entre 10% y 12%.

Una vez obtenidos los valores de estos parámetros agronómicos del suelo se utilizó la ecuación del riego efectivo (Ecuación 3.6) para su estimación.

Tabla 4.4 Parámetros agronómicos del suelo en el bloque TD-8

| <i>ID</i> | <i>Profundidad (m)</i> | <i>Cc (%)</i> | <i>Pmp (%)</i> | <i>HTU (%)</i> | <i>fHTU</i> |
|------------------|------------------------|---------------|----------------|----------------|-------------|
| <i>TD8 P1-20</i> | 0.2 | 25.35 | 14.31 | 11.04 | 0.56 |
| <i>TD8 P1-60</i> | 0.4 | 26.35 | 14.94 | 11.41 | 0.61 |
| <i>TD8 P2-20</i> | 0.2 | 25.16 | 14.19 | 10.97 | 0.56 |
| <i>TD8 P2-40</i> | 0.4 | 26.55 | 15.06 | 11.48 | 0.58 |
| <i>TD8 P2-60</i> | 0.6 | 24.44 | 13.74 | 10.70 | 0.60 |

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados de las variables estimadas para el balance hídrico para el cultivo de trigo durante el día de riego. Como primera variable del balance se encuentra el riego aplicado (Ri) como única variable de entrada por lo que es un 100% del agua de entrada. El riego efectivo (Re), que es el agua que se infiltra y parte de la cual se encuentra disponible para la planta, se estimó considerando las profundidades de raíz por lo

que el ciclo del trigo además de ser dividido por el número de riegos suministrados, también se subdividió en función del crecimiento de las raíces. El porcentaje de riego efectivo aumentó del inicio al final del ciclo agrícola, con valores iniciales del 52% hasta alcanzar un 56% al final del ciclo de cultivo. El escurrimiento superficial ocurre solo el día de riego y representan entre un 43% al 49% del total del balance hídrico.

El siguiente paso fue estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0) y la del cultivo (ET_c) durante los periodos inter-riego. La estimación de la ET_0 se llevó a cabo para el periodo comprendido entre los meses de octubre 2017 y mayo 2018 (Figura 4.1). Para este mismo periodo, se realizó la estimación de la ET_c de cada parcela, teniendo en cuenta que cada parcela tiene un inicio de cultivo en fecha diferente, por lo que no se pudo generalizar la estimación de ET_c y se estimó individualmente por cada parcela.

En la Figura 4.2 se muestra la gráfica de ET_c de trigo, referente al primer balance presentado. Se puede apreciar como los valores más altos de ET_c corresponden a un intervalo de tiempo que inicia el 17 de febrero y finaliza el 14 de abril, en el que el trigo ya se ha desarrollado, por lo que existe una mayor demanda de agua.

Tabla 4.5 Variables del balance hídrico para el cultivo de trigo para un día

| <i>ID</i> | <i>Fecha</i> | <i>Riego (mm)</i> | <i>Riego (%)</i> | <i>Riego efectivo (mm)</i> | <i>Riego efectivo (%)</i> | <i>Escur. (mm)</i> | <i>Escur. (%)</i> |
|------------------|--------------|-------------------|------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| <i>TD8 P2-20</i> | 30/11/2017 | 143 | 100 | 75 | 52 | 68 | 48 |
| <i>TD8 P2-20</i> | 03/02/2018 | 173 | 100 | 88 | 51 | 85 | 49 |
| <i>TD8 P2-20</i> | 04/02/2018 | 139 | 100 | 73 | 53 | 66 | 47 |
| <i>TD8 P2-40</i> | 03/03/2018 | 139 | 100 | 74 | 53 | 65 | 47 |
| <i>TD8 P2-40</i> | 26/03/2018 | 78 | 100 | 45 | 58 | 33 | 42 |
| <i>TD8 P2-60</i> | 09/04/2018 | 72 | 100 | 41 | 57 | 31 | 43 |

**ID: Se compone del bloque muestreado (TD8) y la profundidad a la que se fue tomando la muestra de suelo con relación a la profundidad que tiene la raíz a lo largo del ciclo y que oscila de 20 a 60 cm.*

En la tabla 4.6 se muestran las variables del balance hídrico durante los periodos inter-riego, con los valores de ETc, de Re y de infiltración eficaz. La infiltración eficaz es producto del remanente de agua después de restar la ETc inter-riego. Los valores de esta variable representan del 33 al 16 % del agua en el balance, siendo en los últimos riegos cuando el valor es menor debido a que la planta aprovecha más agua de la total aplicada por lo que se produce un efecto inverso con respecto a la ETc que aumenta conforme pasan los días de cultivo. La ETc presentó valores que oscilaron del 19% al 43% a lo largo del ciclo.

Tabla 4.6 Variables del balance hídrico para el cultivo de trigo para todo ciclo de cultivo

| ID | Fecha | Re (mm) | Re (%) | ETc (mm) | ETc (%) | Inf. eficaz (mm) | Inf. eficaz (%) |
|------------------|--------------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| <i>TD8 P2-20</i> | 30/11/2017 | 75 | 52 | 28 | 19 | 47 | 33 |
| <i>TD8 P2-20</i> | 03/02/2018 | 88 | 51 | 39 | 23 | 49 | 28 |
| <i>TD8 P2-20</i> | 04/02/2018 | 73 | 53 | 38 | 28 | 35 | 25 |
| <i>TD8 P2-40</i> | 03/03/2018 | 74 | 53 | 56 | 40 | 18 | 13 |
| <i>TD8 P2-40</i> | 26/03/2018 | 45 | 58 | 32 | 41 | 13 | 17 |
| <i>TD8 P2-60</i> | 09/04/2018 | 41 | 57 | 30 | 42 | 11 | 15 |

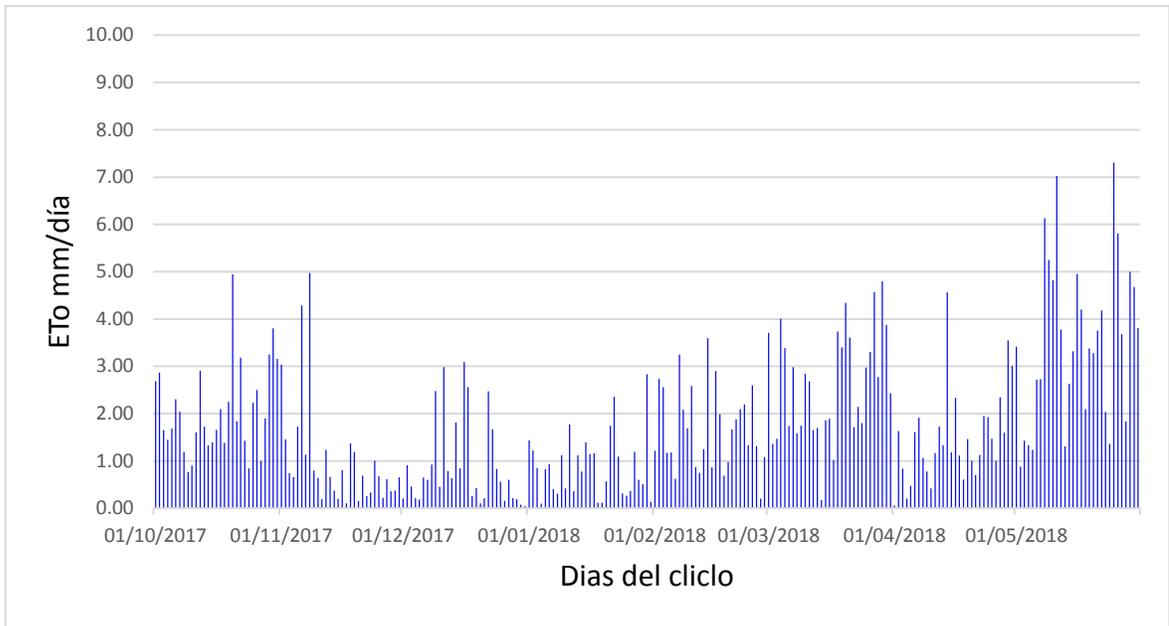


Figura 4.1 Evapotranspiración de referencia (ET_0) para el cultivo de trigo (octubre/2017 – mayo/2018)

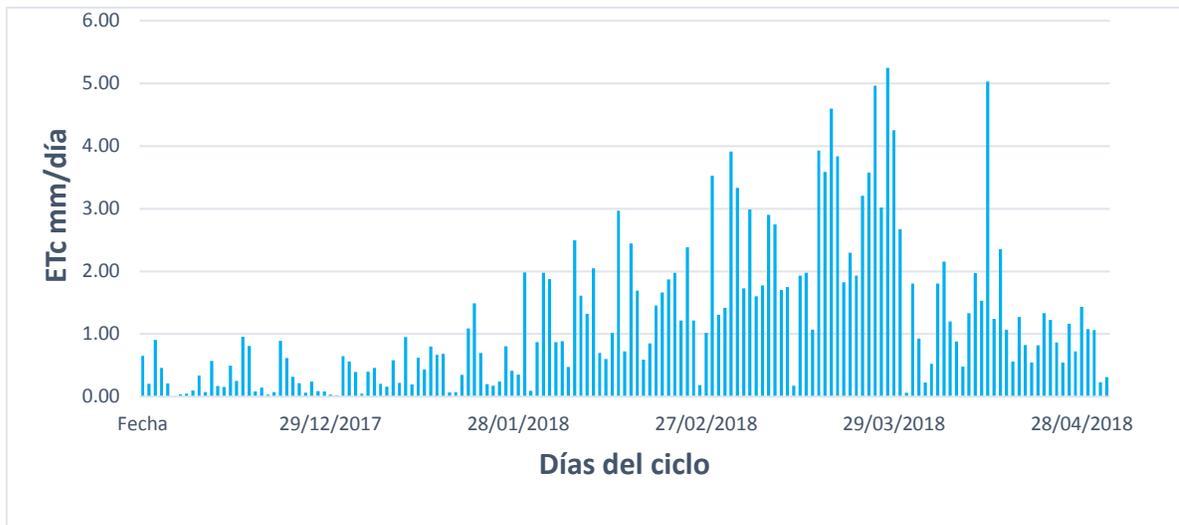


Figura 4.2 Evapotranspiración del cultivo de trigo (ET_c) (octubre/2017 – mayo/2018)

En la figura 4.3 se exponen de manera gráfica los balances hídricos para cada uno de los eventos de riego en la parcela AC-1. Cabe mencionar que el primer riego, como ya se ha explicado en el apartado de riego y drenaje, es el riego de pre-siembra por lo que en la figura 4.3 se nota el poco decremento que presenta el agua retenida en el suelo (pérdida por evapotranspiración del cultivo) ya que el cultivo aún no se ha desarrollado, y por ello existe una mayor infiltración eficaz al subsuelo, lo cual se puede apreciar en la figura 4.4.

La infiltración eficaz (que representaría el agua de recarga para el acuífero) está en función del agua retenida por el suelo y la evapotranspiración diaria del cultivo. A partir del día de riego, la planta absorbe agua a través de las raíces, y dicho consumo se ve reflejado en la evapotranspiración del cultivo. El agua que no es aprovechada por la planta, al final de cada periodo, es considerada como agua de infiltración eficaz.

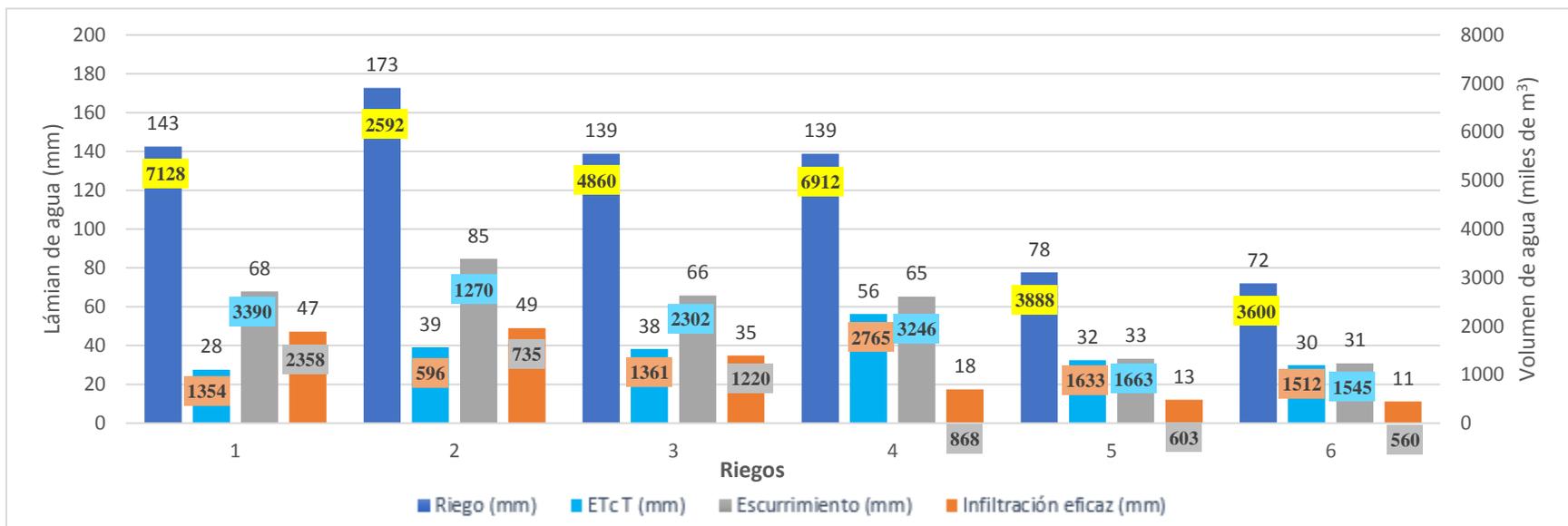


Figura 4.3 Balance hídrico por riego para la parcela de trigo (AC-1)

*En los rectángulos amarillos se muestran los valores de riego (m^3), en los rectángulos color salmón el valor de la ETc (m^3), en los rectángulos azules se muestra el valor de escurrimiento para cada riego (m^3), en rectángulos color gris están los valores de infiltración eficaz (m^3) y sobre las barras se encuentra el valor de cada variable en milímetros.

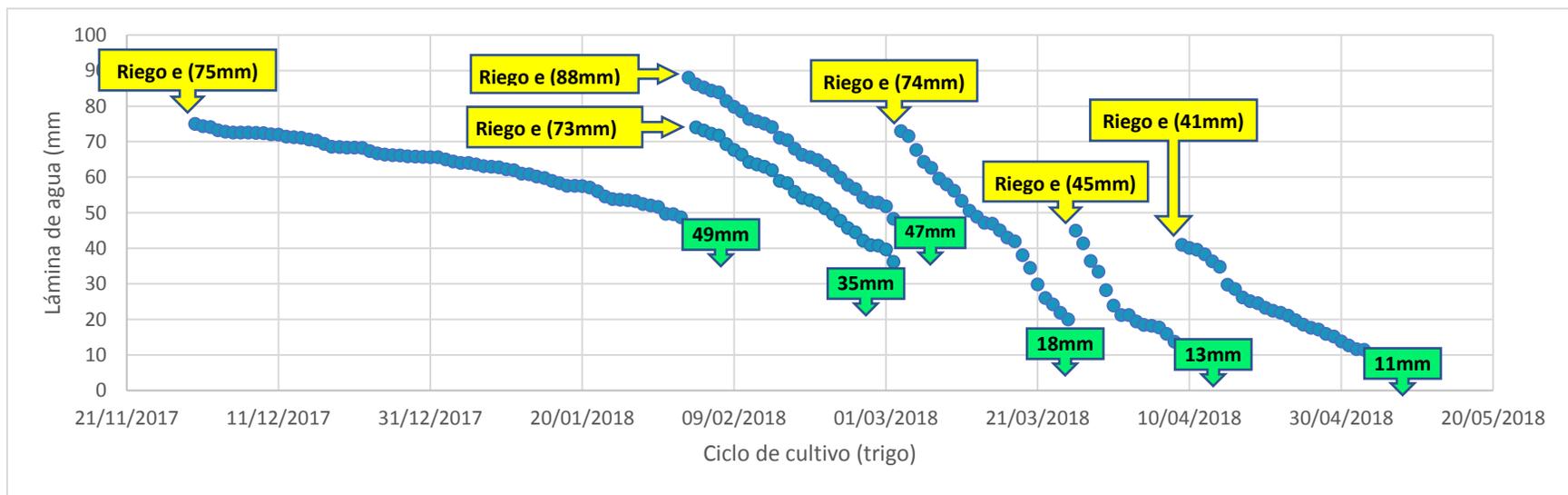


Figura 4.4 Representación del fenómeno de infiltración eficaz en función de la ET_c del trigo para la parcela AC-1

* El día de riego señalado para fines de la infiltración eficaz considera el valor de riego efectivo ya que es el agua que estará disponible para las plantas en la zona de las raíces.

Riego e (mm) → Cantidad de agua después de un riego (Riego efectivo) (mm).

 Periodo durante el cual el cultivo aprovecha el agua, y que representa la salida por ET_c diaria (mm)

Ie (mm) ↓ Agua remanente en el suelo después del periodo de ET_c , considerada como el agua capaz de infiltrarse por debajo de la zona de las raíces (mm).

A partir del balance para cada riego, se realizó un balance general producto de la suma de todos los balances por riego de la parcela AC-1, que permitió obtener los resultados de la Tabla 4.7. El balance hídrico se puede contabilizar en porcentajes de la siguiente forma: de un 100% de agua que entra como agua de riego, el 30% es aprovechado por la planta y emitido en forma de evapotranspiración del cultivo, el 47% es transportado por el sistema de drenaje como escurrimiento superficial hacía el dren colector principal (Arroyo-16) y el 23% restante corresponde a la infiltración eficaz.

Tabla 4.7 Resultados del balance hídrico por ciclo para el cultivo de trigo para la Parcela AC-1

| <i>Variables</i> | <i>Total</i> | | |
|---|--------------|------------------------|------------|
| | <i>(mm)</i> | <i>(m³)</i> | <i>(%)</i> |
| <i>Riego</i> | 743 | 28980 | 100 |
| <i>Evapotranspiración del cultivo (ETc)</i> | 223 | 8698 | 30 |
| <i>Escurrimiento superficial (Esc)</i> | 348 | 13573 | 47 |
| <i>Infiltración eficaz (Inf e)</i> | 172 | 6709 | 23 |

4.2.2 Balance hídrico total de las parcelas de trigo

Para cada parcela de trigo existente en el bloque se obtuvo su balance hídrico y con ello se estimó el balance hídrico parcial del bloque para el cultivo de trigo (Tabla 4.8).

El resultado de cada uno de los balances varía entre cada parcela de cultivo, pero en general el escurrimiento es la variable con los valores más altos de porcentaje con respecto al total de agua de riego, presentando valores comprendidos entre el 47% y 53%. Por su parte, la ETc oscila desde el 11% al 34% del total del agua de riego, oscilación que depende de la fase del ciclo de cultivo. La infiltración eficaz presenta valores que varían del 19% al 41%.

Tabla 4.8 Datos del balance hídrico por cultivo de trigo para cada una de las parcelas del bloque

| <i>NP</i> | <i>ID</i> | <i>Superficie (m²)</i> | <i>Lámina de Riego (mm)</i> | <i>Riego (%)</i> | <i>ETc (mm)</i> | <i>ETc (%)</i> | <i>Esc (mm)</i> | <i>Esc (%)</i> | <i>Inf eficaz (mm)</i> | <i>Inf eficaz (%)</i> |
|-----------|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1 | AC-1 | 50,000 | 743 | 100 | 223 | 30 | 348 | 47 | 172 | 23 |
| 2 | AC-2 | 50,000 | 991 | 100 | 331 | 33 | 474 | 48 | 186 | 19 |
| 3 | AC-3 | 50,000 | 972 | 100 | 182 | 19 | 474 | 49 | 316 | 33 |
| 4 | AC-4 | 50,000 | 570 | 100 | 169 | 30 | 273 | 48 | 128 | 22 |
| 5 | APH-1 | 50,000 | 1633 | 100 | 384 | 24 | 796 | 49 | 453 | 28 |
| 6 | APH-2 | 50,000 | 1854 | 100 | 308 | 17 | 954 | 51 | 592 | 32 |
| 7 | JLIG-1 | 50,000 | 2379 | 100 | 309 | 13 | 1268 | 53 | 802 | 34 |
| 8 | JLIG-2 | 50,000 | 2187 | 100 | 282 | 13 | 1147 | 52 | 758 | 35 |
| 9 | RM-1 | 70,000 | 2252 | 100 | 374 | 17 | 1138 | 51 | 740 | 33 |
| 10 | RM-2 | 50,000 | 1314 | 100 | 282 | 21 | 641 | 49 | 392 | 30 |
| 11 | RM-3 | 30,000 | 1300 | 100 | 255 | 20 | 653 | 50 | 392 | 30 |
| 12 | RM-4 | 40,000 | 1309 | 100 | 164 | 12 | 679 | 52 | 468 | 36 |
| 13 | PR-1 | 140,000 | 1828 | 100 | 337 | 18 | 893 | 49 | 598 | 33 |
| 14 | PR-2 | 150,000 | 1899 | 100 | 461 | 24 | 889 | 47 | 549 | 29 |
| 15 | JM | 50,000 | 930 | 100 | 177 | 19 | 462 | 50 | 291 | 31 |
| 16 | CVG | 50,000 | 1445 | 100 | 327 | 23 | 731 | 51 | 387 | 27 |
| 17 | MIB | 50,000 | 1048 | 100 | 284 | 27 | 516 | 49 | 249 | 24 |
| 18 | RGS | 50,000 | 1164 | 100 | 228 | 20 | 559 | 48 | 378 | 32 |
| 19 | JJS | 250,000 | 3640 | 100 | 387 | 11 | 1778 | 49 | 1475 | 41 |
| 20 | GOT | 50,000 | 1332 | 100 | 304 | 23 | 641 | 48 | 387 | 29 |
| 21 | OAP | 100,000 | 1681 | 100 | 338 | 20 | 818 | 49 | 525 | 31 |
| 22 | ALS | 50,000 | 1553 | 100 | 292 | 19 | 784 | 50 | 477 | 31 |
| 23 | MAL | 50,000 | 2076 | 100 | 369 | 18 | 1038 | 50 | 669 | 32 |
| 24 | JMV | 50,000 | 930 | 100 | 176 | 19 | 462 | 50 | 292 | 31 |
| | Total | 1,630,000 | 37030 | 100 | 6943 | 19 | 18416 | 50 | 11671 | 31 |

En la Figura 4.5 se presenta el balance final correspondiente a la suma de cada uno de los balances de cada una de las parcelas de trigo en el bloque en estudio. De un 100% de agua que entra como riego, el 19% sale del sistema en forma de ETc (esta variable ya considera el agua aprovechada por la planta), el 50% del agua es escurrimiento superficial que circula por el sistema de drenaje y el 31% del agua restante es infiltración eficaz.

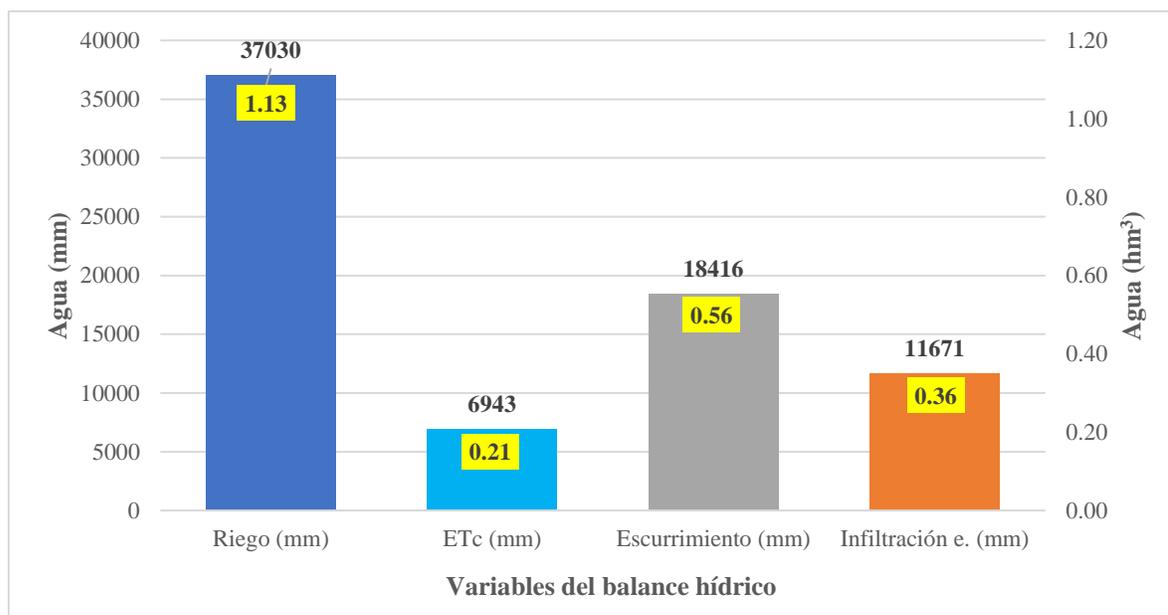


Figura 4.5 Balance hídrico total para el cultivo de trigo en el ciclo noviembre-2017 a mayo-2018

*En color amarillo se muestra la cantidad de agua en hm³ y sobre las barras de datos el valor de la lámina en mm de agua por ciclo para el cultivo de trigo

4.2.3 Balance hídrico para una parcela de maíz (APH-M1)

A diferencia de las parcelas de trigo, en las de maíz existen más eventos de irrigación por ciclo de cultivo. En la Tabla 4.9 se enlistan los datos de aplicación de riego para el caso de las parcelas con cultivos de maíz.

En la Figura 4.6 se muestra la gráfica de ETc del maíz, referente al primer balance presentado. Al igual que ocurre con la ETc en el trigo, en el caso del maíz, al inicio del ciclo el valor de la ETc es muy bajo pero al pasar el tiempo, y con el desarrollo de la planta, la ETc aumenta llegando a sobrepasar los 5 mm/día.

Tabla 4.9 Datos de riego para el ciclo de cultivo de maíz (nov/2017 – abr/2018) (parcela APH-M1)

| <i>Productor</i> | <i>Cultivo</i> | <i>Superficie total (ha)</i> | <i>Fecha</i> | <i>Riego</i> | <i>Superficie regada (ha)</i> | <i>Lámina (mm)</i> |
|----------------------|----------------|------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------|--------------------|
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 21/10/2017 | 1 | 2.0 | 243.0 |
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 22/10/2017 | 1 | 3.0 | 172.8 |
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 25/01/2018 | 2 | 4.0 | 151.2 |
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 25/01/2018 | 2 | 1.0 | 151.2 |
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 25/02/2018 | 3 | 5.0 | 146.9 |
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 24/03/2018 | 4 | 3.0 | 216.0 |
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 25/03/2018 | 4 | 2.0 | 216.0 |
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 14/04/2018 | 5 | 5.0 | 190.1 |
| Agropecuaria PH, M-1 | Maíz | 5 | 14/05/2018 | 6 | 5.0 | 110.9 |

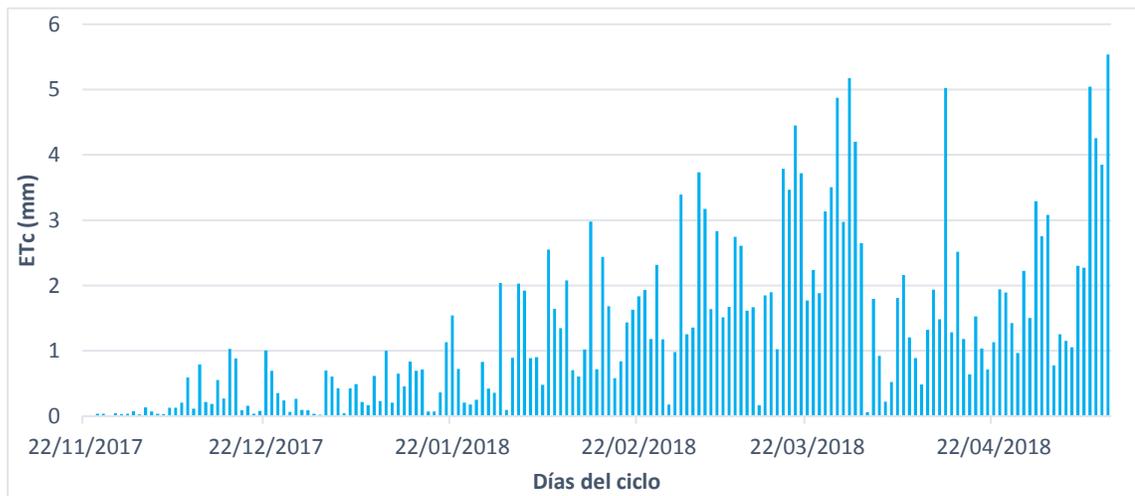


Figura 4.6 Evapotranspiración del cultivo de maíz (ETc) (octubre/2017 – mayo/2018)

En la Tabla 4.10 se detallan los resultados de las variables estimadas para el balance hídrico en el caso del cultivo de maíz en la parcela APH-M1. Con base en el porcentaje con respecto al volumen total de agua de riego, el riego efectivo (Re) presenta valores entre 48 y 54 % del total del agua utilizada para el riego, por su parte el escurrimiento superficial (Esc) que ocurre el día de riego (como remanente del agua que no es retenida por el suelo) presenta valores del 46 al 52% del total del agua.

En la tabla 4.11, se detallan los valores de la ETc acumulada, la cual representa entre el 8 y 40% del total del agua aplicada para riego, y valores de infiltración eficaz que oscilan del 40 al 13%

Tabla 4.10 Variables del balance hídrico durante el día de riego para el cultivo de maíz (parcela APH-M1)

| ID | Fecha | Riego (mm) | Riego (%) | Esc (mm) | Esc (%) | Re (mm) | Re (%) |
|-----------|--------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| TD8 P2-20 | 22/11/2017 | 130 | 100 | 61 | 47 | 69 | 53 |
| TD8 P2-20 | 23/11/2017 | 259 | 100 | 135 | 52 | 124 | 48 |
| TD8 P2-20 | 25/01/2018 | 151 | 100 | 73 | 48 | 78 | 52 |
| TD8 P2-20 | 25/01/2018 | 151 | 100 | 73 | 48 | 78 | 52 |
| TD8 P2-40 | 25/02/2018 | 147 | 100 | 70 | 48 | 77 | 52 |
| TD8 P2-40 | 24/03/2018 | 216 | 100 | 109 | 50 | 107 | 50 |
| TD8 P2-40 | 25/03/2018 | 216 | 100 | 109 | 50 | 107 | 50 |
| TD8 P2-60 | 14/04/2018 | 190 | 100 | 95 | 50 | 95 | 50 |
| TD8 P2-60 | 14/05/2018 | 111 | 100 | 51 | 46 | 60 | 54 |

Tabla 4.11 Variables del balance hídrico durante el ciclo de riego para el cultivo de maíz (parcela APH-M1).

| ID | Fecha | Re (mm) | Re (%) | ETc (mm) | ETc (%) | Inf. eficaz (mm) | Inf. eficaz (%) |
|-----------|--------------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|
| TD8 P2-20 | 22/11/2017 | 69.0 | 53 | 22.1 | 17 | 46.9 | 36 |
| TD8 P2-20 | 23/11/2017 | 124.0 | 48 | 21.7 | 9 | 102.3 | 39 |
| TD8 P2-20 | 24/01/2018 | 79.0 | 52 | 41.4 | 27 | 37.6 | 25 |
| TD8 P2-20 | 24/01/2018 | 79.0 | 52 | 41.4 | 27 | 37.6 | 25 |
| TD8 P2-40 | 25/02/2018 | 77.0 | 52 | 59.3 | 40 | 17.7 | 12 |
| TD8 P2-40 | 24/02/2018 | 107.0 | 50 | 45.6 | 21 | 61.4 | 29 |
| TD8 P2-40 | 21/03/2018 | 107.0 | 50 | 44.6 | 21 | 62.4 | 29 |
| TD8 P2-60 | 11/04/2018 | 95.0 | 50 | 34.8 | 18 | 60.2 | 32 |
| TD8 P2-60 | 01/05/2018 | 60.0 | 54 | 37.0 | 33 | 23.0 | 21 |

En la Figura 4.7 se expone, de manera gráfica, los balances hídricos por evento de riego. El grupo 1 y 2 corresponden al primer riego de pre-siembra. Se subdividió este riego ya que se regó en dos días consecutivos de modo que en el primer día se regó una parte de la parcela y el segundo la restante, por lo tanto, no se podía generalizar el balance y para interpretación de los datos fue más conveniente representarlo en dos grupos como resultado de este primer riego se nota un exceso de agua de riego con poco aprovechamiento de cultivo y por lo tanto con una ETc muy baja. Durante este riego los valores de escorrentía e infiltración eficaz son mayores que en los riegos posteriores.

Los grupos 3 y 4 corresponden al segundo riego de auxilio y en la gráfica se nota que, a partir de este riego, la ETc tiene un porcentaje alto y que la infiltración eficaz disminuye. En el último riego de auxilio (grupo 9), el volumen de agua de riego es menor y la ETc es alta aprovechando el cultivo más de la mitad del agua suministrada, lo que conlleva que la infiltración eficaz tenga un valor muy bajo, casi nulo (1mm).

En la Figura 4.8 se presenta con mayor detalle la variación temporal de la infiltración eficaz. La infiltración eficaz de los primeros riegos presenta un decremento con el tiempo debido a que la pérdida por ETc es baja. Ello se debe a que a medida que la planta de maíz crece requiere mayor cantidad de agua, así que el agua que se infiltra en cada periodo inter-riego es menor, incluso en dos de los periodos observados se presentaron valores de cero lo que también puede ser interpretado como que el suelo llegó a su punto de marchitez permanente, en donde la planta ya no puede extraer agua del suelo.

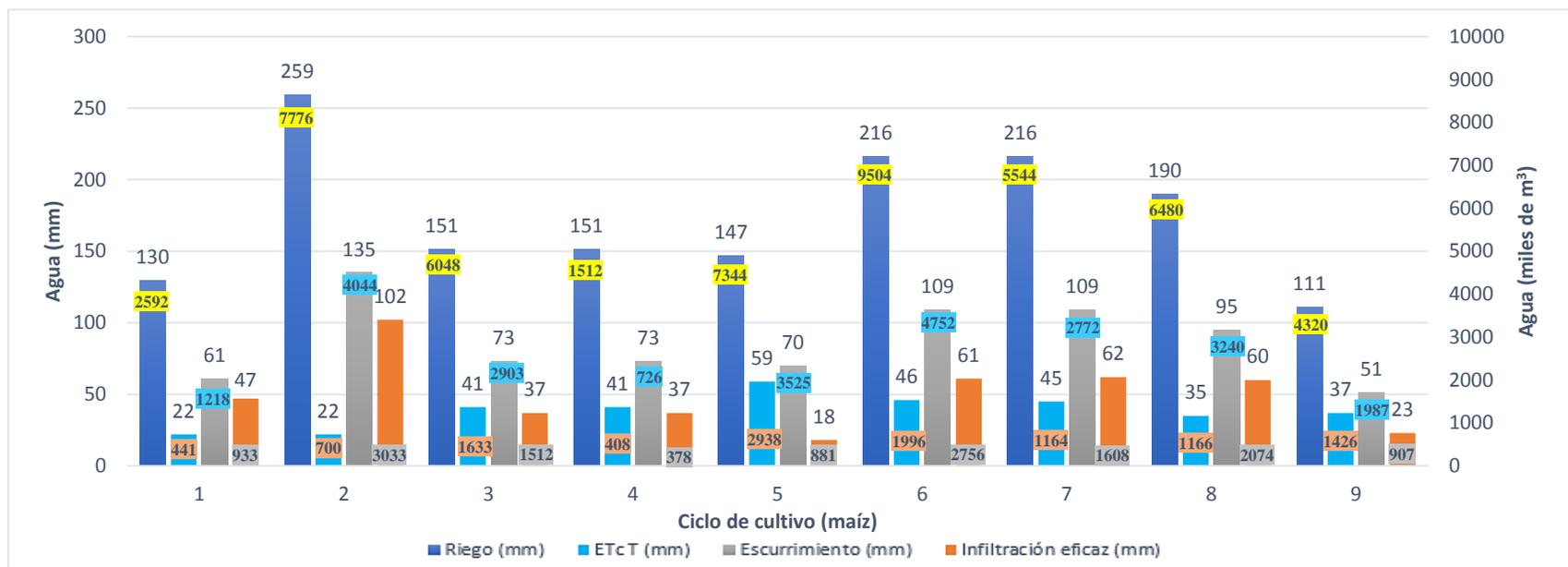


Figura 4.7 Balance hídrico por riego para la parcela de maíz (parcela APH-M1).

*En los rectángulos amarillos se muestran los valores de riego (m^3), en los rectángulos color salmón el valor de la ETc (m^3), en los rectángulos azules se muestra el valor de escurrimiento para cada riego (m^3), en rectángulos color gris están los valores de infiltración eficaz (m^3) y sobre las barras se encuentra el valor de cada variable en milímetros.

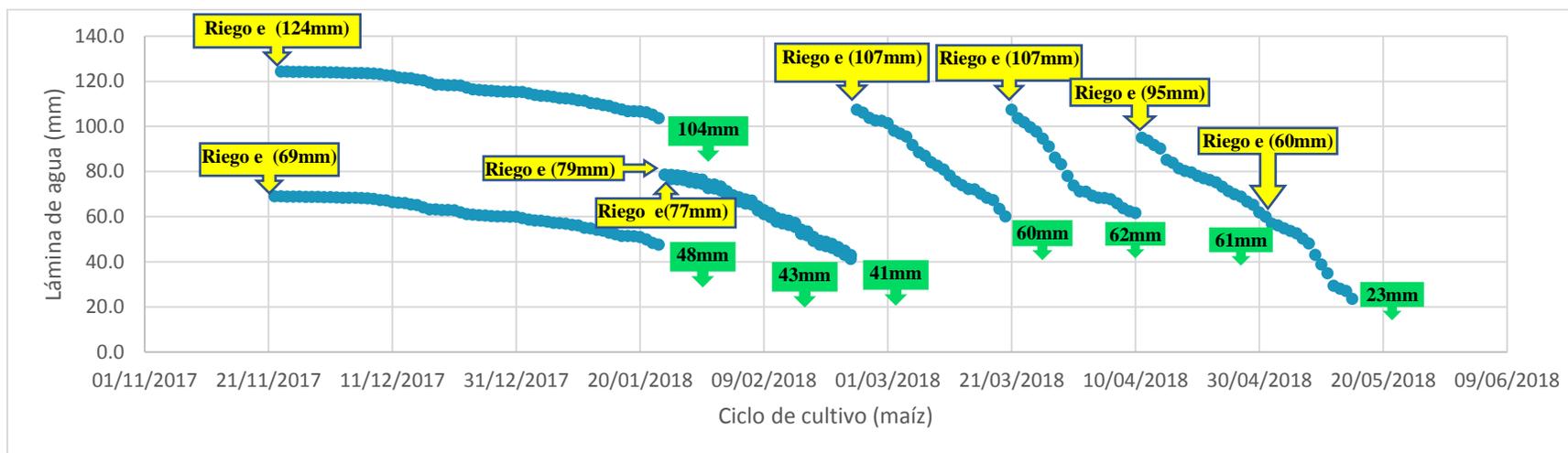


Figura 4.8 Representación del fenómeno de infiltración eficaz en función de la evapotranspiración del cultivo de maíz (parcela APH-M1).

*El día de riego señalado para fines de la infiltración eficaz considera el valor de riego efectivo ya que es el agua que estará disponible para las plantas en la zona de las raíces.

**El cuadro marcado como Riego (79mm) corresponde a dos eventos de riego en la misma fecha con las mismas condiciones de riego e infiltración eficaz por lo que las gráficas que los representan se sobreponen.

Riego e (mm) → Cantidad de agua después de un riego (Riego efectivo) (mm).

 Periodo durante el que el cultivo aprovecha el agua, salida por evapotranspiración del cultivo diaria (mm)

Inf e. (mm) ↓ Agua remanente en el suelo después del periodo de evapotranspiración del cultivo, considerada como el agua capaz de infiltrar por debajo de la zona de las raíces (mm).

A partir del balance por riego se realizó un balance general producto de la suma de variables del balance por cada uno de los riegos, el cual se muestra en la Tabla 4.12. En esta tabla se aprecia que de un 100% de agua de riego, el 22% que es aprovechado por el cultivo de maíz en forma de ETc, el 49% del agua de riego sale en forma de escorrentía superficial y el 29% del total del agua fue infiltración eficaz.

Tabla 4.12 Resultados del balance hídrico por ciclo para el cultivo de maíz (parcela APH-M1)

| <i>Variables</i> | <i>Total</i> | | |
|---|--------------|------------------------|------------|
| | <i>(mm)</i> | <i>(m³)</i> | <i>(%)</i> |
| <i>Riego</i> | 1571 | 51120 | 100 |
| <i>Evapotranspiración del cultivo (ETc)</i> | 345 | 12839 | 22 |
| <i>Escurrencimiento superficial (Esc)</i> | 774 | 25188 | 49 |
| <i>Infiltración eficaz (Inf e)</i> | 452 | 13093 | 29 |

4.2.4 Balance hídrico total de las parcelas de maíz

La Tabla 4.13 contiene los datos del balance por ciclo de cultivo de cada parcela de maíz en milímetros de lámina de agua. De esta tabla se puede señalar que, del total de volumen de agua de riego aplicada, una gran parte sale en forma de escorrentía por el sistema de drenaje (19,404 mm), a continuación de esta variable se encuentra la percolación que suma un total de 12,024 mm, y el resto del agua es la que la planta aprovecha y sale en forma de evapotranspiración del cultivo (7,853 mm). Se puede observar que este patrón de comportamiento, en el orden descrito, no aplica para las todas las parcelas pues en algunos casos la ETc es mayor que la infiltración eficaz.

Tabla 4.13 Datos del balance hídrico por ciclo para el cultivo de maíz

| <i>NP</i> | <i>ID</i> | <i>Superficie (m²)</i> | <i>Lámina de riego (mm)</i> | <i>Riego (%)</i> | <i>ETc (mm)</i> | <i>ETc (%)</i> | <i>Esc (mm)</i> | <i>Esc (%)</i> | <i>Inf. eficaz (mm)</i> | <i>Inf. eficaz (%)</i> |
|-----------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------------|------------------------|
| 1 | APH, M-1 | 50,000 | 1180 | 100 | 326 | 27.6 | 560 | 47.5 | 294 | 24.9 |
| 2 | APH, M-2 | 50,000 | 1598 | 100 | 415 | 26 | 788 | 49.3 | 395 | 24.7 |
| 3 | APH, M-3 | 50,000 | 1717 | 100 | 385 | 22.4 | 857 | 49.9 | 475 | 27.7 |
| 4 | APH, M-4 | 50,000 | 1644 | 100 | 431 | 26.2 | 820 | 49.9 | 393 | 23.9 |
| 5 | APH, M-5 | 50,000 | 1391 | 100 | 300 | 20.6 | 686 | 49.3 | 405 | 29.1 |
| 6 | AC, M-3 | 50,000 | 2182 | 100 | 498 | 22.8 | 1078 | 49.4 | 606 | 27.8 |
| 7 | AC, M-4 | 50,000 | 1644 | 100 | 369 | 22.5 | 808 | 49.1 | 467 | 28.4 |
| 8 | AC, M-5 | 50,000 | 1886 | 100 | 358 | 19 | 948 | 50.3 | 580 | 30.8 |
| 9 | EDB M-1 | 300000 | 3625 | 100 | 682 | 18.8 | 1744 | 48.1 | 1199 | 33.1 |
| 10 | EDB M-2 | 200000 | 2818 | 100 | 444 | 15.8 | 1384 | 49.1 | 990 | 35.1 |
| 11 | RDB M-1 | 300000 | 4285 | 100 | 739 | 17.2 | 2091 | 48.8 | 1455 | 34 |
| 12 | RDB M-2 | 200000 | 2825 | 100 | 468 | 16.6 | 1380 | 48.8 | 977 | 34.6 |
| 13 | JRM | 50,000 | 2417 | 100 | 332 | 13.8 | 1220 | 50.5 | 865 | 35.8 |
| 14 | FRA | 88,000 | 2045 | 100 | 366 | 17.9 | 990 | 48.4 | 689 | 33.7 |
| 15 | 29A | 132,000 | 1963 | 100 | 384 | 19.6 | 935 | 47.6 | 644 | 32.8 |
| 16 | AC M-1 | 50,000 | 1326 | 100 | 412 | 31.1 | 659 | 49.7 | 255 | 19.2 |
| 17 | AC M-2 | 50,000 | 1848 | 100 | 376 | 20.3 | 977 | 52.9 | 495 | 26.8 |
| 18 | PR, M1 | 120,000 | 2892 | 100 | 570 | 19.7 | 1480 | 51.2 | 842 | 29.1 |
| | Total | 1890000 | 39286 | 100 | 7855 | 20 | 19405 | 49.4 | 12026 | 30.6 |

En la Figura 4.9 se presenta el balance final considerando todas las parcelas de maíz dentro del bloque en estudio. Del 100% de agua que entra como agua de riego, el 20% sale del sistema en forma de ETc ya considerando el agua aprovechada por la planta, el 49% corresponde al escurrimiento superficial del sistema de drenaje y el 31% del agua restante representa la infiltración eficaz. Comparando estos valores con los estimados para el trigo, se puede señalar que ambos balances hídricos son muy similares, variando ligeramente en la ETc y el escurrimiento superficial.

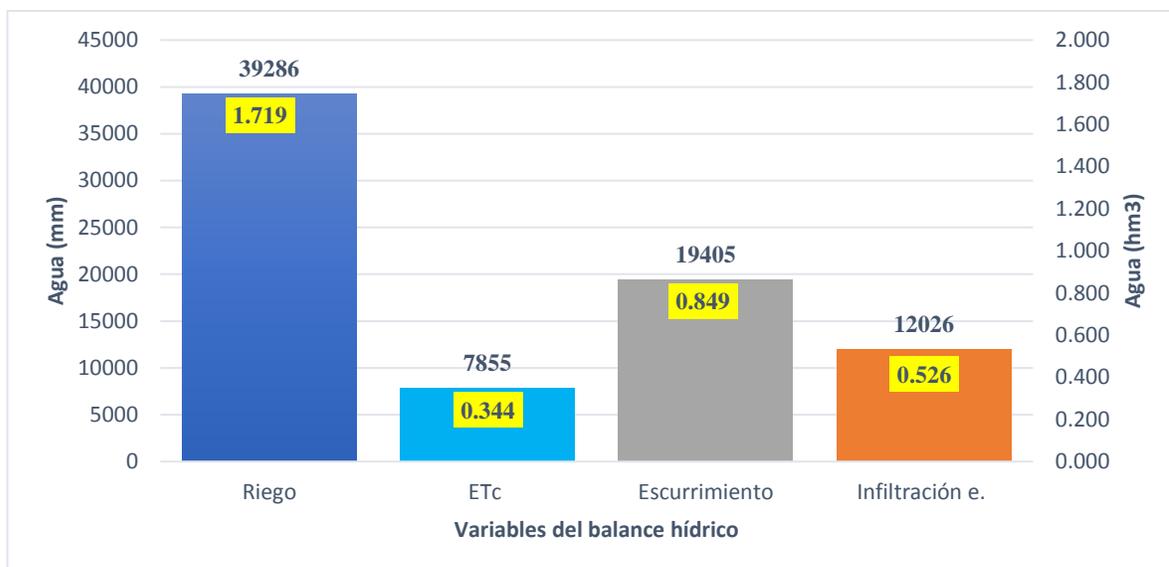


Figura 4.9 Balance hídrico total para el cultivo de maíz durante el ciclo octubre-2017 – mayo -2018

*En color amarillo se muestra la cantidad de agua en hm^3 y sobre las barras de datos el valor en mm de agua por ciclo para el cultivo de maíz.

4.2.5 Balance hídrico general del bloque en estudio (trigo y maíz)

Como resultado final se presenta el balance hídrico total del bloque TD-8, el cual se estimó sumando el realizado para el trigo y el maíz (Figura 4.10). La única entrada de agua considerada es el riego (100%) y una vez que esta agua entra al sistema, se distribuye en tres formas diferentes que son la ETc que representó un total del 20%, el transporte hacia la bahía por el sistema de drenaje como escurrimiento superficial que representan un 49% y la infiltración eficaz (recarga hacia el acuífero) con un valor del 31% con respecto al total de agua utilizada para riego. En conclusión, el mayor porcentaje de salida del agua se presenta en el escurrimiento superficial, por lo que es de esperarse que la mayor masa de nitrógeno derivado de la fertilización se vierte en la bahía y, en menor porcentaje, en el agua de infiltración eficaz.

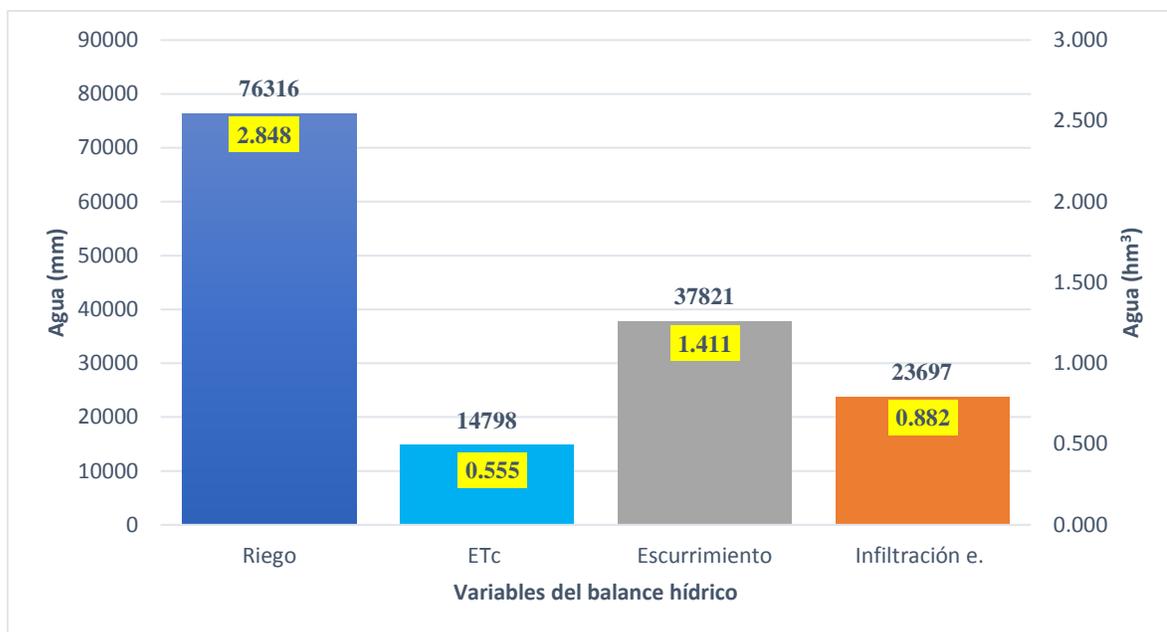


Figura 4.10 Balance hídrico total del bloque TD-8 (trigo y maíz)

*En el rectángulo de color amarillo se muestra el volumen de agua en hm^3 y sobre las barras de datos el valor en mm de agua por ciclo para el cultivo de maíz.

4.2.6 Balance hídrico en el área afluente al dren colector Arroyo 16

Asumiendo el bloque en estudio como un bloque representativo dentro del área de estudio y considerando las características del suelo de dicho bloque, se estimó el balance hídrico para cada uno de los 49 bloques que conforman el área afluente al dren colector Arroyo 16. Al igual que en el bloque afluente al TD-8, el balance se estimó por tipo de cultivo y por usuario. En la tabla 4.14 se muestra el resultado del balance y en la figura 4.11, de forma gráfica.

Tabla 4.14 Resultados del balance hídrico para el AR-16

| Cultivo | Superficie (ha) | Riego (hm^3) | ETc (hm^3) | Esc (hm^3) | Inf eficaz (hm^3) |
|--------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|-----------------------|
| Trigo | 6257 | 46.9 | 11.2 | 27.9 | 7.8 |
| Maíz | 3478 | 29.4 | 6.9 | 17.6 | 4.9 |
| TOTAL | 9735 | 76.3 | 18.1 | 45.5 | 12.7 |

Con base en los datos de esta tabla 4.14 (Figura 4.11), el riego estimado para esta área fue, aproximadamente, el 2.5% del volumen total de agua que se suministra a todo el distrito de riego durante un ciclo de cultivo, que es de 2,900 hm³ (DRRY, 2018). El valor del escurrimiento fue de 45.5 hm³ y la evapotranspiración del cultivo fue de 18 hm³, y en el caso de la infiltración eficaz el valor estimado fue de 12.7 hm³. Este valor representa la recarga potencial hacia el acuífero del Valle del Yaqui de lo que sería el área afluente al dren colector Arroyo 16, cuya extensión efectiva de cultivo durante el ciclo noviembre de 2017 a marzo de 2018 fue de 9,735 ha, de modo que, si se toma esta cifra y la de infiltración eficaz, se obtiene un valor de recarga potencial de $1.30 \cdot 10^{-3}$ hm³/ha

En el estudio de disponibilidad de CONAGUA (2018) se estima una recarga proveniente del riego en el DR041 de 346.5 hm³. Si el valor estimado de infiltración eficaz en esta investigación ($1.30 \cdot 10^{-3}$ hm³/ha) se multiplica por la extensión total del DR041 (233,000 ha) se obtiene un valor de 303.96 hm³, valor que es relativamente congruente con respecto a este dato reportado.

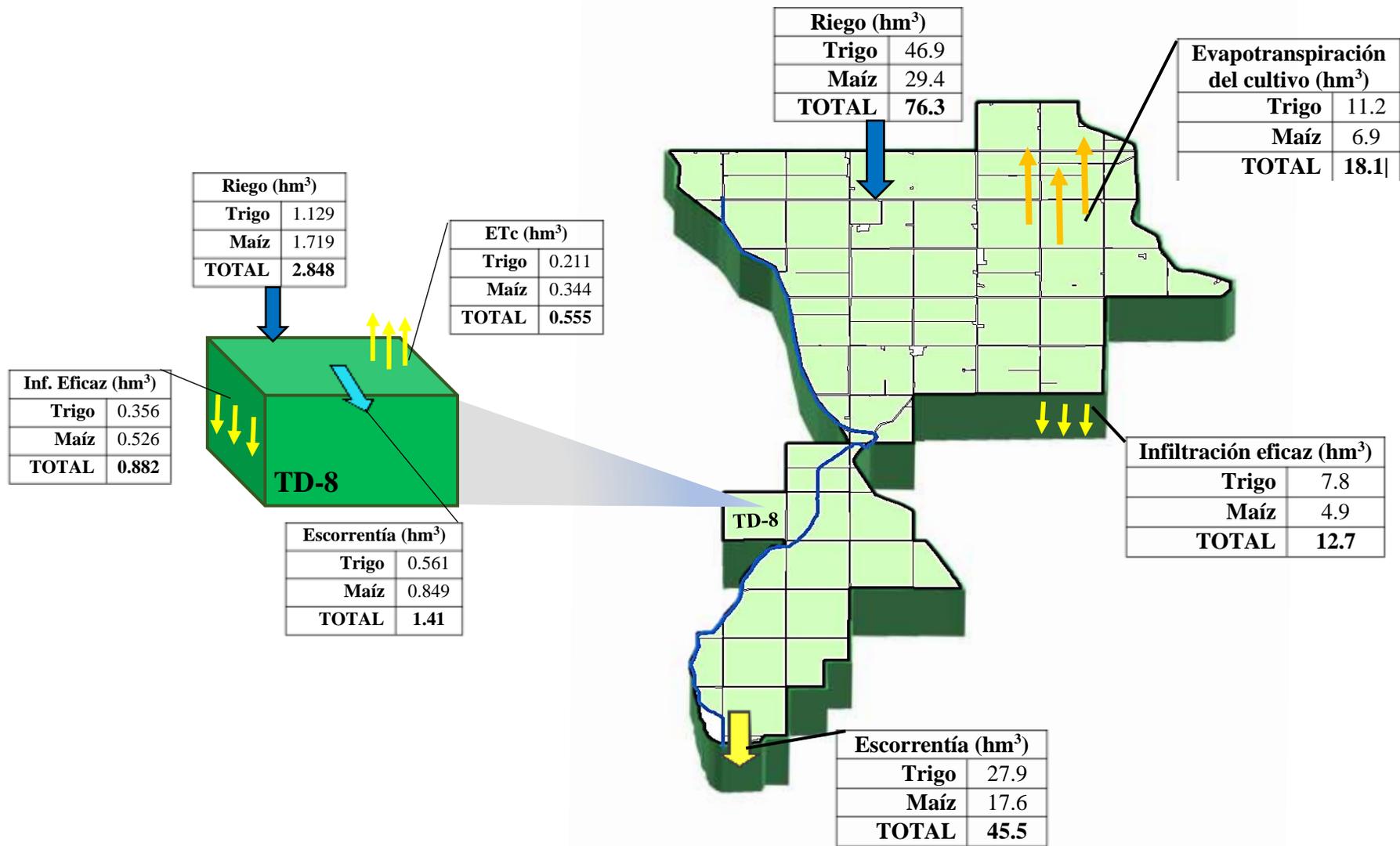


Figura 4.11 Representación gráfica del balance hídrico en el boque TD-8 y en el área afluente al AR-16

4.2.7 Eficiencia de riego (Eap)

Se ha estimado la eficiencia de riego por parcela y por cada riego aplicado durante el ciclo de cultivo de trigo, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.15. Se observa un porcentaje de eficiencia de aplicación muy bajo durante el primer riego, esto debido a que se trata del riego de pre-siembra en el cual los agricultores deben aplicar un sobre riego debido a que existe un problema de salinización de suelos; sin embargo, durante los riegos posteriores el porcentaje de eficiencia aumenta y llega incluso a colocarse dentro del rango de eficiencia entre el 40% y 70%, propuesto por Pereira *et al.* (2004).

Una vez estimada la eficiencia por cada riego parcelario, se ha estimado el promedio por parcela y dichos porcentajes se muestran en la Tabla 4.16. Al promediar la estimación de la eficiencia de riego, se obtuvieron porcentajes bajos de eficiencia que son resultado de la interferencia del primer riego que presenta un porcentaje muy bajo. Además, la diferencia entre los porcentajes puede estar también en función de las prácticas agrícolas de cada uno de los agricultores ya que, de acuerdo con las características de sus parcelas, suministran diferentes cantidades de agua. Todo ello da lugar a que se pueden obtener porcentajes de eficiencia muy bajos de 11% a 19% y otros más elevados, que oscilan del 25% al 29%.

Tabla 4.15 Eficiencia de aplicación de riego para la parcela de trigo AC-1

| ID | Prof. de raíz (cm) | Fecha | Riego (mm) | ETc (mm) | Eap (%) |
|-----------|---------------------------|--------------|-------------------|-----------------|----------------|
| TD8 P2-20 | 20 | 30/11/2017 | 143 | 28 | 19 |
| TD8 P2-20 | 20 | 03/02/2018 | 173 | 39 | 23 |
| TD8 P2-20 | 20 | 04/02/2018 | 139 | 38 | 28 |
| TD8 P2-40 | 40 | 03/03/2018 | 139 | 56 | 40 |
| TD8 P2-40 | 40 | 26/03/2018 | 78 | 32 | 42 |
| TD8 P2-60 | 60 | 09/04/2018 | 72 | 30 | 42 |

*(Eap: eficiencia de riego)

De la misma forma que se ha estimado la eficiencia de aplicación de riego para el trigo, se ha estimado para el cultivo de maíz, obteniéndose la información de la Tabla 4.17. El porcentaje de eficiencia sigue el mismo patrón progresivo de incremento desde el primer riego hasta el último, en este caso se alcanzaron porcentajes de eficiencia mayores al 40% e incluso muy cercanos a 60%.

Tabla 4.16 Eficiencia de riego total para el cultivo de trigo.

| <i>NP</i> | <i>ID</i> | <i>Riego (mm)</i> | <i>ETc (mm)</i> | <i>Eap (%)</i> | <i>NP</i> | <i>ID</i> | <i>Riego (mm)</i> | <i>ETc (mm)</i> | <i>Eap (%)</i> |
|-----------|-----------|-------------------|-----------------|----------------|-----------|-----------|-------------------|-----------------|----------------|
| 1 | AC-1 | 743 | 223 | 32 | 13 | PR-1 | 1828 | 337 | 20 |
| 2 | AC-2 | 991 | 335 | 37 | 14 | PR-2 | 1899 | 461 | 25 |
| 3 | AC-3 | 972 | 182 | 19 | 15 | JM | 930 | 177 | 19 |
| 4 | AC-4 | 570 | 171 | 32 | 16 | CVG | 1445 | 327 | 24 |
| 5 | APH-1 | 1633 | 384 | 27 | 17 | MIB | 1048 | 283 | 29 |
| 6 | APH-2 | 1854 | 314 | 22 | 18 | RGS | 1164 | 227 | 22 |
| 7 | JLIG-1 | 2379 | 309 | 18 | 19 | JJS | 3640 | 387 | 11 |
| 8 | JLIG-2 | 2187 | 283 | 19 | 20 | GOT | 1332 | 304 | 26 |
| 9 | RM-1 | 2252 | 374 | 19 | 21 | OAP | 1681 | 338 | 23 |
| 10 | RM-2 | 1314 | 281 | 23 | 22 | ALS | 1553 | 295 | 24 |
| 11 | RM-3 | 1300 | 255 | 24 | 23 | MAL | 2076 | 369 | 19 |
| 12 | RM-4 | 1309 | 162 | 21 | 24 | JMV | 930 | 176 | 19 |

*(*Eap*: eficiencia de riego)

El promedio de eficiencia de aplicación estimado para las parcelas de maíz se presenta en la Tabla 4.18. A diferencia del trigo, en maíz la eficiencia de aplicación es mayor puesto que el valor más bajo resultante es del 19% y se logró estimar eficiencias mayores al 30%.

Cabe señalar que, aunque se presenten valores bajos de eficiencia en ambos cultivos, ello no es un indicador de que el riego es excedente desde el punto de vista agronómico ya que si se aplicara menor cantidad de agua no se podría obtener el efecto de lavados de suelos.

Tabla 4.17 Eficiencia de riego para una parcela de maíz (APH, M-1)

| <i>ID</i> | <i>Prof. de raíz (cm)</i> | <i>Fecha</i> | <i>Riego (mm)</i> | <i>ETc (mm)</i> | <i>Eap (%)</i> |
|------------------|---------------------------|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| <i>TD8 P2-20</i> | 20 | 22/11/2017 | 130 | 21 | 16 |
| <i>TD8 P2-20</i> | 20 | 23/11/2017 | 259 | 21 | 8 |
| <i>TD8 P2-20</i> | 20 | 24/01/2018 | 162 | 37 | 23 |
| <i>TD8 P2-20</i> | 20 | 24/01/2018 | 76 | 37 | 49 |
| <i>TD8 P2-40</i> | 40 | 25/01/2018 | 108 | 38 | 36 |
| <i>TD8 P2-40</i> | 40 | 24/02/2018 | 121 | 51 | 42 |
| <i>TD8 P2-40</i> | 40 | 21/03/2018 | 140 | 46 | 33 |
| <i>TD8 P2-60</i> | 60 | 11/04/2018 | 115 | 34 | 30 |
| <i>TD8 P2-60</i> | 60 | 01/05/2018 | 69 | 39 | 56 |

*(*Eap*: eficiencia de riego)

Tabla 4.18 Eficiencia de riego para el cultivo de maíz

| <i>NP</i> | <i>ID</i> | <i>Riego (mm)</i> | <i>ETc (mm)</i> | <i>Eap (%)</i> |
|-----------|-----------|-------------------|-----------------|----------------|
| 1 | APH, M-1 | 1180 | 326 | 33 |
| 2 | APH, M-2 | 1598 | 415 | 28 |
| 3 | APH, M-3 | 1717 | 385 | 24 |
| 4 | APH, M-4 | 1644 | 431 | 31 |
| 5 | APH, M-5 | 1391 | 301 | 23 |
| 6 | AC, M-3 | 2182 | 498 | 31 |
| 7 | AC, M-4 | 1644 | 366 | 27 |
| 8 | AC, M-5 | 1886 | 356 | 26 |
| 9 | EDB M-1 | 3625 | 682 | 22 |
| 10 | EDB M-2 | 2818 | 444 | 20 |
| 11 | RDB M-1 | 4285 | 739 | 20 |
| 12 | RDB M-2 | 2825 | 468 | 19 |
| 13 | JRM | 2417 | 333 | 24 |
| 14 | FRA | 2045 | 366 | 21 |
| 15 | 29A | 1963 | 385 | 22 |
| 16 | AC M-1 | 1326 | 413 | 32 |
| 17 | AC M-2 | 1848 | 376 | 28 |
| 18 | PR, M1 | 2892 | 570 | 23 |

4.3 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE AGUA

Con la finalidad de recolectar las muestras de agua necesarias para realizar la caracterización fisicoquímica de la misma, en el epígrafe 3.3 de materiales y métodos se detalla la red de muestreo que se estableció en la investigación previa de González-Pérez, (2018). Dicha red se utilizó para la elaboración de esta tesis.

Cuando se analiza una muestra de agua para las principales especies iónicas se puede realizar una de las pruebas de validación más importantes: el equilibrio catiónico-aniónico, el cual se estima como error de balance o de electroneutralidad. Los datos de error de balance iónico obtenido para las muestras recolectadas en las dos campañas de muestreo realizadas se presentan en la Tabla 4.19, donde se comprueba que los errores están por debajo del valor límite del $\pm 5\%$.

En la Tabla 4.20 se detallan los resultados obtenidos de los parámetros de campo para el muestreo de noviembre de 2017 y en la Tabla 4.21 para el muestreo de marzo de 2018.

Tabla 4.19 Cálculo del Error de Balance Iónico (noviembre, 2017 y marzo, 2018)

| <i>Noviembre de 2017</i> | | | | <i>Marzo de 2018</i> | | | |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|------------|
| <i>Muestra</i> | Σ Cationes (mEq) | Σ Aniones (mEq) | % Error | <i>Muestra</i> | Σ Cationes (mEq) | Σ Aniones (mEq) | % Error |
| <i>C. Bajo</i> | 2.7042 | 2.9103 | -3.67 | <i>C. Bajo</i> | 2.8983 | 3.166 | -4.41 |
| <i>C. Alto</i> | 2.5713 | 2.5609 | 0.20 | <i>C. Alto</i> | 2.8241 | 3.1288 | -5.12 |
| <i>AR16-1</i> | 4.7244 | 4.7124 | 0.13 | <i>AR16-1</i> | 6.9461 | 7.643 | -4.78 |
| <i>TD-2</i> | 4.557 | 4.3613 | 2.19 | <i>TD-2</i> | 5.9541 | 5.8684 | 0.72 |
| <i>AR16-3</i> | 6.4118 | 7.1379 | -5.36 | <i>AR16-3</i> | 6.3555 | 6.4083 | -0.41 |
| <i>TD-4</i> | 8.2017 | 7.8516 | 2.18 | <i>TD-4</i> | 8.0702 | 7.7703 | 1.89 |
| <i>AR16-5</i> | 7.9191 | 8.8953 | -5.81 | <i>AR16-5</i> | 7.1636 | 8.2588 | -7.10 |
| <i>TD-6</i> | 8.3488 | 9.4348 | -6.11 | <i>TD-6</i> | 7.5457 | 6.931 | 4.25 |
| <i>AR16-7</i> | 8.476 | 9.3011 | -4.64 | <i>AR16-7</i> | 9.3168 | 10.078 | -3.92 |
| <i>TD-8</i> | 7.7026 | 8.4612 | -4.69 | <i>TD-8</i> | 10.267 | 10.607 | -1.63 |
| <i>AR16-9</i> | 9.2395 | 10.296 | -5.41 | <i>AR16-9</i> | 9.0996 | 10.041 | -4.92 |
| <i>TD-10</i> | 16.945 | 18.982 | -5.67 | <i>TD-10</i> | 13.278 | 14.733 | -5.19 |
| <i>AR16-11</i> | 11.149 | 11.78 | -2.75 | <i>AR16-11</i> | 10.172 | 11.459 | -5.95 |
| <i>TD-12</i> | 26.174 | 28.497 | -4.25 | <i>TD-12</i> | 16.132 | 16.927 | -2.40 |
| <i>AR16-13</i> | 12.597 | 13.592 | -3.80 | <i>AR16-13</i> | 15.91 | 17.926 | -5.96 |
| <i>TD-14</i> | 29.377 | 25.114 | 7.82 | <i>TD-14</i> | 41.852 | 47.385 | -6.20 |
| <i>AR16-15</i> | 19.117 | 20.467 | -3.41 | <i>AR16-15</i> | 18.049 | 17.668 | 1.07 |
| <i>P. Teras</i> | 13.482 | 14.292 | -4.22 | <i>P. Teras</i> | 17.969 | 18.762 | -2.16 |
| <i>P. QTCA</i> | 6.1135 | 6.4052 | -2.33 | <i>P. QTCA</i> | 7.0289 | 6.7861 | 1.76 |
| <i>B-P6</i> | 459.77 | 552.32 | -2.92 | <i>B-P6</i> | 537.65 | 513.57 | 2.29 |
| <i>B-P7</i> | 432.44 | 505.81 | -9.14 | <i>B-P7</i> | 605.9 | 543.19 | 5.46 |

Tabla 4.20 Datos de campo de la campaña de muestreo de noviembre, 2017.

| ID | Nombre | pH | ORP | OD | Salinidad | C.E. | SDT | T | Alcalinidad |
|----|------------|-----|-------|------|-----------|-------|------|------|---------------------------|
| | | - | mV | mg/L | psu | µs/cm | mg/L | °C | mg/L CaCO ₃ |
| 1 | Canal Bajo | 7.7 | 634.6 | 5.7 | 0.2 | 497 | 249 | 23.9 | 104 |
| 2 | Canal Alto | 7.8 | 652.3 | 6.0 | 0.3 | 529 | 264 | 23.9 | 108 |
| 3 | AR16-1 | 8.7 | 103 | 7.5 | 0.5 | 1034 | 517 | 26.5 | 136 |
| 4 | TD-2 | 8.3 | 114.8 | 5.0 | 0.4 | 849 | 425 | 27.5 | 124 |
| 5 | AR16-3 | 8.0 | 62.9 | 3.5 | 0.7 | 1416 | 709 | 24.3 | 156 |
| 6 | TD-4 | 8.2 | 109.5 | 7.9 | 0.9 | 1555 | 861 | 19.9 | 128 |
| 7 | AR16-5 | 7.9 | 99.1 | 4.0 | 0.9 | 1735 | 868 | 21.2 | 208 |
| 8 | TD-6 | 8.2 | 129 | 6.2 | 0.9 | 1798 | 900 | 22.5 | 154 |
| 9 | AR16-7 | 8.0 | 92.5 | 4.2 | 0.9 | 1844 | 922 | 22.9 | 172 |
| 10 | TD-8 | 9.2 | 51.9 | 5.2 | 0.8 | 1495 | 747 | 23.7 | 196 |
| 11 | AR16-9 | 8.2 | 80.5 | 6.0 | 1.0 | 2040 | 1020 | 25.1 | 180 |
| 12 | TD-10 | 8.6 | 104 | 5.3 | 2.1 | 3924 | 1964 | 26.8 | 292 |
| 13 | AR16-11 | 8.2 | 116.1 | 6.2 | 1.3 | 2432 | 1217 | 25.1 | 190 |
| 14 | TD-12 | 8.7 | 71 | 8.6 | 3.2 | 5879 | 2940 | 21.9 | 240 |
| 15 | AR16-13 | 8.2 | 90.8 | 6.3 | 1.46 | 2804 | 1400 | 21.4 | 172 |
| 16 | TD-14 | 8.5 | 56.3 | 6.4 | 6.76 | 11890 | 5945 | 27.7 | 196 |
| 17 | AR16-15 | 8.2 | 52.4 | 5.7 | 2.43 | 4557 | 2278 | 25.3 | 204 |
| 18 | P. QTC | 8.6 | 109.4 | 3.4 | 1362 | 1362 | 861 | 40.1 | 88 |
| 19 | P. Teras | 8.3 | 611.6 | 5.4 | 2950 | 2950 | 1476 | 33.8 | 116 |
| 20 | Bahía-P6 | 8.3 | 32.1 | 17.8 | 28.80 | 44578 | sd | 25.5 | 156 |
| 21 | Bahía-P7 | 8.4 | 33.3 | 18.6 | 28.31 | 43910 | sd | 25.5 | 76 |

Tabla 4.21 Datos de campo de la campaña de muestreo de marzo, 2018.

| ID | Nombre | pH | ORP | OD | Salinidad | C.E. | SDT | T | Alcalinidad |
|----|------------|-----|-------|------|-----------|-------|---------|------|---------------------------|
| | | - | mV | mg/L | psu | µs/cm | mg/L | °C | mg/L CaCO ₃ |
| 1 | Canal Bajo | 7.8 | 646.4 | 8.7 | 0.3 | 514.0 | 257.0 | 19.2 | 110 |
| 2 | Canal Alto | 7.3 | 639.0 | 8.9 | 0.3 | 518 | 258.0 | 20.6 | 100 |
| 3 | AR16-1 | 8.4 | 80.3 | 10.7 | 0.7 | 1305 | 652.0 | 24.7 | 136 |
| 4 | TD-2 | 8.3 | 81.5 | 8.7 | 0.6 | 1291 | 645.0 | 23.5 | 124 |
| 5 | AR16-3 | 7.4 | 63.0 | 9.7 | 0.7 | 1334 | 667.0 | 23.7 | 156 |
| 6 | TD-4 | 7.4 | 163.3 | 17.6 | 0.8 | 1540 | 770.0 | 28.5 | 128 |
| 7 | AR16-5 | 8.3 | 198.0 | 7.2 | 0.7 | 1486 | 744.0 | 25.8 | 208 |
| 8 | TD-6 | 8.1 | 165.2 | 7.8 | 1.3 | 2530 | 1265.0 | 25.5 | 154 |
| 9 | AR16-7 | 8.1 | 180.9 | 6.6 | 1.0 | 1894 | 946.0 | 24.7 | 172 |
| 10 | TD-8 | 8.5 | 250.7 | 9.4 | 1.0 | 1880 | 941.0 | 20.8 | 196 |
| 11 | AR16-9 | 8.4 | 255.2 | 9.5 | 0.9 | 1835 | 916.0 | 18.8 | 180 |
| 12 | TD-10 | 8.9 | 186.1 | 9.5 | 1.5 | 2804 | 1402.0 | 21.2 | 292 |
| 13 | AR16-11 | 8.6 | 185.4 | 8.8 | 1.1 | 2067 | 1034.0 | 19.7 | 190 |
| 14 | TD-12 | 9.6 | 110.6 | 13.5 | 1.2 | 2287 | 1145.0 | 23.4 | 240 |
| 15 | AR16-13 | 8.6 | 134.5 | 9.9 | 1.2 | 2315 | 1157.0 | 21.4 | 172 |
| 16 | TD-14 | 8.8 | 195.1 | 11.5 | 4.9 | 8733 | 4383.0 | 27.6 | 196 |
| 17 | AR16-15 | 8.7 | 163.1 | 10.0 | 2.0 | 3819 | 1909.0 | 24.5 | 204 |
| 18 | P. QTC | 8.5 | 84.0 | 5.5 | 0.7 | 1423 | 711.0 | 39.6 | 92 |
| 19 | P. Teras | sd | 635.3 | 9.3 | 2.0 | 3898 | 1948.0 | 32.8 | 132 |
| 20 | Bahía-P6 | 8.5 | 215.6 | 4.8 | sd | 43521 | sd | 21.3 | 156 |
| 21 | Bahía-P7 | 7.9 | 211.2 | 5.1 | 29.2 | 42605 | 29250.0 | 19.4 | 76 |

Los resultados obtenidos de la determinación de los parámetros en laboratorios se presentan en las tablas 4.22 y 4.23, correspondientes a las dos campañas de muestreo realizadas.

Tabla 4.22 Cationes y aniones mayoritarios de las muestras de agua, noviembre de 2017

| ID | Nombre | Cationes [mg/L] | | | | | | | Aniones [mg/L] | | | | |
|----|------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | P | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | NO ₂ ⁻ | PO ₄ ³⁻ | SO ₄ ²⁻ |
| 1 | Canal Bajo | 26.7 | 7.1 | 16.2 | 3.2 | 0.1 | 133.0 | 1.0 | 7.2 | 2.2 | <l.c. | <l.c. | 22.0 |
| 2 | Canal Alto | 25.8 | 6.9 | 14.7 | 3.1 | 0.0 | 120.0 | 0.6 | 4.3 | 1.0 | <l.c. | <l.c. | 19.6 |
| 3 | AR16-1 | 36.4 | 8.2 | 48.8 | 4.4 | 0.1 | 158.0 | 3.9 | 34.0 | 9.5 | <l.c. | <l.c. | 42.0 |
| 4 | TD-2 | 37.8 | 7.1 | 43.3 | 7.8 | 0.6 | 148.5 | 1.4 | 38.7 | 6.0 | 0.5 | 1.2 | 32.7 |
| 5 | AR16-3 | 42.3 | 11.4 | 72.1 | 9.0 | 1.0 | 158.3 | 1.0 | 84.5 | 8.8 | 0.3 | 1.7 | 95.0 |
| 6 | TD-4 | 71.8 | 18.4 | 68.0 | 5.8 | 0.1 | 153.6 | 1.3 | 123.5 | 8.7 | <l.c. | <l.c. | 80.1 |
| 7 | AR16-5 | 51.3 | 14.4 | 90.7 | 9.0 | 0.8 | 188.3 | 1.1 | 129.5 | 6.9 | <l.c. | 1.2 | 96.5 |
| 8 | TD-6 | 51.5 | 17.1 | 96.3 | 7.1 | 0.2 | 185.2 | 1.3 | 129.1 | 23.0 | <l.c. | <l.c. | 112.4 |
| 9 | AR16-7 | 52.7 | 16.2 | 99.2 | 7.7 | 0.6 | 207.8 | 1.0 | 123.3 | 19.8 | <l.c. | 0.8 | 99.1 |
| 10 | TD-8 | 47.3 | 12.0 | 92.8 | 12.5 | 0.3 | 206.3 | 16.1 | 88.3 | 30.7 | 0.6 | <l.c. | 73.3 |
| 11 | AR16-9 | 51.7 | 17.1 | 116.2 | 7.7 | 0.5 | 216.0 | 1.8 | 142.1 | 13.5 | <l.c. | 0.7 | 118.6 |
| 12 | TD-10 | 63.8 | 26.8 | 261.8 | 6.6 | 0.3 | 343.7 | 6.2 | 280.7 | 24.7 | 0.9 | <l.c. | 230.7 |
| 13 | AR16-11 | 53.6 | 19.2 | 153.8 | 8.1 | 0.4 | 228.0 | 1.9 | 162.1 | 33.8 | <l.c. | <l.c. | 137.4 |
| 14 | TD-12 | 106.3 | 49.8 | 380.5 | 8.6 | 0.1 | 280.3 | 6.2 | 454.5 | 28.8 | <l.c. | <l.c. | 499.9 |
| 15 | AR16-13 | 54.3 | 21.0 | 183.8 | 6.3 | 0.4 | 206.6 | 1.6 | 216.1 | 19.5 | <l.c. | <l.c. | 179.6 |
| 16 | TD-14 | 123.7 | 82.6 | 373.5 | 6.1 | 0.1 | 231.8 | 3.6 | 344.3 | 19.8 | <l.c. | <l.c. | 536.0 |
| 17 | AR16-15 | 70.1 | 33.3 | 291.8 | 7.5 | 0.4 | 245.2 | 1.8 | 462.2 | 24.3 | <l.c. | <l.c. | 142.0 |
| 18 | P. QTC | 12.9 | 0.8 | 122.7 | 2.4 | <l.c. | 103.7 | 1.8 | 146.5 | 8.7 | <l.c. | <l.c. | 20.0 |
| 19 | P. Teras | 120.4 | 31.5 | 110.6 | 2.7 | <l.c. | 138.6 | 1.5 | 335.5 | 6.0 | <l.c. | <l.c. | 130.4 |
| 20 | Bahía-P6 | 334.1 | 1036.4 | 8062.2 | 278.5 | 0.2 | 186.9 | 1.7 | 17043.0 | <l.c. | <l.c. | <l.c. | 3283.6 |
| 21 | Bahía-P7 | 314.8 | 981.3 | 7569.8 | 262.6 | 0.1 | 90.2 | 1.2 | 16042.5 | <l.c. | <l.c. | <l.c. | 2486.3 |
| | l.c. | 0.109 | 0.002 | 0.057 | 0.581 | 0.023 | s.d | s.d | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 0.25 |

Tabla 4.23 Concentración de cationes y aniones mayoritarios de las muestras de agua recolectadas en el área de estudio marzo 2018.

| ID | Nombre | Cationes [mg/L] | | | | | | Aniones [mg/L] | | | | | |
|----|------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | P-Tot | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | NO ₂ ⁻ | PO ₄ ³⁻ | SO ₄ ²⁻ |
| 1 | Canal Bajo | 30.2 | 6.8 | 17.1 | 3.5 | <l.c. | 156.6 | 1.0 | 4.4 | 1.1 | <l.c. | <l.c. | 21.0 |
| 2 | Canal Alto | 29.8 | 6.8 | 15.9 | 3.4 | <l.c. | 139.8 | 3.2 | 9.5 | 0.8 | <l.c. | <l.c. | 21.5 |
| 3 | AR16-1 | 52.4 | 10.6 | 76.3 | 5.4 | 0.2 | 158.0 | 1.9 | 104.2 | 31.5 | <l.c. | <l.c. | 73.5 |
| 4 | TD-2 | 42.2 | 9.4 | 62.6 | 13.9 | 1.2 | 148.5 | 2.5 | 60.2 | 26.5 | 8.0 | 2.2 | 50.1 |
| 5 | AR16-3 | 47.1 | 10.5 | 63.4 | 15.1 | 1.7 | 188.4 | 0.3 | 62.7 | 24.8 | 2.9 | 2.7 | 51.4 |
| 6 | TD-4 | 48.8 | 15.8 | 96.0 | 6.1 | 0.1 | 153.6 | 0.1 | 116.2 | 7.7 | 0.1 | <l.c. | 88.0 |
| 7 | AR16-5 | 47.0 | 10.9 | 84.3 | 10.1 | 0.7 | 251.6 | 1.8 | 84.5 | 18.2 | 4.8 | 1.2 | 61.6 |
| 8 | TD-6 | 46.4 | 17.9 | 81.6 | 8.1 | 0.2 | 185.2 | 1.0 | 71.5 | 23.0 | 2.9 | <l.c. | 67.1 |
| 9 | AR16-7 | 54.7 | 15.9 | 116.3 | 8.8 | 0.6 | 207.8 | 1.6 | 141.5 | 21.1 | 0.8 | 0.8 | 108.4 |
| 10 | TD-8 | 73.1 | 24.9 | 101.7 | 5.8 | 0.1 | 206.3 | 3.2 | 145.7 | 11.4 | 0.1 | <l.c. | 135.0 |
| 11 | AR16-9 | 57.2 | 17.1 | 106.9 | 7.3 | 0.4 | 216.0 | 2.6 | 136.0 | 17.6 | 2.6 | <l.c. | 107.1 |
| 12 | TD-10 | 57.2 | 24.3 | 189.4 | 7.2 | 0.2 | 343.7 | 8.4 | 204.9 | 22.7 | <l.c. | <l.c. | 127.8 |
| 13 | AR16-11 | 57.0 | 18.3 | 129.6 | 7.2 | 0.4 | 228.0 | 4.0 | 154.8 | 24.7 | 9.8 | <l.c. | 125.4 |
| 14 | TD-12 | 57.3 | 23.1 | 258.0 | 5.7 | 0.1 | 280.3 | 7.7 | 224.2 | 12.9 | 3.4 | <l.c. | 262.8 |
| 15 | AR16-13 | 56.1 | 19.6 | 260.1 | 7.2 | 0.4 | 206.6 | 3.8 | 213.0 | 206.4 | <l.c. | <l.c. | 243.9 |
| 16 | TD-14 | 119.2 | 81.2 | 667.7 | 7.2 | 0.2 | 231.8 | 5.5 | 1179.2 | 16.1 | <l.c. | <l.c. | 474.6 |
| 17 | AR16-15 | 66.8 | 30.6 | 276.3 | 7.2 | 0.5 | 245.2 | 4.5 | 239.4 | 35.7 | <l.c. | <l.c. | 296.4 |
| 18 | P. QTC | 16.2 | 1.3 | 136.6 | 2.8 | 0.1 | 108.4 | 1.9 | 157.8 | 8.1 | <l.c. | <l.c. | 24.3 |
| 19 | P. Teras | 184.2 | 30.0 | 130.9 | 1.2 | 0.0 | 156.2 | 2.4 | 485.4 | 7.5 | <l.c. | <l.c. | 173.1 |
| 20 | Bahía-P6 | 229.9 | 575.5 | 10886.0 | 203.6 | 0.4 | 186.9 | 1.9 | 16219.0 | <l.c. | <l.c. | <l.c. | 2544.0 |
| 21 | Bahía-P7 | 259.6 | 647.2 | 12268.0 | 236.8 | 1.0 | 90.2 | 2.4 | 17416.0 | <l.c. | <l.c. | <l.c. | 2420.0 |
| | l.c. | 0.10 | 0.67 | 0.11 | 0.26 | 0.04 | s.d | s.d | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.50 | 0.25 |

De acuerdo con el contenido de iones presentes en las muestras agua, éstas se pueden clasificar a partir de la interpretación del diagrama de Piper. En la Figura 4.12 se presenta el diagrama de Piper para la clasificación de las aguas por familia correspondiente al muestreo de noviembre de 2017. En este diagrama se observa que las muestras de agua se pueden asociar en 4 grupos:

- ✓ Las muestras de los canales de riego (cuyo origen son aguas superficiales y son las muestras del cabal bajo y canal alto) se clasifican como bicarbonatadas cálcicas.
- ✓ Las muestras de agua del dren y sus tributarios se clasificaron en cuatro familias de la siguiente forma: Familia bicarbonatada sódica (AR16-1, TD-2, AR16-3 y TD-8; Familia clorurada cálcica (TD-4); Familia clorurada sódica (AR16-5, TD-6, AR16-7, AR16-9, TD-10 y AR16-11); y como aguas mixtas con clasificación clorurada + sulfatada sódica (TD-12 y TD-14).
- ✓ Las muestras de los pozos Quetchehueca y Teras, su familia es clorurada cálcica.
- ✓ El agua de la bahía se encuentra dentro de la familia de clorurada sódica.

En este mismo diagrama de Piper, se muestra un comportamiento evolutivo con respecto a la concentración de elementos químicos desde aguas arriba (primer punto de muestreo del dren y tributarios) hasta la bahía, variando las aguas desde bicarbonatadas sódicas hasta cloruradas cálcicas.

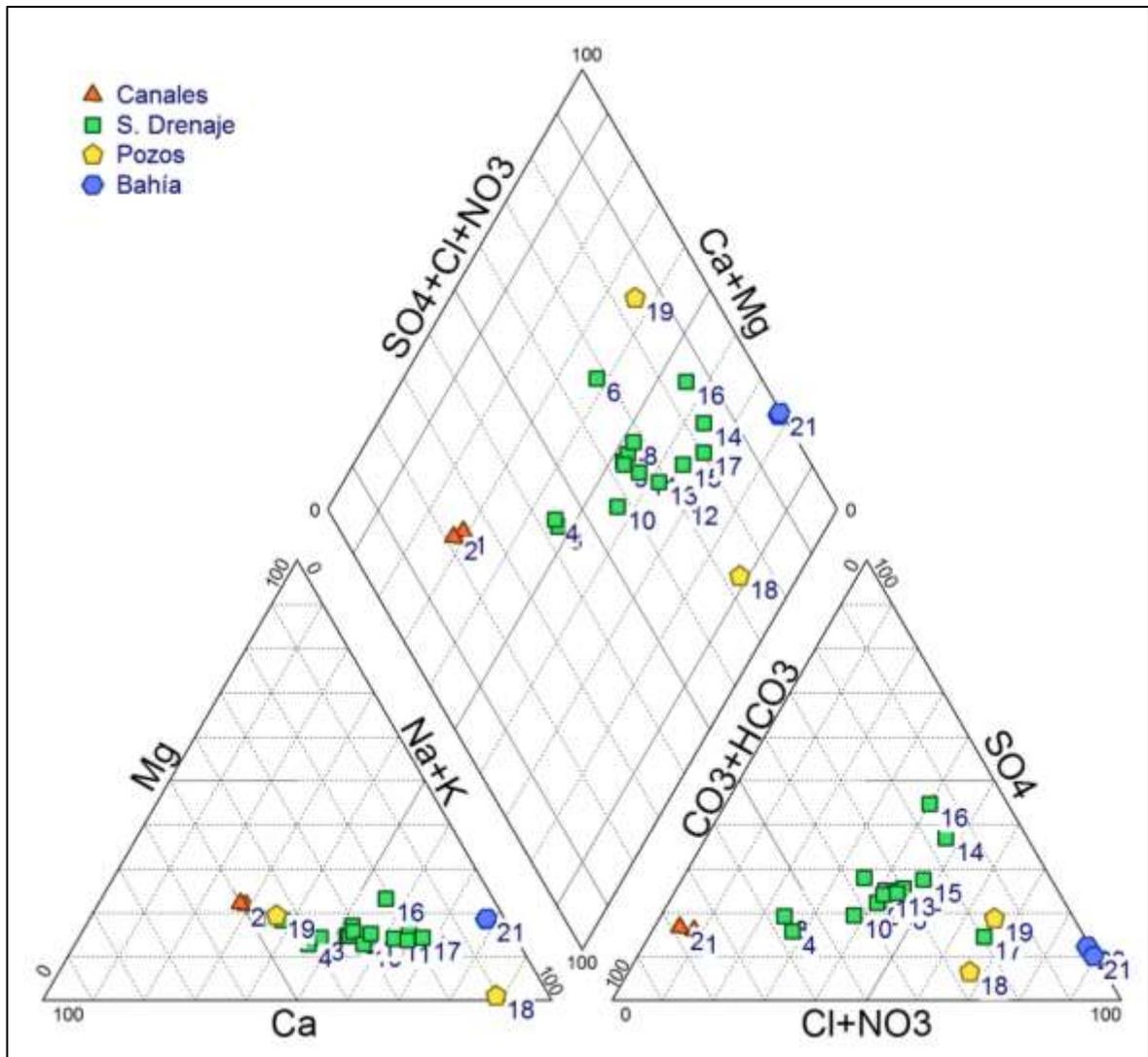


Figura 4.12 Diagrama de Piper correspondiente a las muestras de noviembre, 2017

En el caso del muestreo efectuado en marzo de 2018, los resultados de la clasificación de las muestras de agua se pueden apreciar en la Figura 4.13. Se identifican las siguientes familias de agua:

- ✓ Las muestras de los canales de riego (canal alto y canal bajo) se clasifican como aguas bicarbonatadas cálcicas.
- ✓ Las muestras de agua del dren AR-16 y sus tributarios son de las familias: bicarbonatada sódica (TD-2, AR16-3, AR16-5, TD-6 Y SR16-9), clorurada sódica (AR16-1, TD-4, AR16-7, TD-8 y AR16-11) y con clasificación de aguas mixtas clorurada + bicarbonatada sódica (TD-10) y clorurada + sulfatada sódica (TD-12, AR16-13, TD-14 y AR16-15).

- ✓ En las muestras de pozos de agua, al igual que en el muestreo de marzo 2017, los pozos Quetchehueca y Teras pertenecen a una familia clorurada cálcica.
- ✓ El agua de la bahía se encuentra dentro de la familia de cloruradas sódicas.

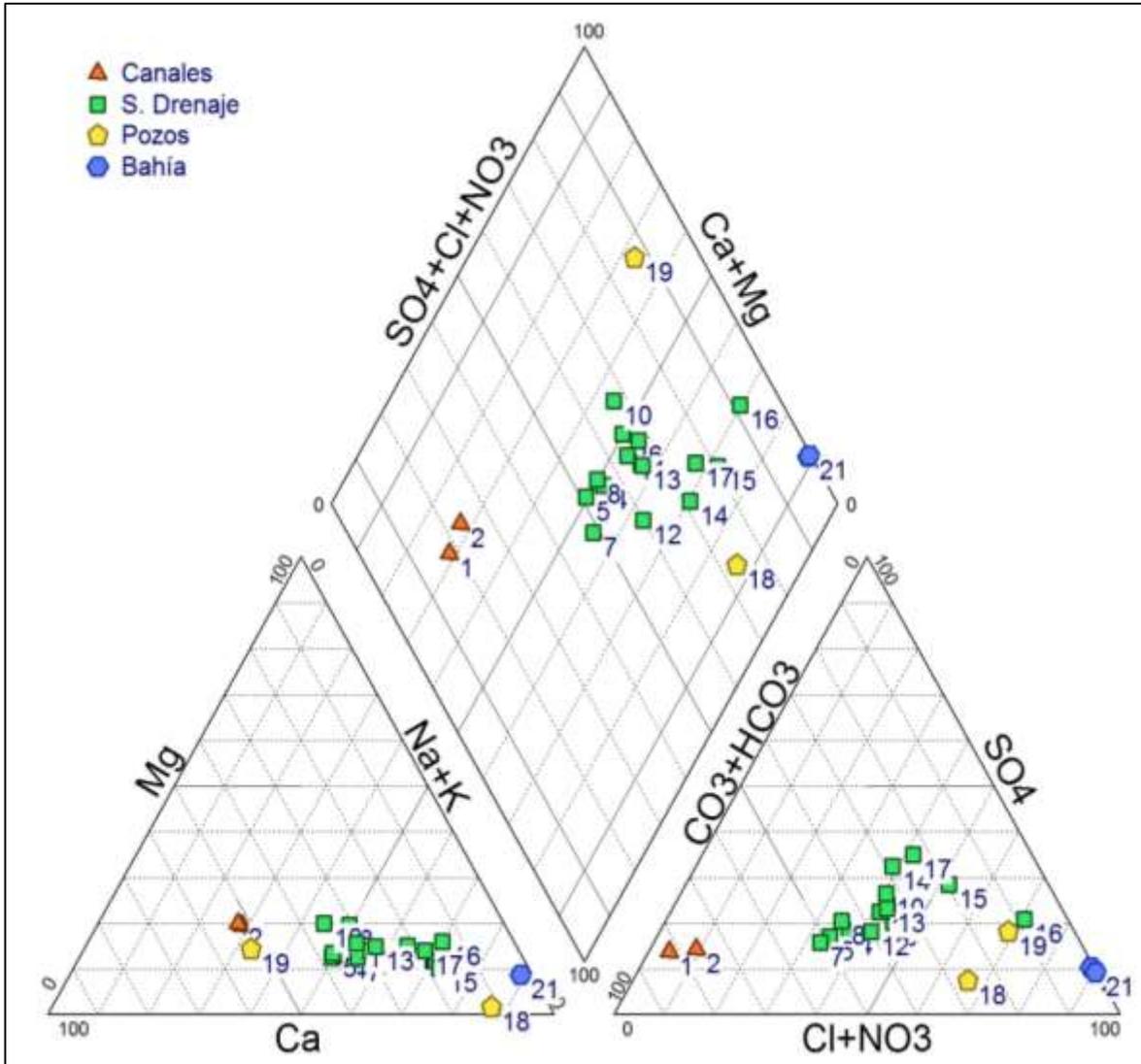


Figura 4.13 Diagrama de Piper correspondiente a las muestras de marzo, 2018

En la Figura 4.14 se muestra el diagrama de Stiff para el agua de riego (canales y pozos) de la campaña de muestreo de noviembre 2017, en la cual se observa la baja concentración iónica para los canales (agua superficial) mientras que en los pozos existe una concentración mayor principalmente de cloruros, debido a que el agua se encuentra en contacto con formaciones geológicas y puede adquirir con el tiempo una mayor concentración de elementos. Hay que tener en cuenta que el agua de ambos pozos se puede considerar como termal (temperaturas entre 40 y 32°C) ya que superan con creces el valor de la temperatura media ambiental (22°C) y, por lo tanto, es posible señalar la existencia de un flujo de agua subterránea profundo y de largo tiempo de residencia (flujo regional) y que también explicaría el elevado contenido salino de estas aguas subterráneas (Epígrafe 2.6). Por otro lado, teniendo en cuenta que estos pozos tienen profundidades entre 100 y 150 metros, el nivel acuífero que explotan suele contener arcillas limosas que pueden favorecer el intercambio catiónico con el agua subterránea (Rangel-Medida *et al.*, 2013).

En la figura 4.15 se presenta el diagrama de Stiff para la campaña de muestreo de noviembre de 2017, donde se observa claramente la evolución en el aumento de concentración de iones en el agua de drenaje y también se puede notar cuáles son los tributarios con mayor concentración de iones (TD-10, TD-12 y TD-14).

Stiff

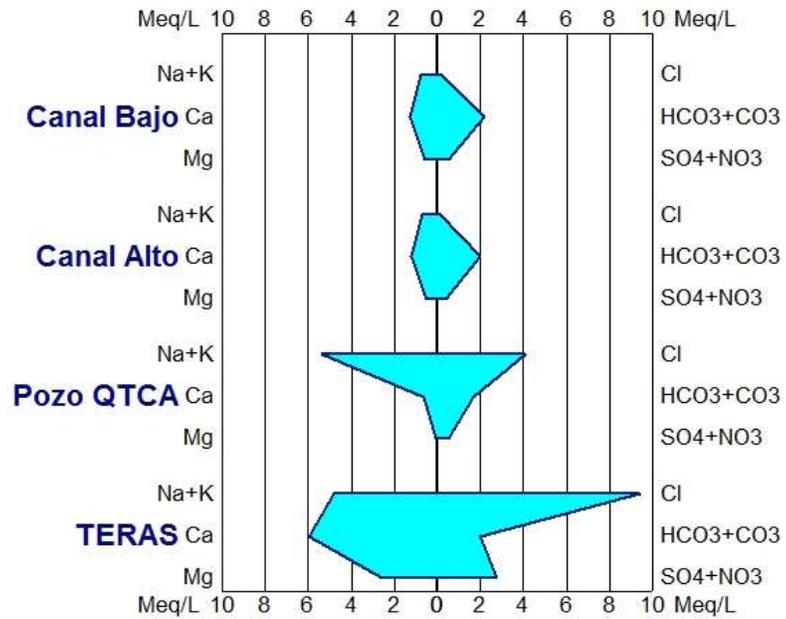


Figura 4.14 Diagramas de Stiff representando el agua utilizada para riego procedente de los canales de riego y de los pozos correspondiente al muestreo noviembre, 2017

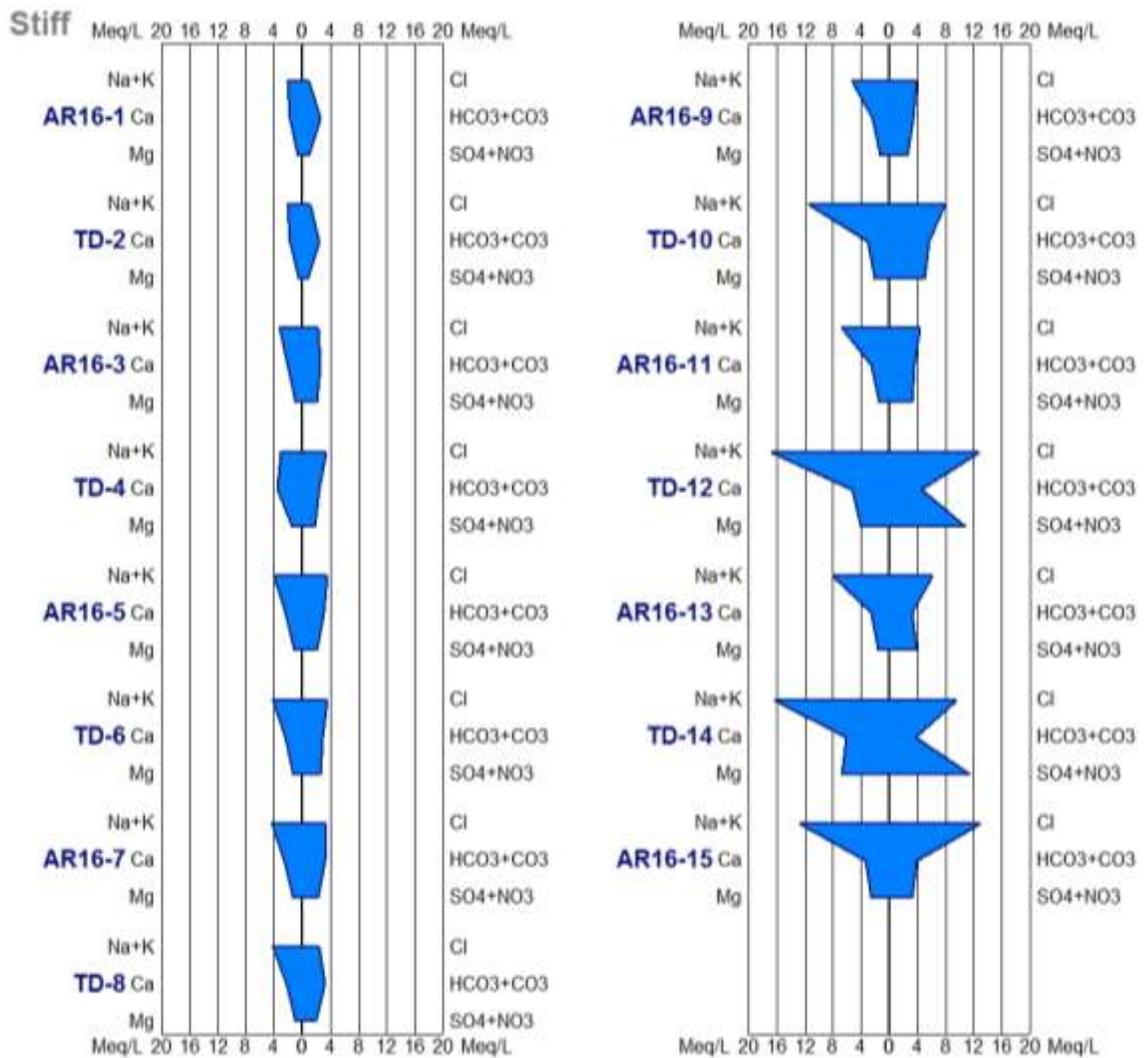


Figura 4.15 Diagramas de Stiff representando el agua de drenaje a lo largo del área de estudio correspondiente al muestreo noviembre, 2017.

Los diagramas de Stiff correspondientes al muestreo de marzo de 2018 se presentan en las Figuras 4.16 y 4.17.

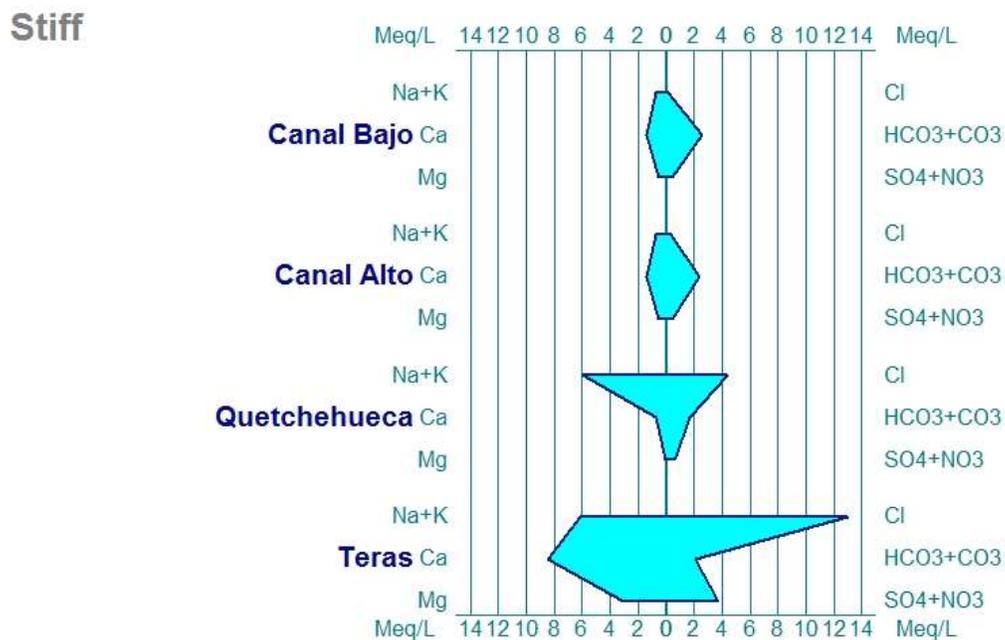


Figura 4.16 Diagramas de Stiff representando el agua utilizada para riego procedente de los canales de riego y de los pozos correspondiente al muestreo de marzo, 2018

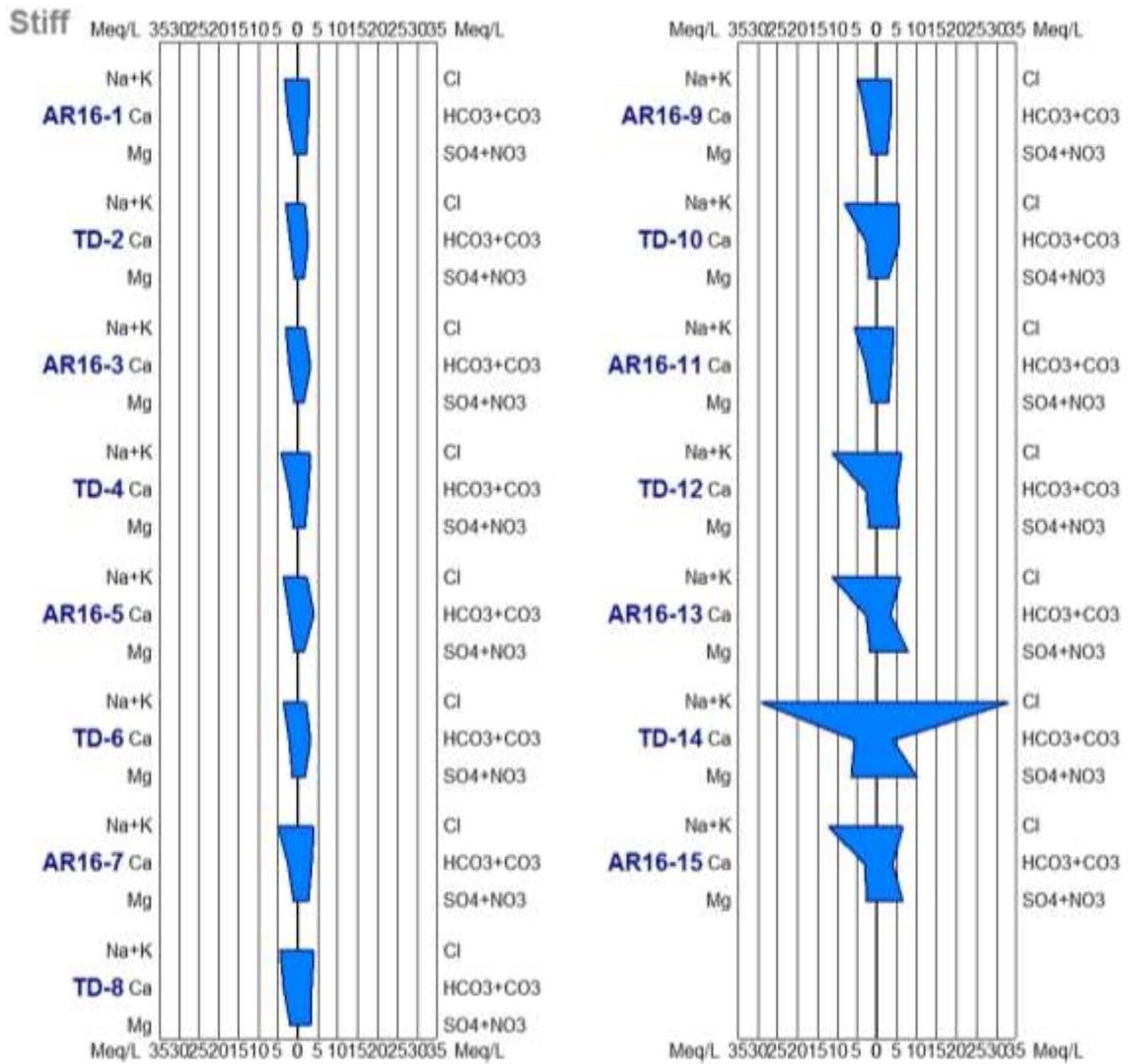


Figura 4.17 Diagramas de Stiff representando el agua de drenaje a lo largo del área de estudio correspondiente al muestreo marzo, 2018.

En las Figuras 4.18 y 4.20 se puede apreciar la variación de la concentración de NO_3^- en los puntos de muestreo para las dos campañas llevadas a cabo; desde el agua de riego (canales y pozos), agua de drenaje (AR16 y TD) hasta el agua de la bahía. Se observa un ascenso de la concentración de NO_3^- desde el punto AR16-1 hasta el AR16-11, para posteriormente observarse un descenso de NO_3^- , lo cual puede ser debido a que; a) la superficie drenada a partir de este punto (TD-12 y siguientes) es menor por lo que se adiciona una menor cantidad de fertilizantes a los cultivos, y b) que en los siguientes bloques se implementa el drenaje parcelario subterráneo que consiste en la implementación de drenes de tubería ranurada por lo que el Nitrógeno puede no movilizarse a través del drenaje superficial.

De igual forma se muestra la concentración de Fósforo Total en las figuras 4.19 y 4.21, en las dos campañas de muestreo, dónde se aprecia las bajas concentraciones de P en el agua dado que el P queda retenido en el suelo por procesos de adsorción-precipitación (Gerritse, 1993).



Figura 4.18 Concentración de NO_3^- en las muestras de agua del área de estudio (noviembre-2017).

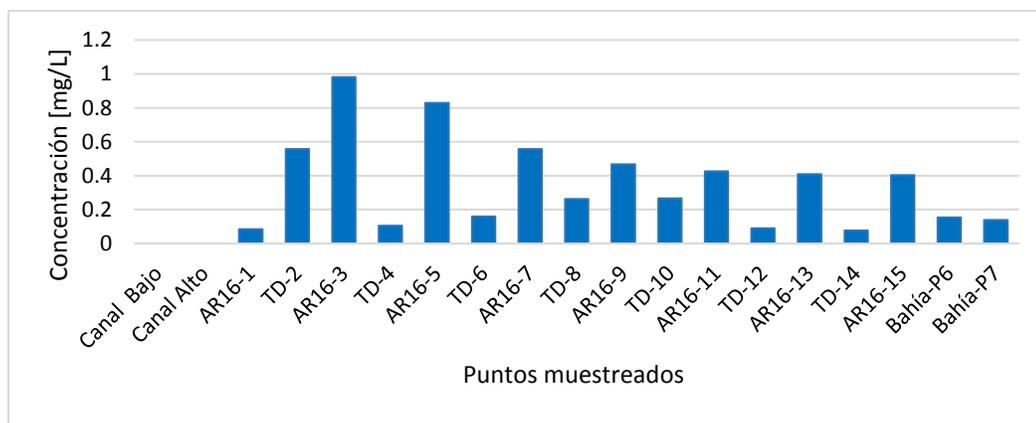


Figura 4.19 Concentración de P en las muestras de agua del área de estudio (noviembre-2017).

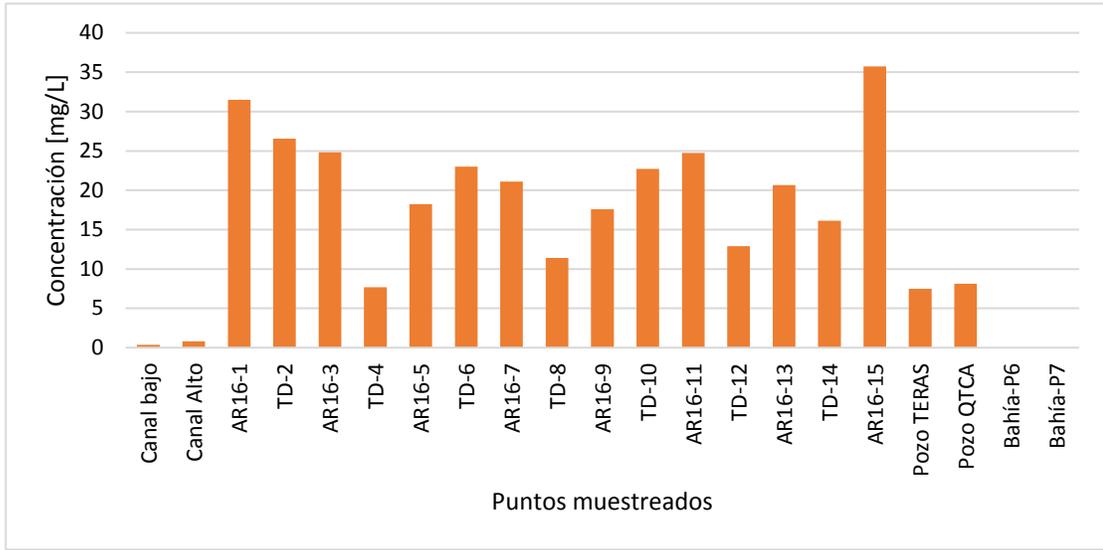


Figura 4.20 Concentración de NO_3^- en las muestras de agua del área de estudio (marzo-2018).

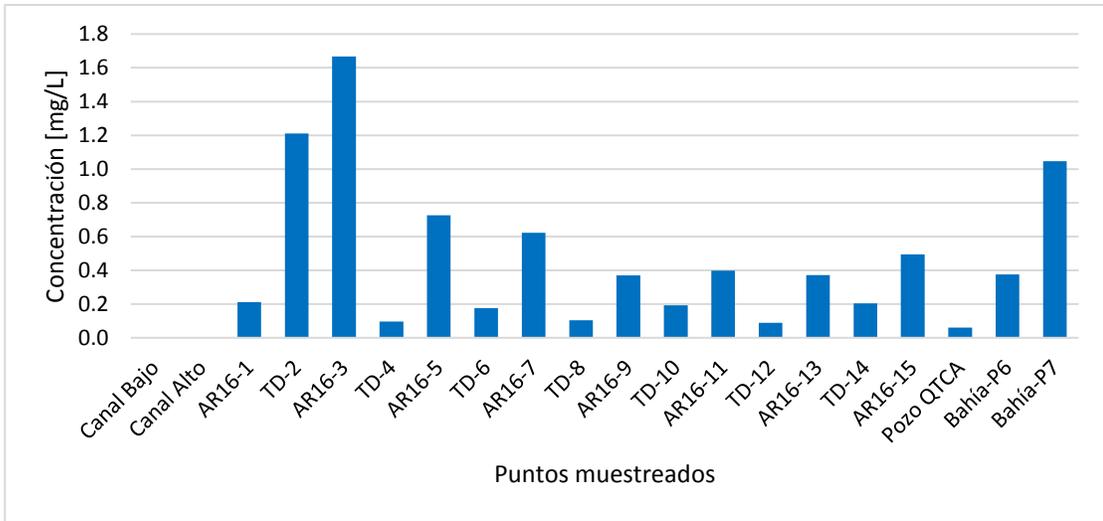


Figura 4.21 Concentración de P total en las muestras de agua del área de estudio (marzo-2018).

4.4 RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA DEL NITRÓGENO (Ciclo agrícola 2017-2018)

4.4.1 Entradas de Nitrógeno al sistema

4.4.1.1. Nitrógeno en agua de riego

El N en el agua del primer riego de noviembre de 2017, presentó una concentración de 0.51 mg/L N, dicha concentración fue multiplicada por el total de m³ de agua aplicados a cada parcela para así obtener la concentración total de N en el agua de riego, valor que resultó de $5.1076 \cdot 10^{-4}$ kg/m³ de N. La cantidad de N medida en el cuarto riego (tercero de auxilio) aplicado en el mes de marzo de 2018 fue menor a la del primer riego ya que presentó un valor de 0.25 mg/L de N, valor que se multiplicó por el total de m³ de agua de riego empleados, resultando en $2.5 \cdot 10^{-4}$ kg/m³ de N. El promedio de los dos resultados fue de 0.38 mg/L ($3.8 \cdot 10^{-4}$ kg/m³ de N), cifra que se utilizó en la estimación del N en el agua de riego para todo el ciclo de cultivo.

En la tabla 4.24 se presentan los aportes de N por agua de riego en forma de N en kg para el cultivo de trigo y en la tabla 4.25 se presentan estos mismos aportes para el maíz.

Al comparar los totales de masa de N en el agua de riego de ambas tablas, se observa que el agua de riego para maíz representa una mayor masa de N debido a que se aplica un volumen mayor de agua en dicho cultivo.

Tabla 4.24 N aportado por el agua de riego. Cultivo de trigo (noviembre de 2017 a marzo de 2018)

| <i>ID</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>Volumen de agua de riego (m³)</i> | <i>N total en agua de riego (kg)</i> |
|---------------|----------------------------|---|--|
| <i>AC-1</i> | 5 | 28980 | 11 |
| <i>AC-2</i> | 5 | 34164 | 13 |
| <i>AC-3</i> | 5 | 38736 | 15 |
| <i>AC-4</i> | 5 | 28512 | 11 |
| <i>APH-1</i> | 5 | 40392 | 15 |
| <i>APH-2</i> | 5 | 42714 | 16 |
| <i>JLIG-1</i> | 5 | 55656 | 21 |
| <i>JLIG-2</i> | 5 | 50796 | 19 |
| <i>RM-1</i> | 7 | 65988 | 25 |
| <i>RM-2</i> | 5 | 41112 | 16 |
| <i>RM-3</i> | 3 | 24885 | 9 |
| <i>RM-4</i> | 4 | 38664 | 15 |
| <i>PR-1</i> | 14 | 86832 | 33 |
| <i>PR-2</i> | 15 | 84204 | 32 |
| <i>JM</i> | 5 | 16128 | 6 |
| <i>CVG</i> | 5 | 36252 | 14 |
| <i>MIB</i> | 5 | 25452 | 10 |
| <i>RGS</i> | 5 | 33732 | 13 |
| <i>JJS</i> | 25 | 145944 | 55 |
| <i>GOT</i> | 5 | 38124 | 14 |
| <i>OAP</i> | 10 | 72684 | 28 |
| <i>ALS</i> | 5 | 34884 | 13 |
| <i>MAL</i> | 5 | 47772 | 18 |
| <i>JMV</i> | 5 | 16100 | 6 |
| TOTAL | 163 | 1128707 | 429 |

Tabla 4.25 N aportado por el agua de riego. Cultivo de maíz (noviembre de 2017 a marzo de 2018)

| <i>ID</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>Volumen de agua de riego (m³)</i> | <i>N total en agua de riego (kg)</i> |
|---------------------|------------------------|---|--------------------------------------|
| <i>APH, M-1</i> | 5 | 27252 | 10 |
| <i>APH, M-2</i> | 5 | 61164 | 23 |
| <i>APH, M-3</i> | 5 | 46764 | 18 |
| <i>APH, M-4</i> | 5 | 45936 | 17 |
| <i>APH, M-5</i> | 5 | 51408 | 20 |
| <i>AC, M-1</i> | 5 | 47096 | 18 |
| <i>AC, M-2</i> | 5 | 53516 | 20 |
| <i>AC, M-3</i> | 5 | 52740 | 20 |
| <i>AC, M-4</i> | 5 | 44964 | 17 |
| <i>AC, M-5</i> | 5 | 55800 | 21 |
| <i>EDB M-1</i> | 30 | 255384 | 97 |
| <i>EDB M-2</i> | 20 | 180252 | 69 |
| <i>RDB M-1</i> | 30 | 282996 | 108 |
| <i>RDB M-2</i> | 20 | 190440 | 72 |
| <i>JRM</i> | 5 | 55692 | 21 |
| <i>FRA</i> | 8.8 | 76140 | 29 |
| <i>29A</i> | 13.2 | 105048 | 40 |
| <i>PR, MI</i> | 12 | 86904 | 33 |
| <i>TOTAL</i> | 189 | 1719496 | 653 |

4.4.1.2. Nitrógeno por fertilización

Con base en las dosis de fertilizantes se estimó la cantidad final de N total aplicada por hectárea en función de la composición de cada tipo de fertilizante, para posteriormente estimar la entrada total para el bloque en estudio. En el caso del trigo se estimó un total de 351 kg/ha de N, lo que representa para un área de 163 hectáreas un total de 57,213 kg de N (Tabla 4.26). Para el maíz, se aplicó una dosis de 309 kg/ha de N en un área de 189 hectáreas, lo que supone una entrada total de 58,401 kg de N (Tabla 4.27) (noviembre/2017 – marzo/2018).

Tabla 4.26 N aportado por fertilizante en el cultivo de trigo

| <i>ID</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>N fertilizante (kg)</i> |
|---------------|------------------------|----------------------------|
| <i>AC-1</i> | 5 | 1755 |
| <i>AC-2</i> | 5 | 1755 |
| <i>AC-3</i> | 5 | 1755 |
| <i>AC-4</i> | 5 | 1755 |
| <i>APH-1</i> | 5 | 1755 |
| <i>APH-2</i> | 5 | 1755 |
| <i>JLIG-1</i> | 5 | 1755 |
| <i>JLIG-2</i> | 5 | 1755 |
| <i>RM-1</i> | 7 | 2457 |
| <i>RM-2</i> | 5 | 1755 |
| <i>RM-3</i> | 3 | 1053 |
| <i>RM-4</i> | 4 | 1404 |
| <i>PR-1</i> | 14 | 4914 |
| <i>PR-2</i> | 15 | 5265 |
| <i>JM</i> | 5 | 1755 |
| <i>CVG</i> | 5 | 1755 |
| <i>MIB</i> | 5 | 1755 |
| <i>RGS</i> | 5 | 1755 |
| <i>JJS</i> | 25 | 8775 |
| <i>GOT</i> | 5 | 1755 |
| <i>OAP</i> | 10 | 3510 |
| <i>ALS</i> | 5 | 1755 |
| <i>MAL</i> | 5 | 1755 |
| <i>JMV</i> | 5 | 1755 |
| TOTAL | 163 | 57213 |

Tabla 4.27 N aportado por fertilizante en el cultivo de maíz

| <i>ID</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>N fertilizante (kg)</i> |
|-----------------|------------------------|----------------------------|
| <i>APH, M-1</i> | 5 | 1545 |
| <i>APH, M-2</i> | 5 | 1545 |
| <i>APH, M-3</i> | 5 | 1545 |
| <i>APH, M-4</i> | 5 | 1545 |
| <i>APH, M-5</i> | 5 | 1545 |
| <i>AC, M-1</i> | 5 | 1545 |
| <i>AC, M-2</i> | 5 | 1545 |
| <i>AC, M-3</i> | 5 | 1545 |
| <i>AC, M-4</i> | 5 | 1545 |
| <i>AC, M-5</i> | 5 | 1545 |
| <i>EDB M-1</i> | 30 | 9270 |
| <i>EDB M-2</i> | 20 | 6180 |
| <i>RDB M-1</i> | 30 | 9270 |
| <i>RDB M-2</i> | 20 | 6180 |
| <i>JRM</i> | 5 | 1545 |
| <i>FRA</i> | 8.8 | 2719 |
| <i>29A</i> | 13.2 | 4078 |
| <i>PR, M1</i> | 12 | 3708 |
| TOTAL | 189 | 58401 |

4.4.1.3. Fijación atmosférica de Nitrógeno

Se ha generalizado la entrada de N por fijación o deposición atmosférica para los dos cultivos presentes en la zona de estudio. Como se dispone de un área de 352 hectáreas y la tasa de fijación es 2.5 kg/ha de N, se estimó un total de 880 kg de N.

4.4.2 Salidas de Nitrógeno del sistema

4.4.2.1. Nitrógeno en agua de drenaje

Se analizó el agua de drenaje en el punto TD-8, que es la salida del drenaje del bloque en estudio, obteniéndose un valor de 7 mg/L de N, que multiplicado por el caudal medido en dicho punto permite obtener un valor de $7 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ para noviembre de 2017.

Con los datos de marzo de 2018, la concentración de N medido en el agua del drenaje del bloque fue de 2.59 mg/L de N y considerando el caudal, se obtiene un valor de $2.59 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ de N. A partir de dichos resultados, el valor promedio de N en el agua de escorrentía fue de $4.795 \cdot 10^{-3}$ kg/m³, valor a partir de cual se estimó el N total en agua de escorrentía.

Los resultados por parcela se muestran en la Tabla 4.28 para el cultivo de trigo y en la Tabla 4.29 para el cultivo de maíz.

Tabla 4.28 N en el agua de escorrentía. Cultivo de trigo (noviembre de 2017 a marzo de 2018)

| ID | Superficie (ha) | Volumen de agua de escorrentía (m³) | N total en agua de escorrentía (kg) |
|-----------|------------------------|---|--|
| AC-1 | 5 | 5712 | 27 |
| AC-2 | 5 | 6734 | 32 |
| AC-3 | 5 | 7635 | 36 |
| AC-4 | 5 | 5620 | 27 |
| APH-1 | 5 | 7961 | 38 |
| APH-2 | 5 | 8419 | 40 |
| JLIG-1 | 5 | 10970 | 52 |
| JLIG-2 | 5 | 10012 | 48 |
| RM-1 | 7 | 13006 | 62 |
| RM-2 | 5 | 8103 | 38 |
| RM-3 | 3 | 4905 | 23 |
| RM-4 | 4 | 7621 | 36 |
| PR-1 | 14 | 17115 | 81 |
| PR-2 | 15 | 16597 | 79 |
| JM | 5 | 3179 | 15 |
| CVG | 5 | 7145 | 34 |
| MIB | 5 | 5017 | 24 |

Tabla 4.28 N en el agua de escorrentía. Cultivo de trigo (noviembre de 2017 a marzo de 2018) (continuación)

| <i>ID</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>Volumen de agua de escorrentía (m³)</i> | <i>N tot en agua de escorrentía (kg)</i> |
|--------------|------------------------|---|--|
| <i>RGS</i> | 5 | 6649 | 32 |
| <i>JJS</i> | 25 | 28766 | 137 |
| <i>GOT</i> | 5 | 7514 | 36 |
| <i>OAP</i> | 10 | 14326 | 68 |
| <i>ALS</i> | 5 | 6876 | 33 |
| <i>MAL</i> | 5 | 9416 | 45 |
| <i>JMV</i> | 5 | 3173 | 15 |
| TOTAL | 163 | 222468 | 1057 |

Tabla 4.29 N en el agua de escorrentía. Cultivo de maíz (noviembre de 2017 a marzo de 2018)

| <i>ID</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>Volumen de agua de escorrentía (m³)</i> | <i>N total en agua de escorrentía (kg)</i> |
|-----------------|------------------------|---|--|
| <i>APH, M-1</i> | 5 | 5371 | 26 |
| <i>APH, M-2</i> | 5 | 12055 | 57 |
| <i>APH, M-3</i> | 5 | 9217 | 44 |
| <i>APH, M-4</i> | 5 | 9054 | 43 |
| <i>APH, M-5</i> | 5 | 10133 | 48 |
| <i>AC, M-1</i> | 5 | 9283 | 44 |
| <i>AC, M-2</i> | 5 | 10548 | 50 |
| <i>AC, M-3</i> | 5 | 10395 | 49 |
| <i>AC, M-4</i> | 5 | 8862 | 42 |
| <i>AC, M-5</i> | 5 | 10998 | 52 |
| <i>EDB M-1</i> | 30 | 50336 | 239 |
| <i>EDB M-2</i> | 20 | 35528 | 169 |
| <i>RDB M-1</i> | 30 | 55779 | 265 |

Tabla 4.29 N en el agua de escorrentía. Cultivo de maíz (noviembre de 2017 a marzo de 2018) (continuación)

| <i>ID</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>Volumen de agua de escorrentía (m³)</i> | <i>N total en agua de escorrentía (kg)</i> |
|---------------------|------------------------|---|--|
| <i>RDB M-2</i> | 20 | 37536 | 178 |
| <i>JRM</i> | 5 | 10977 | 52 |
| <i>FRA</i> | 8.8 | 15007 | 71 |
| <i>29A</i> | 13.2 | 20705 | 98 |
| <i>PR, MI</i> | 12 | 17129 | 81 |
| <i>TOTAL</i> | 189 | 338913 | 1610 |

4.4.2.2. Nitrógeno liberado en forma de gas

Con base en la tasa de fertilización aplicada y la fórmula de Millar *et al.* (2018), en la Tabla 4.30 se muestra el resultado de la estimación de N liberado en forma de gas.

Tabla 4.30 Nitrógeno liberado a la atmósfera (noviembre de 2017 a marzo de 2018)

| <i>Cultivo</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>Tasa de N por fertilizantes (kg/ha)</i> | <i>N liberado (g/ha)</i> | <i>N liberado (kg/ha)</i> | <i>N total liberado (Kg)</i> |
|---------------------|------------------------|--|--------------------------|---------------------------|------------------------------|
| <i>Trigo</i> | 163 | 351 | 2807 | 2.81 | 457.5 |
| <i>Maíz</i> | 189 | 309 | 2109 | 2.11 | 398.7 |
| <i>Total</i> | 352 | 660 | 4916 | 4.92 | 856.2 |

4.4.2.3. Nitrógeno aprovechado por los cultivos

En el caso del trigo, el área de cultivo fue de 163 hectáreas con un rendimiento estimado de 9 ton/ha y para el maíz el área de cultivo fue de 189 hectáreas con un rendimiento estimado de 10 ton/ha. En la Tabla 4.31 se muestra el resultado de la estimación de N aprovechado por la planta por hectárea y por el área total de cada cultivo para todo el ciclo de cultivo de noviembre de 2017 a marzo de 2018.

Tabla 4.31 Nitrógeno aprovechado por el cultivo (noviembre de 2017 a marzo de 2018)

| Tipo de Cultivo | Superficie (ha) | Rendimiento (ton/ha) | Extracción unitaria de N (kg/ton) | Extracción de N (kg/ha) | Extracción por cultivo de N (kg) |
|------------------------|------------------------|-----------------------------|--|--------------------------------|---|
| <i>Trigo</i> | 163 | 9 | 25 | 225 | 36675 |
| <i>Maíz</i> | 189 | 10 | 20 | 200 | 37800 |
| Total | 352 | 19 | 45 | 425 | 74475 |

4.4.2.4. Nitrógeno en el suelo

El N residual en el suelo se ha estimado considerando que el 18% del N del fertilizante aplicado permanece como N residual en el suelo. Partiendo de la cantidad de N aportado por fertilización, la estimación total de N en suelo para el ciclo de cultivo noviembre de 2017 a marzo de 2018 se muestra en la Tabla 4.32.

Tabla 4.32 N residual en el suelo para el bloque TD-8 (noviembre de 2017 a marzo de 2018)

| Tipo de cultivo | N-Fertilizante (kg/ha) | Superficie (ha) | N-Fertilizante total (kg) | N suelo (kg) |
|------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------------|---------------------|
| <i>Trigo</i> | 351 | 163 | 57213 | 10298 |
| <i>Maíz</i> | 309 | 189 | 58401 | 10512 |
| TOTAL | 660 | 352 | 115614 | 20811 |

4.4.3 Balance de Nitrógeno en el bloque TD-8

Una vez descritos los resultados de cada variable, se presenta en la Tabla 4.33 un resumen con los datos para la estimación del balance de N. En la última columna de la tabla se encuentra el total de N estimado por lixiviación.

La ecuación para la estimación se detalló en el capítulo de materiales y métodos y es la siguiente:

$$N_{lix} = (N_{ri} + N_{fert} + N_{fix}) - (N_{plan} + N_{gas} + N_{esc} + N_{sue})$$

Al sustituir el valor de cada variable y con todas las unidades homogéneas en kg/ha de N resulta la siguiente ecuación:

$$N_{lix} = (1,082 + 115,614 + 881) - (74,475 + 856 + 2,667 + 20,811)$$

Como resultado final se obtuvo que la cantidad de N lixiviado fue de 18,767 kg de N para toda el área. Si este valor se divide entre el volumen de agua que representa la infiltración eficaz (914,055 m³), se estaría lixiviando una concentración de 0.020 kg/m³ (20.5 mg/L) de N total durante el ciclo de cultivo noviembre de 2017 a marzo de 2018.

Con base en porcentajes, se obtuvo que de un 100% de entrada de N al sistema, el 63% es aprovechado por los cultivos de maíz y trigo, un 2% sale del sistema a través del agua de escorrentía, tan solo el 1% es liberado en forma de gas a la atmósfera, el 18% del N queda como residuo en el suelo y el 16% corresponde al N lixiviado hacia el acuífero.

Tabla 4.33 Valores de las variables para la estimación del balance de Nitrógeno (noviembre de 2017 a marzo de 2018). Bloque TD-8

| | | ENTRADAS | | | SALIDAS | | | | |
|----------------|----------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Cultivo | Superficie (ha) | Nri (kg) | Nfert (Kg) | Nfix (kg) | Nesc (kg) | Nplan (kg) | Ngas (kg) | Nsue (kg) | Nlix (kg) |
| <i>Trigo</i> | 163 | 429 | 57,213 | 408 | 1,057 | 36,675 | 457 | 10,298 | 9,562 |
| <i>Maíz</i> | 189 | 653 | 58,401 | 473 | 1,610 | 3,7800 | 399 | 10,512 | 9,206 |
| TOTAL | 352 | 1,082 | 115,614 | 881 | 2,667 | 74,475 | 856 | 20,810 | 18,768 |
| % | | 100% | | | 2% | 63% | 1% | 18% | 16% |

El porcentaje de N lixiviado estimado se encuentra cercano a los porcentajes estimados por Riley *et al.* (2001) para dos parcelas ubicadas en este mismo distrito de riego. Dichos autores reportan para una de ellas un 17% de N lixiviado y para la otra un 28%. El resultado de N estimado también coincide con los porcentajes reportados por Grahmann *et al.* (2018), quienes obtuvieron en el balance de N en tres parcelas, también ubicadas en este distrito de riego, un porcentaje de N lixiviado del 18, 22 y 16% con respecto al total de N aplicado en las parcelas.

Adicionalmente, se realizó el balance de N para rendimientos menores tanto de trigo como de maíz utilizando un rendimiento de 7 ton/ha de trigo y 8 ton/ha de maíz; así como un rendimiento de 5 ton/ha de trigo y 7 ton/ha de maíz (INIFAP, 2005); además de una tercera estimación con base el porcentaje de N aprovechado por la planta del 38%, valor obtenido

de datos de SAGARPA (2011). En la Tabla 4.34 se muestran los resultados de la estimación de los balances de N bajo diferentes escenarios de producción de trigo y maíz.

Tabla 4.34 Balances de N para diferentes escenarios de producción de trigo y maíz

| <i>Variables</i> | | <i>Balance estimado</i> | <i>Balance 1</i> | <i>Balance 2</i> | <i>Balance 3</i> |
|------------------|-------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Entradas | Nfert (kg) | 115,614 | 115,614 | 115,614 | 115,614 |
| | Nri (kg) | 1,082 | 1,082 | 1,082 | 1,082 |
| | Nfix (kg) | 880 | 880 | 880 | 880 |
| Salidas | Nplan (kg) | 74,474 | 58,764 | 46,834 | 43,933 |
| | Nsue (kg) | 20,811 | 20,811 | 20,811 | 20,811 |
| | Ngas (kg) | 856 | 856 | 856 | 856 |
| | Nesc (kg) | 2,667 | 2,667 | 2,667 | 2,667 |
| | Nlix (kg) | 18,768 | 34,478 | 46,408 | 49,309 |

*Balance 1: rendimiento de 7 ton/ha trigo y 8 ton/ha maíz; Balance 2: rendimiento 5 ton/ha trigo y 7 ton/ha maíz y Balance 3: estimación del balance de masa en el DRRY con base en SAGARPA (2011)

Se muestra en la Figura 4.22 la comparación entre estos cuatro balances. Se comprueba que con un aprovechamiento óptimo de N por la planta existe un menor aporte de N lixiviado, y que a medida que se tiene un menor aprovechamiento, el valor de N lixiviado aumenta gradualmente.

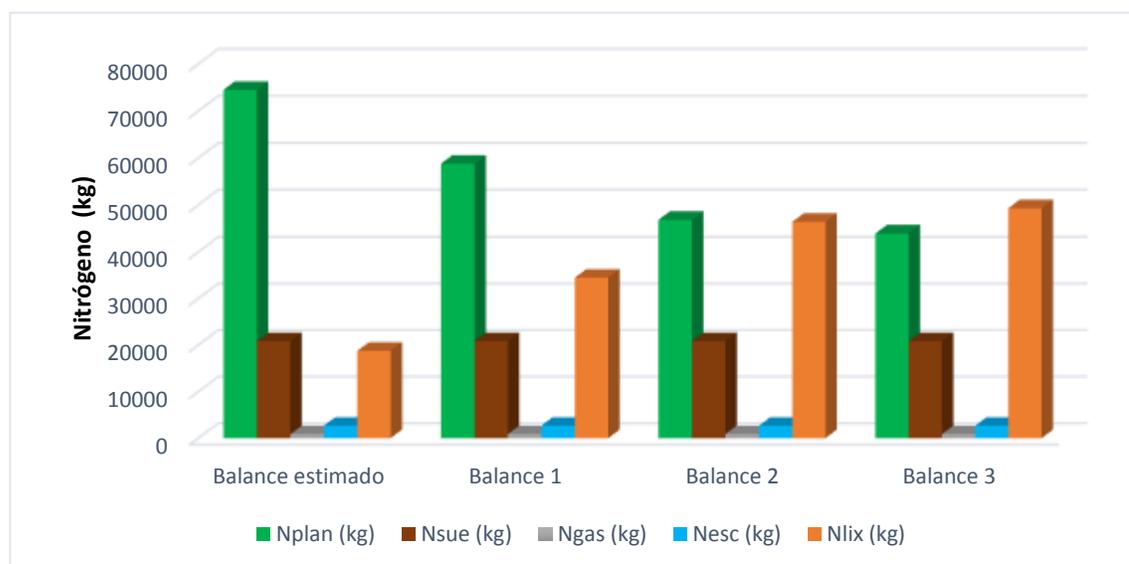


Figura 4.22 Balances de N estimados. Balance 1: rendimiento de 7 ton/ha trigo y 8 ton/ha maíz; Balance 2: rendimiento 5 ton/ha trigo y 7 ton/ha maíz y Balance 3: estimación del balance de masa en el DRRY con base en datos de SAGARPA (2011).

4.4.4 Balance de Nitrógeno en el área afluente al Arroyo 16 (AR-16)

Una vez estimado el balance a escala de parcelas y bloque, se realizó una estimación considerando toda el área drenada por el dren colector Arroyo 16 (AR-16). Esta área está representada por 49 bloques y tuvo una superficie efectiva de cultivo de trigo de 6,257 hectáreas y de cultivo de maíz de 3,478 hectáreas, con ello la superficie total de los cultivos de trigo y maíz para el ciclo agrícola noviembre 2017 a marzo 2018 fue de 9,735 hectáreas. Considerando que el bloque afluente al TD-8 es representativo del área total, se estimó el balance de N para los 49 bloques de cultivo afluentes al AR-16 con base en los datos del balance estimado para el bloque TD-8, que permitió obtener los resultados de la tabla 4.35, y que están representados gráficamente en la Figura 4.23.

Como resultado de la estimación de este balance se obtuvo que, de un 100% de entrada de N, el 11% está presente en el agua de drenaje, solo un 1% es liberado en forma de gas, los cultivos aprovechan un 63%, resultado similar a la investigación de Grahmann *et al.* (2018) quienes estimaron un 65% de aprovechamiento de N por el cultivo; el 18% queda retenido en el suelo y el 7% del N se lixivia ($18.6 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ de N). Este valor de N lixiviado es menor al que se estimó para el bloque representativo, que fue de 16%, lo cual puede ser debido a que en el punto de descarga hacia la Bahía de Tóbari se presentó una mayor concentración de N con un valor de $8.12 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ de N, por lo tanto, existe una reducción en el contenido de N lixiviado.

Tabla 4.35 Balance de Nitrógeno para el área de estudio dren colector Arroyo-16

| <i>Superficie (ha)</i> | <i>ENTRADAS</i> | | | <i>SALIDAS</i> | | | | |
|----------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| | <i>Nri (kg)</i> | <i>Nfert (kg)</i> | <i>Nfix (kg)</i> | <i>Nesc (kg)</i> | <i>Ngas (kg)</i> | <i>Nplan (kg)</i> | <i>Nsuelo (kg)</i> | <i>Nlix (kg)</i> |
| 9,735 | 26,728 | 3'270,909 | 24,337 | 369,460 | 24,898 | 2'103,425 | 588,764 | 235,427 |
| <i>Resultados (%)</i> | 100.0 | | | 11 | 1 | 63 | 18 | 7 |

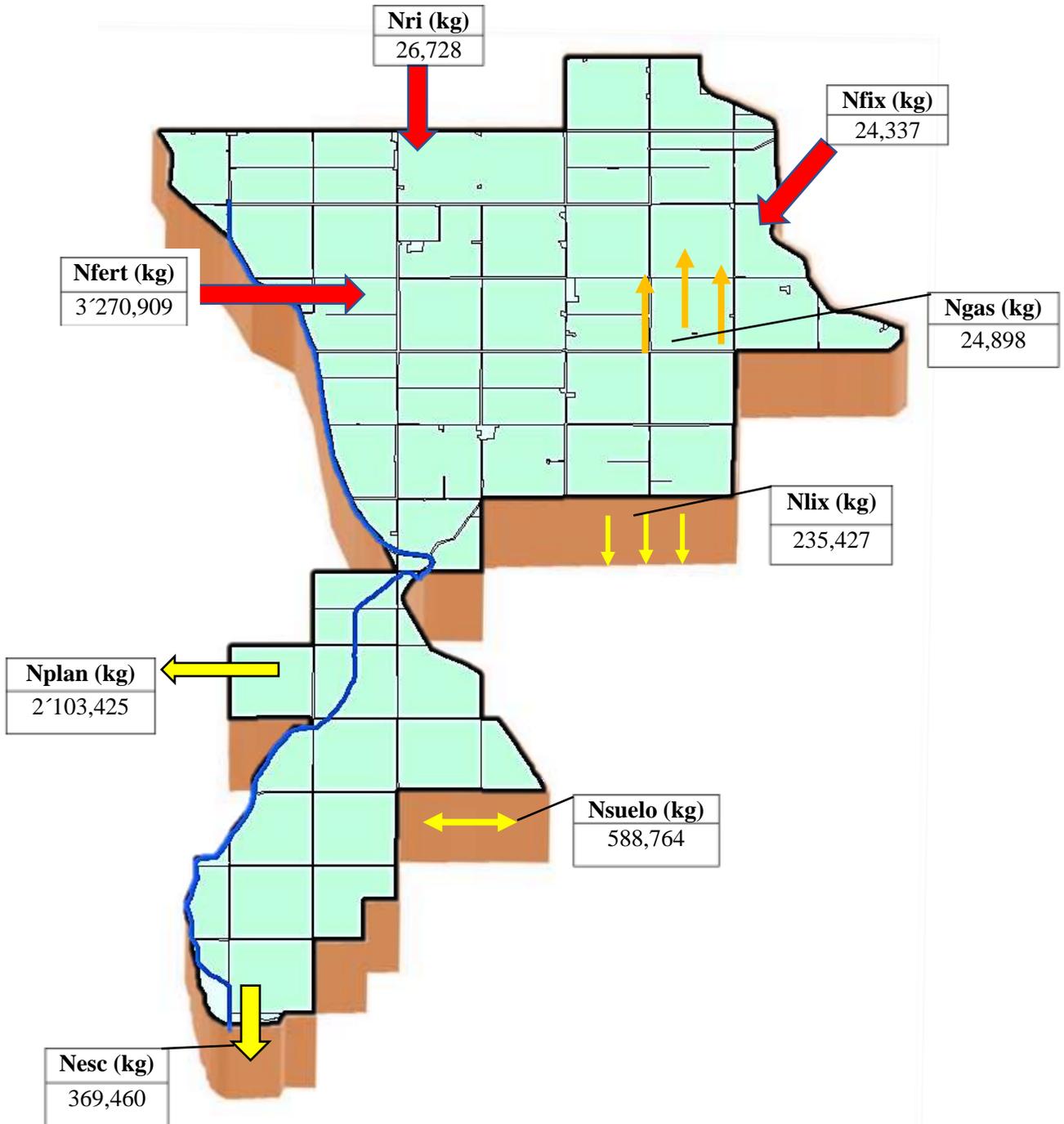


Figura 4.23 Balance de Nitrógeno del área afluente al AR-16

4.5 BALANCE DE MASA DEL FÓSFORO (Ciclo agrícola 2017-2018)

4.5.1 Entradas de Fósforo al sistema

4.5.1.1 Fósforo por fertilización (Pfert)

Para estimar la entrada total de P por la aplicación de fertilizantes en el bloque en estudio se llevó a cabo una estimación individual por cultivo; en el caso del trigo se estimó un total de 78 kg/ha de P, lo que representa en un área de 163 hectáreas un total de 12,714 kg de P. Por otra parte, en el cultivo de maíz se aplicó una dosis de 78 kg/ha de P en un área de 189 hectáreas, lo que supone una entrada total de 14,742 kg de P. Todo ello representa una suma final de 27,456 kg de P en el bloque para el ciclo de cultivo en estudio (noviembre de 2017 a marzo de 2018).

4.5.2 Salidas de Fósforo al sistema

4.5.2.1 Fósforo en suelo (Psue)

Una vez realizado el análisis en laboratorio se obtuvo un valor promedio de 12.3 mg de P o bien $12.3 \cdot 10^{-6}$ kg de P. Para conocer el contenido total de P en el suelo se obtuvo el volumen y peso de suelo en una hectárea ($10,000 \text{ m}^2$) con una profundidad de 0.2 m y una densidad del suelo 1.27 gr/cm^3 , equivalente a $1,270 \text{ kg/m}^3$.

El P medido en suelo se contempló para los dos tipos de cultivo. En trigo se estimó una adsorción del P hasta 0.3 metros de profundidad, lo que representa un total de 33 kg de P retenido en suelo por hectárea, que para las 163 hectáreas de trigo resultó en 5,379 kg de P. En cuanto al maíz, la profundidad máxima de retención en suelo fue a los 0.4 metros con una retención de 37 kg de P por hectárea y considerando que el área total del maíz de 189 hectáreas, la retención total de P en el suelo se estimó 6,993 kg de P, por lo que en el bloque en estudio se estimó una cantidad total de 12,372 kg de P retenido en el suelo.

En la Tabla 4.36 se detallan los parámetros necesarios para estimar el P retenido en suelo que son: el peso del suelo por hectárea, la densidad del suelo, la profundidad del suelo y el contenido de P medido en suelo. Para obtener la cantidad total de P en el suelo a cada 0.1 m de profundidad se multiplicó la concentración de P medida en suelo, y se consideró que a medida que la profundidad aumentó, el P adsorbido fue disminuyendo por lo que la mayor parte del P adsorbido se queda retenido en la capa más superficial del suelo.

Tabla 4.36 Parámetros del suelo para la estimación del P retenido en el suelo.

| Área (m ²) | Perfil de suelo (m) | Profundidad del suelo (m) | Densidad del suelo (kg/m ³) | Peso del suelo (kg) | Contenido de P (kg) | P por hectárea (kg) |
|------------------------|---------------------|---------------------------|---|---------------------|-----------------------|---------------------|
| 10,000 | -0.1 | 0.1 | 1270 | 1'270,000 | 1.05·10 ⁻⁵ | 13.335 |
| 10,000 | -0.1 | 0.2 | 1270 | 1'270,000 | 1.05·10 ⁻⁵ | 26.670 |
| 10,000 | -0.1 | 0.3 | 1270 | 1'270,000 | 5.2·10 ⁻⁶ | 33.274* |
| 10,000 | -0.1 | 0.4 | 1270 | 1'270,000 | 2.6·10 ⁻⁶ | 36.576** |
| 10000 | -0.1 | 0.5 | 1270 | 1'270,000 | 1.3·10 ⁻⁶ | 38.227 |
| 10000 | -0.1 | 0.6 | 1270 | 1'270,000 | 8·10 ⁻⁷ | 39.243 |

Con (*) se señalan los datos máximos considerados para la estimación del P en suelo para el trigo y con (**) los datos máximos para el cultivo de maíz.

4.5.2.2 Fósforo aprovechado por los cultivos (Pplan)

En el caso del trigo, el P aprovechado estimado fue de 5 kg/ton de P, y considerando un rendimiento de 9 toneladas por hectárea de trigo se estimó un aprovechamiento de 45 kg/ha, por lo que, en el área de cultivo de trigo, que es de 163 hectáreas, se aprovechó un total de 7,335 kg de P. Por otra parte, en el cultivo de maíz se estimó un aprovechamiento de 4 kg/ton de producción y se consideró una producción de 10 toneladas por hectárea resultando 40 kg/ha de aprovechamiento de P, y tomado en cuenta el área total de cultivo de maíz que es de 189 hectáreas, el consumo total de P fue de 7,560 kg.

La suma del consumo de P de ambos cultivos fue de 14,895 kg para el bloque en estudio durante el ciclo de cultivo de noviembre de 2017 a marzo de 2018.

4.5.2.3 Fósforo en agua de drenaje (Pesc)

Como resultado del análisis del agua de drenaje se determinó una concentración de 0.2 mg/L de P ($2 \cdot 10^{-4}$ kg/m³ de P) y un volumen total de escurrimiento del cultivo de trigo en el bloque en estudio de 564,354 m³ y del cultivo de maíz de 553,080 m³, obteniéndose así un total de 1'117,634 m³ de agua drenada, por lo que el resultado de la salida de P en el agua de drenaje fue de 223 kg en total para el ciclo de cultivo de noviembre de 2017 a marzo de 2018.

4.5.3 Balance de Fósforo en el bloque TD-8

Con base en la estimación final del balance de P se obtuvo la cantidad de P lixiviado, que en este caso resultó nulo debido a que el P queda retenido en el suelo.

La ecuación para la estimación del balance de P que se detalló en el capítulo de materiales y métodos es la siguiente:

$$P_{lix} = P_{fert} - (P_{plan} + P_{sue} + P_{esc})$$

Al sustituir el valor de cada variable y con todas las unidades homogéneas en kg de P resulta la siguiente ecuación:

$$0 \text{ kg} = (27,456 \text{ kg}) - (14,895 \text{ kg} + 12,372 \text{ kg} + 223 \text{ kg})$$

En la Tabla 4.37 se muestra el resultado de la ecuación del balance de masa para el P para cada cultivo. Cabe resaltar que, aunque el cultivo de maíz es el de mayor extensión y presenta una mayor adición de P por fertilización, la mayor concentración de P en el agua de drenaje está relacionada con el cultivo de trigo debido a que en los suelos cultivados con trigo el contenido de P adsorbido es menor (Tabla 4.36) por lo tanto en el agua de drenaje hay mayor presencia de P.

Como resultado de este balance de P, se tiene que el aprovechamiento por parte de la planta es la salida con el porcentaje más alto, con un 54%, y el P retenido en el suelo queda en segundo lugar con un 45%. El P no se encuentra en gran cantidad disuelto en el agua y es más común encontrarlo adsorbido en suelo o aprovechado por el cultivo. Ello también se comprueba con el porcentaje de P en el agua de escorrentía que solo fue del 1%

Tabla 4.37 Variables del balance masa de Fósforo. Bloque TD-8 (noviembre de 2017 a marzo de 2018)

| | | <i>ENTRADAS</i> | <i>SALIDAS</i> | | | |
|-------------------|------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|
| <i>Cultivo</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>Pfert (Kg)</i> | <i>Psue (kg)</i> | <i>Pplan (kg)</i> | <i>Pesc (kg)</i> | <i>Plix (kg)</i> |
| <i>Trigo</i> | 163 | 12,714 | 5,379 | 7,335 | 113 | 0 |
| <i>Maíz</i> | 189 | 14,742 | 6,993 | 7,560 | 111 | 0 |
| <i>TOTAL (kg)</i> | 352 | 27,456 | 12,372 | 14,895 | 224 | 0 |
| <i>TOTAL (%)</i> | | 100 | 45 | 54 | 1 | 0 |

4.5.4 Balance de Fósforo en el área afluyente al Arroyo 16 (AR-16)

Adicionalmente se estimó el balance de P para toda el área del dren colector AR-16, comprobándose que los porcentajes de entrada y salida son iguales a los estimados en el bloque representativo. En la tabla 4.38 se presentan los resultados, y se comprueba que de un 100% del P aplicado, el 45% permanece retenido en el suelo, 54% es aprovechado por los cultivos, el 1% se encuentra presente en el agua de escorrentía y como lixiviado no hay presencia de P ya que se encontraría adsorbido en el suelo (Figura 4.24).

Tabla 4.38 Balance de Fósforo para el área de estudio del dren colector Arroyo-16 (AR-16)

| <i>Superficie (ha)</i> | <i>ENTRADAS</i> | <i>SALIDAS</i> | | | |
|----------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|
| 9735 | Pfert (kg) | Psuelo (kg) | Pplan (kg) | Pesc (kg) | Plix (kg) |
| | 759,330 | 307,360 | 420,685 | 19,854 | 11,431 |
| % | 100 | 40 | 55 | 3 | 2 |

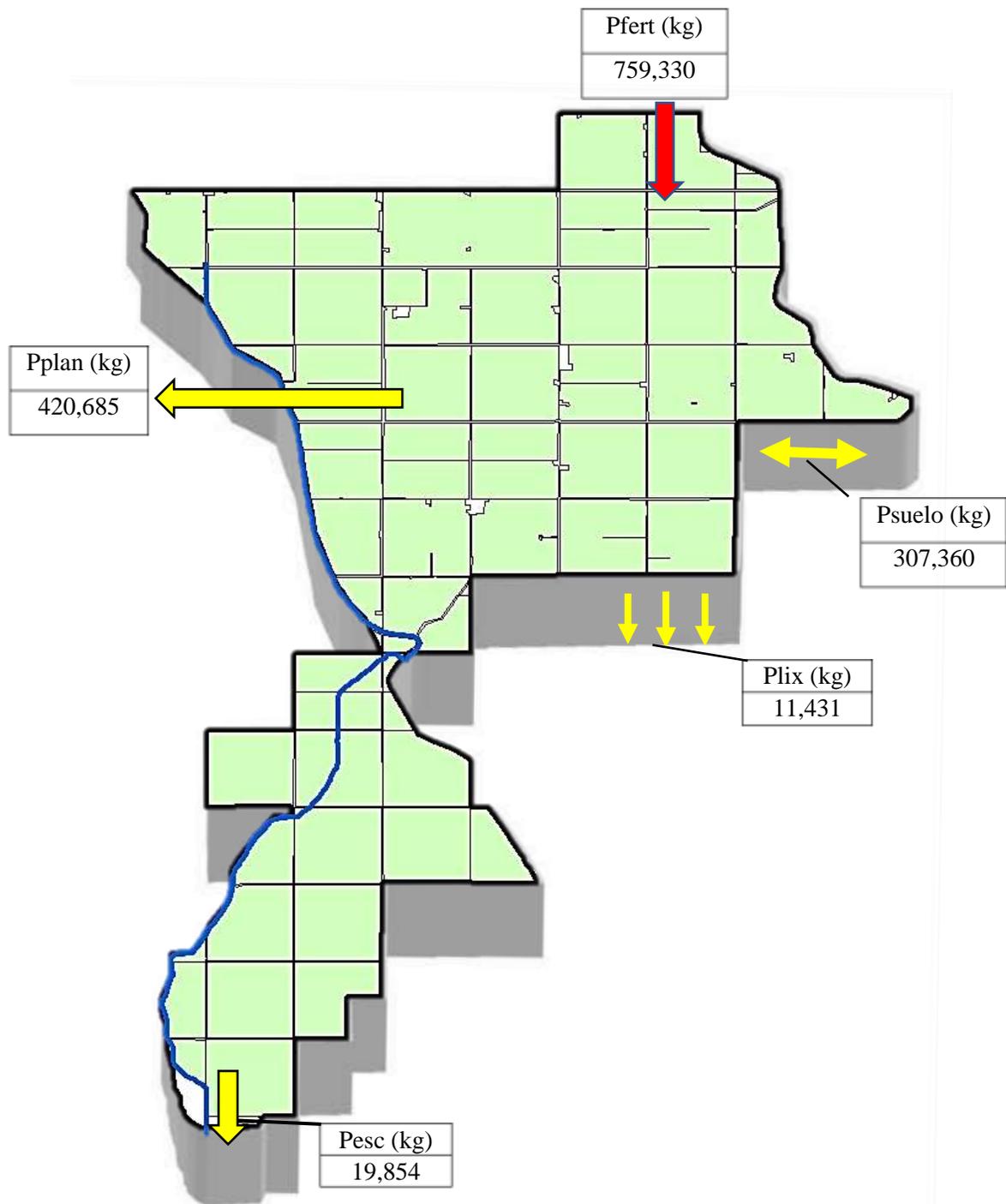


Figura 4.24 Balance de Fósforo del área afluente al AR-16

4.6 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Con la información obtenida se evaluó la calidad del agua subterránea con base en los límites permisibles para uso y consumo humano indicados en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

En el caso del N, el aporte por lixiviación hacia el acuífero fue de 18.6 mg/L, este valor es potencialmente contaminante ya que es más alto que el límite máximo permisible de N en agua para uso y consumo humano como se muestra en la tabla 4.39; sin embargo, los valores encontrados en el agua subterránea son inferiores y no superan el límite permisible, lo cual puede estar relacionado con las diversas reacciones que pueden sufrir los nitratos en el suelo y zona no saturada durante su transporte y, además, puede existir un proceso de dilución una vez el lixiviado se incorpore al agua subterránea.

El Fósforo no es conducido hacia el agua subterránea debido a que generalmente queda retenido en el suelo por los procesos de adsorción-precipitación. El P que no queda retenido en el suelo en los primeros 0.6 m, gradualmente, quedaría retenido a medida que aumenta la profundidad del suelo, por ello no se detecta su presencia en el agua subterránea.

Al realizar el análisis del resto de parámetros químicos en el agua subterránea se detectaron concentraciones altas de cloruros en el caso del pozo Teras que sobrepasan el límite de 250 mg/L indicada en la NOM-127 para uso y consumo humano (Tabla 4.39).

Por otra parte, la concentración de TDS sobrepasa el límite máximo permisible por la NOM-127 en el caso del pozo Teras ya que en el análisis de noviembre de 2017 se tiene un valor de 1,476 mg/L y en marzo de 2018 de 1,948 mg/L, casi el doble del permisible (1000 mg/L) (Tabla 4.39). El consumo de agua con niveles altos de TDS puede originar problemas gastrointestinales en la población, Otro parámetro analizado fue la dureza del agua que se detectó sobre el límite permisible de 100 mg/L CaCO_3 de la WHO en el pozo Teras con valores de 432 mg/L en noviembre de 2017 y de 675.4 mg/L en marzo de 2018.

Tabla 4.39 Parámetros evaluados para uso y consumo humano en agua de pozos según la NOM-127 y WHO
(en negrita valores que superan el valor límite)

| <i>Característica</i> | <i>Pozos</i> | | | | | |
|---|---|------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| | Límite permisible NOM-127 (mg/L) | WHO | QTC (nov, 2017) | Teras (nov, 2017) | QTC (mar, 2018) | Teras (mar, 2018) |
| <i>pH</i> | 6.5-8.5 | s.d | 8.55 | 8.33 | 8.49 | s.d. |
| <i>Dureza total (mgL⁻¹ CaCO₃)</i> | 500 | 100 | 35.7 | 432.25 | 53.0 | 675.4 |
| <i>TDS</i> | 1000 | 1000 | 861 | 1,476 | 711 | 1,948 |
| <i>Nitratos (como N)</i> | 10 | 9 | 1.96 | 1.36 | 1.83 | 1.69 |
| <i>Cloruros (como Cl)</i> | 250 | 250 | 146.5 | 335.5 | 157.8 | 460.0 |
| <i>Na²⁺ (mgL⁻¹)</i> | 200 | 200 | 122.7 | 110.6 | 144.0 | 154.0 |
| <i>SO₄²⁻ (mgL⁻¹)</i> | 400 | 250 | 20.0 | 130.0 | 24.3 | 173.0 |

El sistema de drenaje funciona como acelerador de la salida de agua como escorrentía lo que puede disminuir la infiltración de agua a través del suelo y, por ende, ayudar a mitigar la lixiviación de nitratos hacia el acuífero; no obstante, el implementar este sistema de drenaje, con descarga hacia la bahía, ocasiona que el transporte de los elementos contaminantes hacia la bahía sea directo y en corto tiempo, lo cual podría afectar a la vida acuática.

Para evaluar este punto, se consideraron los parámetros de protección de la vida acuática de acuerdo con la Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (2016), El pH del agua que se descarga en la bahía se encontró ligeramente alto en el AR-16-15 en el muestreo de marzo de 2018. En el caso del Fósforo en el agua de descarga, éste se encontró bajo el nivel permisible (5 mg/L) para ambas fechas de muestreo. En lo referente a el agua de la bahía, esta presenta buena calidad ya que no supera los valores máximos recomendados (Tabla 4.40).

Tabla 4.40 Parámetros evaluados para la protección de la vida acuática del agua de descarga y del agua de la bahía (en negrita valores que superan el valor limite)

| <i>Característica</i> | <i>Descarga del Dren</i> | | | <i>Bahía de Tóbari</i> | | | |
|---------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|
| | Límite permisible Ley Federal de Derechos (2018) | AR-16-15 (nov, 2017) | AR-16-15 (mar, 2018) | P-6 (nov, 2017) | P-7 | P-6 (mar, 2018) | P-7 |
| <i>pH</i> | 6.5-8.5 | 8.2 | 8.7 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 7.9 |
| <i>P total (mg/L)</i> | 5 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 1.0 |

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como principales conclusiones de esta investigación y en respuesta a cada uno de los objetivos específicos, cabe señalar:

La caracterización general de la zona de estudio (Dren Arroyo 16) permite concluir que el área, para fines prácticos, se puede considerar homogénea en cuanto a geología, edafología, clima, y usos de suelo.

Los caudales medidos en la red de drenaje que abarca el Dren Arroyo 16 en noviembre, del 2017 son menores a los de marzo del 2018, lo cual puede ser atribuido a que en noviembre se produce el primer riego, así que el suelo seco tiene mayor capacidad de retención de agua y en el caso del riego de marzo, el cultivo aprovecha mayor cantidad de agua y, además las raíces de los cultivos facilitan el drenaje a través del suelo.

El balance hídrico realizado en uno de los bloques de cultivo de la zona de estudio permitió estimar volúmenes de escorrentía e infiltración eficaz. Las diferencias observadas con el riego de pre-siembra son debidas al mayor volumen de agua de riego suministrado en comparación con los riegos de auxilio y al hecho de que aún no se ha realizado la siembra por lo que no hay cultivos que puedan aprovechar el agua lo que ocasiona que del total del agua de riego, un gran porcentaje escurra (48%) y se infiltre (33%).

Considerando el ciclo completo del cultivo de trigo, se estimó que, del total de volumen de agua empleada para riego, un 19% corresponde a la evapotranspiración del cultivo, un 50% al escurrimiento y el 31% restante a la infiltración eficaz. En el caso del maíz, del total del volumen de agua de riego, un 20% corresponde a la evapotranspiración del cultivo, un 49% al escurrimiento y el 31% restante a la infiltración eficaz.

El balance hídrico estimado para el área afluente al Arroyo 16 muestra que de 100% del agua de riego un 23.7% fue aprovechada por los cultivos, 59.6% salió del sistema por escorrentía y un 17% fue considerado como agua de infiltración eficaz. La estimación de dicho balance permitió estimar el volumen de aporte de agua al acuífero y al compararlo con el estimado en el estudio de disponibilidad de CONAGUA, 2018 (346.5 hm³/año) se observó coherencia en los resultados, aunque se obtuvo un valor menor (303.9 hm³/año), lo cual puede ser debido a que solamente se consideraron los cultivos de trigo y maíz, así el volumen faltante puede

ser atribuido a los demás cultivos dentro del DR041 (algodón, alfalfa, cebada, etc.) cuyos ciclos de cultivo son en primavera.

La eficiencia de riego para todo el ciclo de cultivo es, en promedio, baja (de 19 al 33 %) debido a que se aplica un sobre-riego al inicio del ciclo con el fin de realizar un lavado de suelos y así disminuir la presencia de sales en el suelo. Si se considera la eficiencia por riego aplicado por parcela se observa que, a partir del tercer riego, la eficiencia es mayor al 40% incluso alcanzando un 65% en algunas de los bloques.

La caracterización hidroquímica del agua en los dos muestreos llevados a cabo (noviembre, 2017 y marzo 2018) indicó que los diferentes tipos de agua (agua de riego de origen superficial, agua de drenaje, agua de pozos, agua de la bahía) tienen una composición similar entre ambas campañas de muestreo.

En el caso de las muestras recolectadas a lo largo del dren colector Arroyo 16 y sus tributarios, se observó una evolución en la concentración de iones desde tierra adentro, donde inicia el muestreo, hacia aguas abajo hasta su desembocadura en la Bahía de Tóbari, incrementándose la concentración de iones en la dirección del flujo. En el inicio del sistema el agua de entrada o agua de riego resultó ser del tipo bicarbonatada cálcica, y en el Dren Arroyo 16 varía de bicarbonatada sódica en el inicio del dren a clorurada cálcica al final de éste. Por su parte, el agua subterránea fue clorurada cálcica y el agua de la Bahía de la familia clorurada sódica.

La concentración de N en el agua de riego fue de 0.51 mg/L y 0.19 mg/L para el primer y segundo muestreo, respectivamente; en el agua de drenaje las concentraciones de N más altas encontradas fueron 8.5 mg/L y 8.2 mg/L para los riegos de noviembre-2017 y marzo-2018 respectivamente; en los pozos la concentraciones de N fueron de 2.0 mg/L y 1.8 mg/L en el pozo Quetchehueca y 1.4 mg/L y 1.7 mg/L en el pozo Teras, para el primer y segundo muestreo, respectivamente..

El balance de Nitrógeno realizado para todo el ciclo agrícola del trigo y del maíz en el bloque TD-8 permitió comprobar que, del total de Nitrógeno aplicado (fertilización, agua de riego y fijación atmosférica) que se estimó en 334 kg de N/ha, un 63% es aprovechado por la planta, un 1% se pierde por volatilización, un 2% es escurrimiento, el 18% se queda en el suelo y el

16% se lixivia hacia el acuífero. Al estimar el balance de Nitrógeno en el área afluyente al dren colector Arroyo 16 se obtuvo que de un 100% de N aplicado (3`321,974 kg) el 11% se encontró en el agua de drenaje, 63% fue aprovechado por los cultivos, 1% se volatilizó, 18% se quedó en el suelo y un 7% se lixivió.

La concentración estimada de Nitrógeno lixiviado en el bloque TD-8 y para el área afluyente al dren AR-16 resultó en 20.4 y 18.6 mg/L de N, respectivamente, ambas concentraciones sobrepasan el valor permisible para el consumo humano (10 mg/L-N); sin embargo, durante el trayecto a través del suelo y zona no saturada hacia el acuífero pueden ocurrir procesos de adsorción, fijación, desnitrificación e inmovilización, entre otros, que pueden limitar la cantidad de N que llegue al acuífero. Además, se puede producir una dilución del N en el agua del acuífero, por lo que es de esperar que en el acuífero las concentraciones no sean elevadas. El N determinado en el agua de los 2 pozos (~2 mg/L) se encuentra por debajo de límite permisible para uso y consumo humano (10 mg/L-N).

En cuanto al contenido de Nitrógeno en el agua de drenaje que se descarga en la bahía, el valor máximo registrado en noviembre, 2017 fue de 7.7 mg/L y en marzo, 2018 de 8.1 mg/L de N.

El balance de Fósforo realizado para todo el ciclo agrícola del trigo y del maíz permitió comprobar que del Fósforo total aplicado, que se estimó en 78 kg de P/ha, un 54% fue aprovechado por la planta, 45% se quedó adsorbido en el suelo y solo el 1% del total se encontró presente en el agua de escorrentía.

En el caso del Fósforo, y de acuerdo con la Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (2016) para la protección de la vida acuática, este elemento no se encuentra en concentraciones mayores al límite máximo permisible, que es de 5 mg/L, ya que sus valores en el agua que descarga en la bahía y en la propia bahía son inferiores a este valor oscilaron entre 0.1 y 0.4 mg/L de P Total.

Con respecto a las recomendaciones derivadas de esta investigación cabe señalar:

Para mejorar la estimación del balance hídrico se recomienda:

1.- Realizar la medición de los caudales de salida en los drenes desde el inicio del primer día de riego, y que dichas mediciones sean diarias (se sugiere hacer por lo menos 3 medidas al día) durante todo el periodo de riego. Estos aforos se deberían llevar a cabo durante los cuatro riegos del trigo y los seis riegos del maíz.

2.- Llevar a cabo pruebas de infiltración en la zona en varios puntos y profundidades para tener datos representativos de dicha variable, y así contar con un menor porcentaje de incertidumbre en los datos.

Para la estimación del balance de Nitrógeno se recomienda:

1.- Determinar en laboratorio el porcentaje de aprovechamiento de N por parte de la planta de trigo y el maíz.

2.- Conocer los tipos y cantidades de fertilizante que aplican los productores a sus cultivos y así contar con un valor del N aplicado específico para el área de estudio.

3.- Tomar muestras de agua de drenaje para todos los riegos aplicados a los cultivos de trigo y maíz (una muestra diaria durante todo el periodo de riego) para contar con datos de concentración de N más representativos.

Para la estimación del balance de Fósforo se recomienda:

1.- Determinar en laboratorio la cantidad de Fósforo necesaria para los cultivos.

2.- Analizar en laboratorio el Fósforo contenido en el suelo y, con ello, establecer que cantidad de Fósforo puede ser aprovechado por los cultivos con el fin de no aplicar más de necesario.

Para estudios posteriores en la zona de estudio, se recomienda, además, realizar un estudio de la presencia de cloruros en los diferentes pozos de agua para uso y consumo humano con el fin de identificar aquellos que tengan niveles de Cl^- que puedan afectar a la población; así como en los pozos para riego agrícola, ya que algunos cultivos son altamente sensibles a la salinización del agua de riego.

REFERENCIAS

- Aguilar, A., & Pérez, R. H. (2008). La contaminación agrícola del agua en México: retos y perspectivas. *Problemas del desarrollo*, 39(153), 205-215.
- Ahrens, T. D., Beman, J. M., Harrison, J. A., Jewett, P. K., & Matson, P. A. (2008). A synthesis of nitrogen transformations and transfers from land to the sea in the Yaqui Valley agricultural region of northwest Mexico. *Water Resources Research*, 44(W00A05), 1-13. doi:10.1029/2007WR006661
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (2006), *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma
- Aparicio, F. j. (2016). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Ascott, M. J., Goody, D. C., Wang, L., Stuart, M. E., Lewis, M. A., Ward, R. S., & Binley, A. M. (2017). Global patterns of nitrate storage in the vadose. *Nature Communications*, 8(1416). doi:10.1038/s41467-017-01321-w
- Ascott, M. J., Wang, L., Stuart, M. E., Ward, R. S., & Hart, A. (2016). Quantification of nitrate storage in the vadose (unsaturated) zone: a missing component of terrestrial N budgets. *Hydrological Processes*, 30, 1903–1915. doi:10.1002/hyp.10748
- Billen, G., Silvestre, M., Grizzetti, B., Leip, A., Garnier, J., Voss, M., Howarth, R., Bouraoui, F., Lepisto, A., Kortelainen, P., Johnes, P., Curtis, C., Humborg, C., Smedburg, E., Kaste, O., Ganeshram, R., Beusen, A., & Lancelot, C. (2011). Nitrogen flows from European watersheds to coastal marine waters. *The European Nitrogen Assessment* (págs. 271-297). Cambridge: Sutton M. A. Recuperado de <http://centaur.reading.ac.uk/28381/>
- Bouwman, L., Goldewijk, K. K., Van Der Hoek, K. W., Beusen, A. H., Van Vuuren, D. P., Willems, J., Rufino, M. C., & Stehfest, E. (2013). Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), 20882-20887. doi:10.1073/pnas.1012878108
- Bouyoucos, G.V. (1963). Directions for Making Mechanical Analysis of Soil by Hydrometer Method. *Soil Sci.* 42: 23-30.
- Bremner. (1986). Total Nitrogen. In *Methods of soil analysis* (pags. 1149-1178). Wisconsin, USA: In. C. A. Black.
- Briggs L. J and Shantz, H. L. (1911), The wilting coefficient for different plants and its indirect determination *Journal of the Washington Academy of Sciences* Vol. 1, No. 8, pp. 228-232
- Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., Heibloem, M. 1988. *Irrigation water management: Irrigation methods*. Training manual no 5. FAO Land and water development division, FAO, Rome.

- Cheng, W., Tsuruta, H., Chen, G., & Yagi, K. (2004). N₂O and NO production in various Chinese agricultural soils by nitrification. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 953–963. doi:10.1016/j.soilbio.2004.02.012
- CESAPEG. (2007). Manual de plagas y enfermedades en maíz. *Comité estatal de Sanidad Vegetal Guanajuato*.
- CONAGUA. (2012). Estadísticas del Agua en México. CONAGUA-SEMARNAT. Edición 2012. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-36-12.pdf>
- CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México. 17/04/2018, de CONAGUA-SEMARNAT. Edición 2016. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692>
- CONAGUA. (2018). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle del Yaqui (2640) Estado de Sonora. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104357/DR_2657.pdf
- Cortés-Jiménez, J. M., Troyo-Diéguez, E., Murillo-Amador, B., García-Hernández, J. L., Garatuza-Payán, J., & Lee, S. S. (2009). Índices de Calidad del Agua del Acuífero del Valle del Yaqui, Sonora. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 133-141.
- Cortés, J. M. (2009). *Fertilización*. Seminario sobre tecnología para la producción de trigo, Ciudad Obregón: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea* (Segunda ed.). Barcelona: Omega. España.
- Demin, P. (2014). Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego Métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_aportes_para_el_mejoramiento_del_manejo_de_los_sistemas_de_riego.pdf
- Díaz Delgado, C., Esteller Alberich, M. V., & López-Vera, F. (2005). *Recursos Hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica*. Montevideo/Toluca: Piraguazú Ediciones/CIRA-UAEM.
- DRRY. (2003). Estudio de Actualización Geohidrológica del Acuífero “Valle Del Yaqui” Municipio de Cajeme, Sonora, Departamento de Geología, Universidad De Sonora.
- DRRY. (2017). Distrito de riego del río Yaqui S. de R. L. de I. P. y C. V. Recuperado de: <http://drryaqui.org.mx> Consultado febrero 2017.
- DRRY. (2018). Distrito de riego del río Yaqui S. de R. L. de I. P. y C. V. Recuperado de: <http://drryaqui.org.mx> Consultado septiembre 2018.
- Emsley, J. (2001). *Nature's Building Blocks* (1ª ed.). Oxford (UK): Oxford University Press.

- Estrada-Botello, M. A., Nikolskii-Gavrilov, I., Gavi-Reyes, F., Etchevers-Barra, J. D., & Palacios-Vélez, O. L. (2001). Balance de Nitrógeno inorgánico en una parcela con drenaje subterráneo en el trópico húmedo. *Terra*, 189-198.
- FAO. (1990). Cálculo de ET0: MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH. *Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España*, 1-13.
- FAO. (1993). CROPWAT. Programa de ordenador para planificar y manejar el riego. Estudio Riego y Drenaje N° 46. Roma.
- FAO-AQUASTAT. (2014). global water information system. Recuperado de: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm>
- Fernández D. S., Martínez, M. R., Tavarez, C. A., Castillo, R., y Salas, R. (2012). *Estimación de las demandas de consumo de agua*. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. México.
- Fernández, R y Leyva, M. J. (2003). *Ecología para la Agricultura*. Ed Mundi Prensa, México.
- Flores, L. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*, Física de Suelos, México. UNAM
- Flores L., H., & Ruíz C., J. (1998). Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante un balance hídrico. *Terra Latinoamericana*, 16 (3), 219-229.
- Flórez-Tuta, N., Zution-Gonçalves, I., Rodrigues-Calvacante Feitosa, D., Agnellos-Barbosa, E., Ponciano-de Deus, F., Diego-Ribeiro, M., & Eiji-Matsura, E. (2013). Eficiencia de Aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión. *Agrociencia*, 107-119.
- Fuentes, J. L., & García, L. (2003). *Técnicas de Riego*. España: S. A. Mundi-Prensa Libros
- Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland, E. A., Karl, D. M., Michaels, A. F., Porter, J. H., Townsend, A. R., & Vörösmarty, C. J. (2004). Nitrogen cycles: past, present and future. *Biogeochemistry*, 70, 153-226.
- García E. (2004). Modificación al Sistema de Clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía UNAM.
- García, J., Díaz-Delgado, C., & Fonseca, C. (2018). *Diseño y evaluación de sistema para uso sostenible de agua en jardinería* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México.
- Gerritse, R.G. (1993). Prediction of travel times of phosphate in soils at a disposal site for wastewater. *Water Resources*, 27(2): 263-267.
- Glossaire - Eau & Milieux Aquatiques. (2019). Glossaire, eau, milieu aquatique, consultado en mayo de 2019. Disponible en: <http://www.glossaire-eau.fr/es>

- Gómez-Reyes, E. (2013). *Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: la cuenca del Valle de México*. Realidad datos y espacio. Revista Internacional de estadística y geografía
- Gonçalves, C. N., Ceretta, C. A; Basso, C. J. (2000). Sucessões de culturas com plantas de cobertura e milho em plantio direto e sua influência sobre o Nitrogênio no solo. *Ci. Solo*, 24, 153-159.
- González, A. L. (2012). *Determinación del destino del Nitrógeno aplicado a un cultivo de sésamo mediante la Técnica Isotópica*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.
- González-Pérez, Beatriz (2018). Tesis de doctorado en redacción, datos sin publicar. Zona de estudio DR041 y Bahía del Tóbari. Alumna del programa de Doctorado en Ciencias del Agua, Plan de estudios 2017-2020. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA-UAEMéx). Toluca, Estado de México.
- Grahmann, K., Govaerts, B., Fonteyne, S., Guzmán, C., Galaviz Soto, P. A., Buerkert, A., & Verhulst, N. (2016). Nitrogen fertilizer placement and timing affects bread wheat (*Triticum aestivum*) quality and yield in an irrigated bed planting system. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 106, 185-199. DOI: 10.1007/s10705-016-9798-6.
- Grahmann, K., Verhulst, N., Dittert, K., Govaerts, B., & Buerkert, A. (2018). High N fertilizer application to irrigated wheat in Northern Mexico for conventionally tilled and permanent raised beds: Effects on N balance and short term N dynamics. *J. Plant Nutr. Soil*, 606-620. doi:10.1002/jpln.201800011
- Harvey, R. W., Kinner, N. E., Bunn, A., McDonald, D., & Metge, D. (1995). Transport Behavior of Groundwater Protozoa and Protozoan-Sized Microspheres in Sandy Aquifer Sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(1), 209-217.
- INEGI. (2000). Síntesis de Información geográfica del estado de Sonora. (INEGI, ed.). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2004). Guías para la Interpretación Cartográfica de Edafológica. (INEGI, Ed.). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EDAFL.pdf>
- INEGI. (2014). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000 Serie II (Continuo Nacional)*. MÉXICO: INEGI.
- INIFAP. (2005). *La Fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México*. Celaya, Guanajuato: SAGARPA. México.
- Jackson M. L. (1982). Análisis químicos de suelos. 2da Edición. Traducción al español por J. Beltrán M., Editorial Omega. Barcelona, España.
- Lampkin, N. (1998). Agricultura Ecológica. 1ª edición. Ediciones Mundi-prensa. México.
- Ley Federal de Derechos. (2016). Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales. Comisión Nacional del Agua. Publicada el 14 de enero de 2017.
- Manahan, S. E. (2007). Introducción a la Química Ambiental., España: Editorial Reverté.

- Meisner, C. A., Acevedo, E., Flores, D., Sayre, K., Ortiz-Monasterio, I., & Byerlee, D. (1992). Wheat Production and Grower Practices in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico. Wheat Special Report No. 6. CIMMYT, México. D. F., México.
- Meyer-Aurich, A., Gandorfer, M., Trost, B., Ellmer, F., & Baumecker, M. (2016). Risk efficiency of irrigation to cereals in northeast Germany with respect to nitrogen fertilizer. *Agricultural Systems*, 149, 132-138. doi:10.1016/j.agsy.2016.09.006
- Millar, N., Urrea, A., Kahmark, K., Shcherbak, I., Robertson, G., & Ortiz-Monasterio, I. (2018). Nitrous oxide (N₂O) flux responds exponentially to nitrogen fertilizer in. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 125-132.
- Monreal, R., Rangel-Medina, M., Minjarez-Sosa, I., Castillo-Gurrola, J., Morales-Montaño, M., (2003). Estudio de actualización geohidrológica del acuífero valle del Yaqui, Municipio de Cajeme, Sonora: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Informe Técnico.
- Monreal, R., Rangel-Medina, M., Grijalva-Montoya, A., Minjarez-Sosa, I., & Morales-Montaño, M. (2011). Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas: caso del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 119-135.
- Navarro, S., Navarro, G. (2013). Química Agrícola. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. 3a edición. Ed Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación 31 de diciembre de 2002, D. F. p. 1-67.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación 3 de febrero de 1995, D. F. p. 1-71.
- Olmedo Vázquez, V., & Camacho Poyato, E., & Rodríguez Díaz, J., & Minjares Lugo, J., & Hernández Hernández, M. (2017). Determinación de indicadores de gestión en los módulos del Distrito de Riego No. 041, Río Yaqui (Sonora, México). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49 (2), 149-168
- Olsen, R.A & Kurtz L. T. (1982). Crop Nitrogen requirements, utilization and fertilization. *Nitrogen Agriculture Soils. Agronomy Monograph*, 22. 567-604.
- Ortiz, L. (2009). *Técnicas de Riego*. Seminario sobre tecnología para la producción de trigo, Ciudad Obregón: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Papineau, F., Gallichand, J., Broughton, R. S., et Beaulieu, R. (1992). Gestion et qualité de l'eau des bassins versants agricoles. 16ième Colloque de génie rural. Canada

- Pedroza González, E., & Hinojosa Cuéllar, G. A. (2014). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego: breve introducción didáctica*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pei, H., Scanlon, B. R., Shen, Y., Reedy, R. C., Long, D., & Liu, C. (2015). Impacts of varying agricultural intensification on crop yield and groundwater resources: comparison of the North China Plain and US High Plains. *Environmental Research Letters*. 10. doi:10.1088/1748-9326/10/4/044013
- Peele, T. C. (1937). The Relation of certain physical characteristics to the erodibility of soils. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 2, 97-100.
- Pereira Morales, C., Maycotte Morales, C., Restrepo, B. E., Francesco, M., Calle Montes, A., & Velarde, M. J. (2011). *Edafología 1*. Unión Europea: Espacio Gráfico Comunicaciones S.A.
- Pereira, L. S., Juan Valero, J. A., Picornell Buendía, M. R., & Tarjuelo Martín-Benito, J. M. (2004). *El Riego y sus Tecnologías*. Lisboa: Editora Europa-América.
- Peterson, R. F. 1965. Wheat: Botany, cultivation and utilization. N. Polunin (ed.). World Crops Books, London, Inglaterra. 422p
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente* (3a ed.). Silsoe (UK): MP.
- Portocarrero, R., Acreche, M., & García, J. (2015). Presencia de nitratos en la zona no saturada del suelo y acuífero en el área cañera de la llanura deprimida tucumana no salina. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*, 5(7), 82-88.
- Primo, E. y Carrasco, J- M. (1987). Química Agrícola I. Suelos y Fertilizantes. Tomo 6. Ed. Alhambra. Madrid.
- Quiñonez, H. E., Fuentes, C., Rendón, L., Hernández, F. R., Sánchez, R., Magaña, G., et al. (1997). *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Ramírez, M., E. C., & Rodríguez, D. A. (2009). Sistema para la identificación de Agua en Pozos Petroleros (SIAPP). *Universidad de las Ciencias Informáticas*.
- Rangel-Medina, M., Monreal Saavedra, R., & Martínez Sosa, I. (2013). Hidrogeoquímica de la Salinidad y Origen del Agua Subterránea en el Acuífero Valle del Yaqui, Sonora, Mex. En A. A. Castañeda Villanueva, *El reto del abastecimiento del agua potable Calidad de agua y su gestión*. Jalisco.
- Rice, E. (1995). General Nitrate Background. Stanford, USA, 1-9.
- Richardson, A. E., & Simpson, R. J. (2011). Soil Microorganisms Mediating Phosphorus Availability. *Plant Physiology*, 156, 989–996. doi:10.1104/pp.111.175448
- Riley, W. J., Ortiz-Monasterio, I., & Matson, P. (2001). Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 223-236.

- Salcedo-Pérez, E., Galvis-Spinola, A., Hernández-Mendoza, T. M., Rodríguez-Macias, R., Zamora-Natera, F., Bugarin-Montoya, R., & Carrillo-González, R. (2007). La Humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 419-425.
- Sánchez Cohen, I., Esquivel Arriaga, G., López Santos, A., Inzunza Ibarra, M. A., & Catalán Valencia, E. A. (2011). Balance hídrico como fundamento para toma de decisiones en agricultura de temporal. *Relación Agua Suelo Planta-AGROFAZ*, 55-63.
- SAGARPA. (2011). Agronomía del Trigo en el Sur de Sonora. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Libro Técnico No. 6. México
- SAGARPA. (2011). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Monitor Agroeconómico. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/monitor%20estados/Sonora.pdf>. Consultado marzo 2018
- Salvatierra, B. (2006). Eficiencia de aplicación del riego en Andalucía. Recuperado de: <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/-/action/90004fc0-93fe-11df-8d8b-f26108bf46ad/e5747030-1bb8-11df-b7e2-35c8dbbe5a83/es/02f9e190-faff-11e0-929f-f77205134944/alfrescoDocument?i3pn=contenidoAlf&i3pt=S&i3l=es&i3d=e5747030-1bb8-11df-b7e2->
- SAGARPA. (2017). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, *Planeación Nacional Agrícola 2017-2030*, primera edición Mexico, 2017.
- SIAP. (2018). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. *Monografías de productos agroalimentarios mexicanos*.
- Schoups, G., Addams, C. L., Minjares, J. L., & Gorelick, S. M. (2006). Sustainable conjunctive water management in irrigated agriculture: Model formulation and application to the Yaqui Valley, Mexico. *Water Resources Research*, 42(W10417). doi:10.1029/2006WR004922
- Schulten, H.R. & Schnitzer, M. (1998). The chemistry of soil organic nitrogen: a review. *Biologic Fertility Soils*, Berlin. 26: 1-15
- Slafer, G.A., Rawson, H.M., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Aust. J. Plant Physiol.* 21, 393-426.
- Stein, L., & Klotz, M. G. (2016). The Nitrogen Cycle. *Current Biology*, 26, 83-101.
- Stipp, S.R. & Prochnow, L.I. (2008). Maximização da eficiência e minimização dos impactos ambientais da adubação nitrogenada. *Informações agronômicas*, Piracicaba. 124: 1-7.
- Teófilo Salvador, E., Morales Reyes, G. P., Esteller Alberich, M. V., & Muciño Castañeda, R. (2019). Parámetros que controlan la percolación profunda en un cultivo de trigo. *Terra Latinoamericana*, 57-68.

- Tundisi, J. G. (2003). *Água no século XXI: Enfrentando a escassez*. São Carlos: RiMA IIE. 248 p. Brazil.
- UNESCO. (1971). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Métodos de cálculo del balance hídrico, Guía internacional de investigación y métodos.
- U.S.D.A, (1993). Clarification of Soil Texture Class Boundaries, *Soil Survey Manual*. U.S. Govt. Soil Survey Division Staff
- Van Meter, K. J., Basu, N. B., & Veenstra, J. J. (2016). The nitrogen legacy: emerging evidence of nitrogen accumulation in anthropogenic landscapes. *Environmental Research Letters*, 11. doi:10.1088/1748-9326/11/3/035014
- White, R. E. (1987). Introduction to the Principles and Practice of Soil Science (Second ed.).
- Wilcox, L.V. (1955). Classification and use of irrigation waters. US Department of Agriculture, Circular 969, Washington, DC, USA.
- WWF. (2005). *Curso de riego para agricultores*. (J. Bartolomé & I. Vega, Eds.), *Proyecto de autogestión del agua en la agricultura* (p. 35). WWF/Adena. Recuperado de: http://assets.wwf.es/downloads/curso_de_riego_definitivo.pdf
- Yamaguchi, J. (1991). Fertilizer-nitrogen absorption determined by de ¹⁵N isotopic and difference methods. *Jpn. Agric. Res. Q* 25, 93-100.