

**RÉGIMEN HIROLÓGICO EN EL PARTIDO DE PEHUAJÓ: SU
RELACIÓN CON EL AGUA SUBTERRANEA**

Autor: Esnal Agustina

Director: Lic. Marta Haydeé Deluchi

Trabajo Final de la Licenciatura en Geología de la Facultad de Ciencias Naturales y
Museo Universidad Nacional de La Plata

2020

Resumen

El Partido de Pehuajó se ubica en el ambiente de la Pampa Arenosa, en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, caracterizado por paleoformas de origen eólico, emplazadas en un ambiente arreico, con muy baja pendiente regional. Estas condiciones geomorfológicas-geológicas determinan un movimiento preferencial del agua en sentido vertical dado por los procesos de infiltración y evapotranspiración. Los períodos de excesos y déficit hídricos se traducen en la somerización y profundización de los niveles freáticos, que en condiciones extremas afloran y alimentan cuerpos lagunares, adquiriendo distintas dimensiones y geometría, o se secan completamente (lagunas temporarias). El objetivo general de este trabajo final de licenciatura consiste en aportar una mayor precisión en el modelo conceptual del comportamiento hidrológico a nivel del Partido de Pehuajó mediante una actualización de datos hidrometeorológicos y de imágenes satelitales. Se obtuvieron datos meteorológicos y freáticos de la Estancia El Tostado y de la Estación Meteorológica de Pehuajó, Estación Magdala y Mones Cazón. Se procesaron imágenes Landsat de los años 2009-2012-2015 y 2017, efectuando índices de agua, MNDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado) y NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada) para definir la evolución del agua en superficie en distintas situaciones hídricas.

Se identificaron tres zonas geomorfológicas: dunas longitudinales, parabólicas y zona de transición. Se reconocieron distintos registros de precipitaciones entre el norte y el sur del partido y años con diferencias en la distribución de los excesos y déficit hídricos. Se observó una respuesta concordante de estos registros con los niveles freáticos y el almacenamiento superficial, que indican la fuerte interrelación agua superficial-agua subterránea, y el control geomorfológico en la configuración del almacenamiento en superficie, dadas las diferencias identificadas entre el sector norte y el sur.

Abstract

The Pehuajó Department is located in the Sandy Pampas, on the northwestern of the Buenos Aires Province. The study area is characterized by aeolian paleoforms, situated in an arheic environment with a very low regional slope. These geomorphologic-geologic conditions determine a preferential vertical movement of the water because the processes of infiltration and evapotranspiration. The periods of water excesses and deficits is translated into the shallowing and deepening of the water table, which in extreme conditions emerges and feeds lagoon bodies, acquiring different dimensions and geometry, or completely drying up (temporary lagoons). The general objective of this undergraduate dissertation is to provide more accurate information to the conceptual model of hydrological behavior at the Pehuajó Department by updating hydrometeorological data and satellite images. Meteorological and phreatimetric data were obtained from Estancia El Tostado and the Pehuajó Meteorological Station, Magdala and Mones Cazón Stations. Landsat images from the years 2009, 2012, 2015 and 2017 were processed, making water indexes, MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) to define the evolution of water in the surface and in different hydric situations. Three geomorphological zones were identified: longitudinal dunes, parabolic dunes and a transition zone. Also the different rainfall records between the north and south of the Department and different years in the distribution of water excesses and deficits were recognized. A concordant response from these records was observed with the water table and surface storage, which indicate the strong interrelation between surface water and groundwater, and the geomorphological control in the configuration of surface storage, given by the differences identified between the northern and the southern sectors.

Índice

Introducción	1
Objetivos	2
Área de estudio	2
Características generales del área de estudio.....	3
Materiales y Métodos	7
Datos hidrometeorológicos.....	7
Datos de niveles freáticos.....	8
Datos de satélites y técnicas utilizadas.....	11
Resultados	15
Rasgos Geomorfológicos.....	15
Hidrometeorología.....	16
Variaciones de niveles freáticos.....	23
Imágenes satelitales y su interpretación.....	33
Conclusiones	45
Bibliografía	47
Anexo	51

Introducción

El Partido de Pehuajó en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires se desarrolla en un ambiente de llanura, donde las características propias del medio físico imponen un predominio de los movimientos verticales del agua (evapotranspiración – infiltración) sobre los horizontales (escurrimientos) y una fuerte interrelación entre el agua superficial y el agua subterránea (Kruse et al, 2001). En el comportamiento hidrológico adquieren importancia las variaciones en la capacidad de almacenamiento superficial (lagunas) y en la capacidad de almacenamiento subterráneo (profundidad de los niveles freáticos) (Kruse et al, 2007, Kruse y Ainchil, 2017).

Rojó et al. (2011) analizan las variaciones de la evapotranspiración como resultado de distintas prácticas agrícolas, su influencia en los excesos hídricos y por tanto en las posibilidades de infiltración y recarga al acuífero freático. Para ello consideran dos cultivos, soja y alfalfa, con requerimientos de agua muy disímiles, mostrando en términos anuales diferencias de excesos.

Existen trabajos a nivel regional sobre la relación agua superficial-agua subterránea, vinculados a los fenómenos de anegamiento, (Kruse y Laurencena, 2005); así como también una síntesis de las distintas regiones hidrogeológicas de la provincia de Buenos Aires efectuado por Nilda Gonzalez, 2005. Un aporte al ordenamiento territorial y ambiental del noroeste bonaerense fue efectuado por Cabral et al, 1995,1996, mediante una caracterización desde el punto de vista geológico, geomorfológico y hidrológico.

En cuanto a las paleoformas eólicas que prevalecen en el paisaje del partido de Pehuajó Zárate et al. (2005), las relacionan a condiciones climáticas templadas y de escasa cantidad de agua disponible correspondientes al Holoceno medio. Los sedimentos pampeanos conforman un sustrato de limos compactados con acumulaciones calcáreas sobre los que se apoyan los sedimentos eólicos.

Hasta el año 1880 el suelo del partido de Pehuajó se encontraba cubierto por vegetación natural. A partir de la llegada de los primeros colonos y del ferrocarril se comienza con los cultivos principalmente de alfalfa. Por condiciones edáficas y climáticas se comienza a desarrollar la ganadería. A partir del año 1973, coincidente con condiciones climáticas y de mercado, la agricultura pasa a tener un papel destacado (Dillon et al, 2006). El área experimentó en los últimos 50 años un aumento en las precipitaciones. Ello significó un cambio en su régimen hidrológico, lo cual produjo un beneficio para sus posibilidades productivas (Forte Lay et al, 2005, 2008). En la última década el

cultivo de soja experimentó un crecimiento en desmedro de otros cultivos, la ganadería decayó, aparecieron los feedlots lo que produjo una reducción de áreas de verdes y pastura (Zaniboni, 2012).

Existen antecedentes referidos a situaciones hidrológicas extremas previas, ocurridas en el noroeste bonaerense, entre otras Kruse et al, 1992, 1993, 1994, 1995, 1998; Mehl et al, 1993. Una actualización y revisión acorde a la nueva información hidrológica generada permitirá avanzar en la formulación de un modelo conceptual hidrológico de mayor detalle.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo final de licenciatura consistió en actualizar la caracterización del comportamiento hidrológico en el Partido de Pehuajó. Los objetivos específicos incluyeron reconocer e identificar alternancia de ciclos húmedos y secos acaecidos desde principios del siglo pasado hasta situaciones particulares de déficit y excesos hídricos que se produjeron en los últimos años. Efectuar una evaluación hidrometeorológica y de imágenes satelitales de esos eventos.

Se plantea como hipótesis general de trabajo que los ascensos y profundizaciones de los niveles freáticos se reflejan en la expansión o retracción de los cuerpos de agua en superficie. Las respuestas de situaciones extremas de anegamiento se asocian a una sucesión de períodos con excesos hídricos que dan lugar a niveles próximos a la superficie o aflorantes en las partes bajas del terreno.

Área de estudio

El área de estudio corresponde al Partido de Pehuajó, que ocupa una superficie del orden de 4500 km², incluyendo la mayor parte de lo que se conoce tradicionalmente como “pampa arenosa” y las cabeceras del Río Salado en el sector Noreste.

El Partido de Pehuajó se encuentra al noroeste de la provincia de Buenos Aires, entre los 61°- 63° de longitud oeste y 35° - 37° de latitud sur (Fig. 1), abarcando ocho localidades (Guanaco, Chiclana, Francisco Madero, Juan José Paso, Mones Cazón, Magdala, Capitán Castro, Pehuajó) y trece parajes (Abel, Larramendy, Ancón, Gnecco, Las Juanitas, Gironde, Asturias, Alagón, Albariño, La Cotorra, El Recado, Inocencio Sosa, Pedro Gamen). Según datos del INDEC, 2010 cuenta con 41.233 habitantes.

El clima de la región es templado subhúmedo, con una época menos lluviosa en invierno. La precipitación media anual es de 885 mm y el promedio de temperaturas anuales es de 15.3 °C.

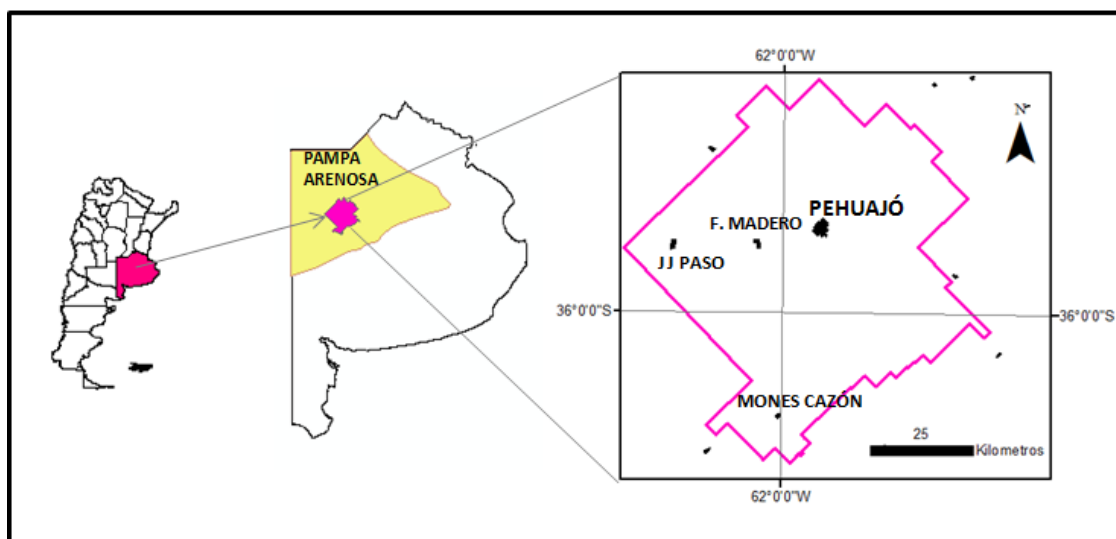


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio. Partido de Pehuajó, región de la Pampa Arenosa, provincia de Buenos Aires.

Características generales del área de estudio

Geología. Comportamiento hidrológico.

La secuencia geológica comienza con las rocas del basamento Precámbrico (acuífugo), que se componen de granitos, metamorfitas, calizas y cuarcitas. Continúa con la Fm. Abramo (Salso 1966), del Cretácico superior, constituida por limolitas arenosas pardo rojizas y areniscas finas más claras con niveles de arcillas pardo rojizos y verdosos, con anhidrita y calcita como cemento, depositadas en ambientes de agua tranquila. Luego la Formación Las Chilcas (Maastrichtiano-Paleoceno), con alternancia de grandes espesores acuicludos y acuíferos Neógenos, estos últimos con agua de mala calidad. Por encima se hallan arcillas continentales muy plásticas pardo-rojizas, acuicludas y pertenecientes a la Formación Olivos, de edad Miocena. Posteriormente se deposita la Formación Paraná (Mioceno). La base está constituida por arcillas marinas verdes a grisáceas, acuíferas. Por encima la secuencia continúa con un espesor de arcillas marinas verdes-azuladas que conforman el techo de dicha formación. En la mayor parte de la región sobreyace la Formación Araucano (Plioceno-Pleistoceno), portadora de

aguas salobres y de escaso rendimiento. Continúan los característicos limos loessoides del Pampeano (Pleistoceno) alojando a un acuífero semilibre, con limos arcillosos a arcillas limosas en su base que sirven de techo acuitardo a la siguiente unidad acuífera. Por último, se depositan los términos arenosos y limo-arenosos eólicos representados por la Formación Junín (De Salvo et al. 1969) y equivalentes. En estas formaciones se desarrolla la zona no saturada y generalmente también el acuífero freático, principal proveedor de aguas de baja salinidad, cubriendo aproximadamente el 72% del área (González, 2005).

Tabla 1. Geología y comportamiento hidrolitológico de las formaciones presentes en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

Unidad geológica	Litología	Comportamiento hidrolitológico
Pospampeano (Fm. Junín y otras)	Arenas finas, limos, limos arcillosos	Zona No-Saturada / acuífero (freático)
Pampeano	Limos loessoides, calcáreos. Limos arenosos Limos arcillosos	Acuífero (freát+semilibre) Acuitardo
Fm. Araucano / Fm. Arenas Puelches	Arenas limosas yesíferas, limos Arenas medianas a finas	Acuífero (semiconfinado)
Fm. Paraná (superior) Fm. Paraná (inferior)	Arcillas verdes, verde-azuladas Arenas medianas a finas, marinas	Acuícludo Acuífero (confinado)
Fm. Olivos (superior) Fm. Olivos (inferior)	Arcillas rojizas Arenas medianas a gruesas, gravas basales	Acuícludo Acuífero (confinado)
Fm. Las Chilcas	Limolitas, arcilitas	Acuícludo
Fm. Abramo	Areniscas consolidadas, limolitas arenosas	Acuícludo. Acuífero (confinado)
Basamento hidrogeológico	Cuarcitas, calizas. Granitos, gneisses	Acuífugo

Fuente: “Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires”, (González. N, 2005).

Geomorfología

El partido de Pehuajó está dentro del ambiente del noroeste de la provincia de Buenos Aires, conformado por una amplia cubeta topográfica con una pendiente regional suave hacia el E-NE (Zárate et al. 2005). Las cotas predominantes son de 90 y 100 msnm, aunque hacia el sur se registran localmente cotas de 110 msnm y hacia el norte de 80 msnm.

La mayoría del territorio presenta cuerpos de agua permanentes o temporarios de variada profundidad y extensión. Estas lagunas tienen una distribución, morfología y tipología que se relaciona con el clima, el relieve y la geología (Dangavs, 2005). Las lagunas del partido de Pehuajó al igual que el resto de la “Pampa Arenosa” responden a

condiciones de un paleoclima más árido con respecto al actual donde se formaron dunas con distinta configuración y lagunas adaptadas a dichas morfologías (lineales y parabólicas). Frenguelli (1956) en base a criterios morfológicos, genéticos, climáticos y estructurales las agrupó dentro de la región de la Pampa Arenosa la cual carece de desagüe, con abundantes cubetas en depresiones intermedanosas de rumbo N-NE y relictuales de antiguas vías de desagüe.

En la actualidad, las geoformas se hallan prácticamente estabilizadas dadas las condiciones de humedad, que posibilitaron el desarrollo de vegetación. Las primeras imágenes satelitales registradas particularmente en períodos húmedos posibilitaron reconstruir la morfología conformada por dunas y zonas de interdunas, y permitieron a su vez, analizar la dinámica del almacenamiento de agua en superficie (Hurtado et al, 2005).

La mínima pendiente regional, los rasgos geomorfológicos, y una alta capacidad de infiltración del terreno, no han permitido la elaboración de cauces que drenen organizadamente las aguas precipitadas del área. Es así como la transferencia vertical (evaporación-infiltración) predomina notablemente sobre la horizontal (escurrimiento superficial y subterráneo), y la buena capacidad de almacenaje superficial y subterráneo es el rasgo más destacado (Kruse et al, 2001).

En función de las geoformas predominantes resulta posible realizar subdivisiones dentro de la Pampa Arenosa la cual abarca una superficie de 38.000 km². En el sector norte las geoformas eólicas se expresan como médanos longitudinales. Constituyen un sistema de lomadas estrechas y alargadas separadas entre sí por depresiones paralelas. En conjunto estas formas se orientan de SO a NE en la parte sur y rotan hacia el NO en la parte norte, formando un gran arco con su concavidad hacia el oeste (Dillon et al, 1985).

Las dunas alcanzan hasta 100 km de longitud y en sentido transversal de 2 a 3 km, mientras la altura no supera los 6 m (Malagnino, 1989). Entre los médanos se desarrollan áreas relativamente planas y deprimidas, de 0,5 a 3 km de ancho, que es donde se producen los anegamientos en los períodos con exceso hídrico.

La génesis de las dunas longitudinales tiene varias interpretaciones. Según Iriondo y Krohling (1995), está vinculada a un anticiclón ubicado a varios centenares de kilómetros al oeste de las formaciones estudiadas.

Los suelos de las partes altas de las dunas longitudinales tienen un escaso desarrollo de horizontes. Se trata esencialmente de suelos de aptitud agrícola-ganadera. En las interdunas se desarrollan suelos con horizontes subsuperficiales algo arcillosos y

cementados, alcalinos, con pobre permeabilidad y baja capacidad ganadera (Hurtado et al, 2005).

El sector sur de la Pampa Arenosa, está conformado por médanos parabólicos. La generación de movimientos eólicos de tipo remolino explica el socavamiento de pequeñas cubetas, en cuyo borde NE se acumula el material extraído de las mismas, constituyendo un montículo irregular arenoso (Hurtado et al, 2005). Estas geoformas a su vez se presentan actualmente modificadas tanto por la acción hídrica como eólica, suavizando las pendientes y disminuyendo la amplitud topográfica. La máxima diferencia entre las crestas y las depresiones son aproximadamente 4 m, y en general las mayores alturas no superan los 3 m (Cabral et al, 1995, 1996, Hurtado et al, 2005).

Las acumulaciones arenosas, topográficamente más elevadas, configuran áreas locales de recarga mientras que las áreas bajas funcionan como zona de descarga, encontrándose en estas últimas algunos sectores salinizados (Hurtado et al, 2005).

Existen variaciones en los perfiles de suelo, desde aquellos sin ningún tipo de diferenciación de horizontes, ubicados en las partes medanosas, hasta los que presentan horizontes muy contrastantes en las cubetas o sus adyacencias. Las partes relativamente altas tienen perfiles en los que se insinúan horizontes B. Estas partes más planas, donde la densidad de formas medanosas es menor, constituyen la superficie agrícola de la región, la cual puede llegar a anegarse en períodos de precipitaciones excesivas (Hurtado et al, 2005).

Materiales y Métodos

El desarrollo del trabajo incluyó tareas de campo y de gabinete. Las tareas de campo estuvieron centradas en el reconocimiento de rasgos geológicos y geomorfológicos y en la búsqueda de datos en organismos públicos (INTA) y productores agropecuarios del partido de Pehuajó. Como resultado de esta tarea se obtuvieron datos meteorológicos y freáticos de la Estancia El Tostado y de la Estación Meteorológica de Pehuajó. A través de la comunicación con propietarios particulares del partido se consiguieron datos de lluvias y niveles freáticos de las localidades de Mones Cazón y Magdala.

Se recopiló información de diferentes fuentes para la caracterización y reconocimiento de las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas más influyentes en el comportamiento hidrológico de la región. Se efectuó el análisis de los datos obtenidos, que se presentan en los resultados.

Datos hidrometeorológicos

Se obtuvieron datos mensuales de precipitaciones y temperatura de la Estación Pehuajó AERO del Servicio Meteorológico Nacional ($35^{\circ}52'$ latitud sur $61^{\circ}54'$ longitud oeste) para el período 1911-2018; datos mensuales de la Estancia El Tostado ($35^{\circ}36'$ latitud sur $62^{\circ}05'$ longitud oeste) desde 1-11-2005 hasta 1-12-2007 y registro mensual de la Estación Magdala ($36^{\circ}01'$ latitud sur $61^{\circ}47'$ longitud este) para el período 2008 - 2018. Para 2015 se contaron con datos de precipitaciones y temperaturas mínimas y máximas diarias de la Estación Meteorológica Pehuajó Aero.

Se analizó el registro pluviométrico 1911-2018, se efectuó el cálculo de tendencias, a partir del cual se seleccionaron períodos que evidenciaban estados hídricos contrastantes de déficit y excesos. Se calculó la evapotranspiración potencial mediante el método de Thornthwaite -Mather para el módulo 1911-2018, para 2012 (precipitaciones máximas) y para 2009 (precipitaciones mínimas). Si bien 2013 presenta las menores precipitaciones de los años más recientes, sucede al año con el máximo registro de lluvias de los 107 años del módulo analizado, motivo por el cual las imágenes satelitales de ese año no evidencian una situación hídrica de sequía, debido a la permanencia de agua en superficie para los primeros meses de 2013. El año 2009 sucede a un año con una precipitación de 783,5 mm, valor por debajo de la media (883 mm), lo que definió

la selección y análisis de imágenes satelitales de dicho año para estimar el agua acumulada en superficie.

Para 2015, se efectuó el cálculo mediante los métodos de Thornthwaite –Mather, (1955) y Hargreaves et al, (1982), este último método requiere datos de lluvias diarias y temperaturas mínimas, medias y máximas diarias, disponibles sólo para ese año.

A su vez para un análisis de mayor detalle de las fluctuaciones de los niveles freáticos, se efectuaron balances hídricos de los años con información freatimétrica.

La reserva de agua útil del suelo se estableció en un valor de 100 mm teniendo en cuenta las características del suelo de la región estudiada. En esta región, predominan suelos clasificados como Hapludoles con textura superficial franca a franco-arenosa (Diaz Zorita et al. 2004). Mediante el balance hídrico se calculó la evapotranspiración real (ETR) y los excesos y déficits hídricos.

Datos de niveles freáticos

Para realizar el análisis de las variaciones de los niveles freáticos se recopilaron datos brindados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Pehuajó y particulares. Se contaron con datos de 13 freatímetros. La Tabla 2 muestra información de cada una de las estaciones y su ubicación geográfica se presenta en la Figura 2.

Freatímetros	Coordenadas X	Coordenadas Y	Cota (m)	Frecuencia de medición	Periodos de medición
S1	5995977.28 m S	594491.38 m O	96	Mensual	08-2015/03-2019
S2	5996131.74 m S	594168.05 m O	96		
S3	5997015.84 m S	594173.28 m O	93		
S4	5997050.08 m S	595991.67 m O	95		
M1	6012948.96 m S	609607.87 m O	89	Mensual	08-2008/08-2018
N1	6054995.89 m S	582199.22 m O	86	Semanal	03-2005/12-2007
N2	6055640.95 m S	585034.80 m O	86		
N3	6057003.65 m S	579267.24 m O	87		
N4	6058216.08 m S	582158.50 m O	88		
N5	6052162.36 m S	586336.62 m O	86		
N6	6054332.81 m S	577105.89 m O	87		
N7	6047952.24 m S	581905.68 m O	86		
N8	6051206.37 m S	579211.09 m O	87		

Tabla 2. Coordenadas UTM S, cotas, frecuencia de medición y periodos de medición de los freatímetros dentro del Partido de Pehuajó, Provincia de Buenos Aires.

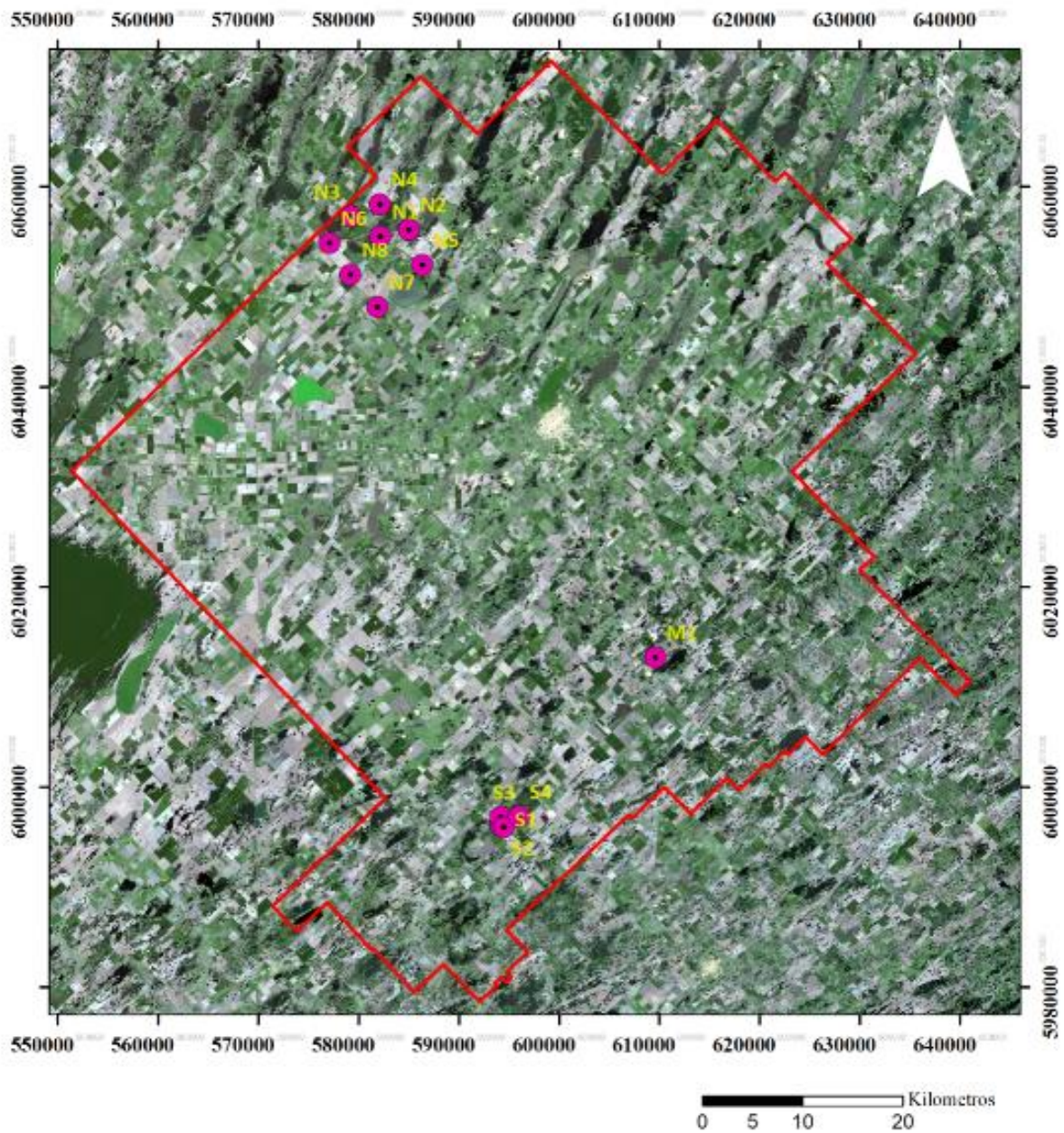


Figura 2. Ubicación de freáticos. N: Ea El Tostado (sector norte). S: Mones Cazón (sector sur). M: Magdala.

Se establecieron tres sectores. Un sector norte integrado por ocho freáticos (N1-N8), ubicados dentro de la estancia El Tostado que se indican en la Figura 3, en una imagen a una escala de mayor detalle. Un sector sur integrado por cuatro freáticos (S1-S4), ubicados en la localidad de Mones Cazón (Fig. 4), y hacia el este, un último sector integrado por sólo un freático (M1), ubicado en la localidad de Magdala (Fig. 5).

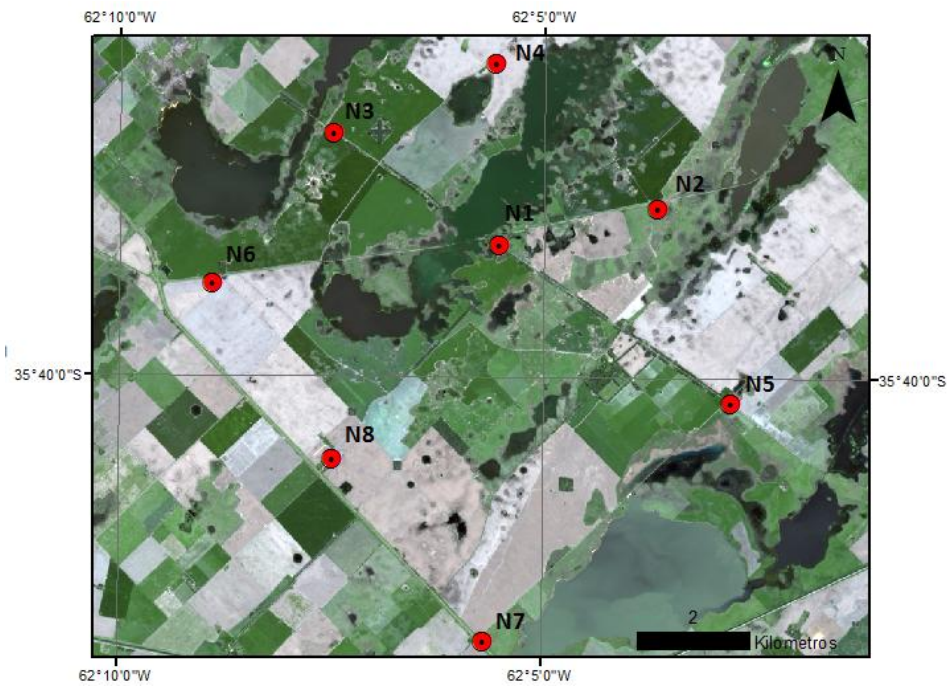


Figura 3. Posición de frentímetros de la localidad Ea. El Tostado, imagen satelital Landsat OLI-Color Real.

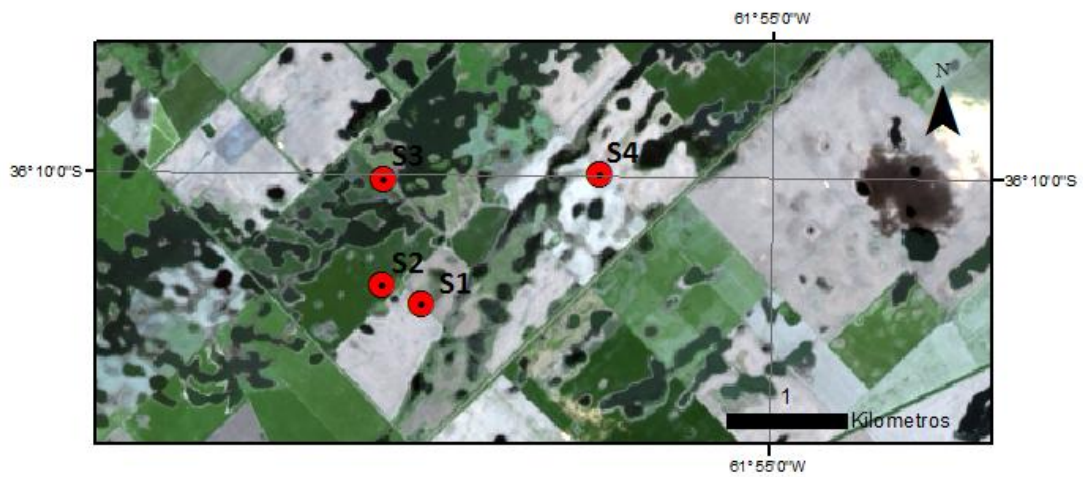


Figura 4. Posición de frentímetros de la localidad de Mones Cazón, imagen satelital Landsat OLI-Color Real.

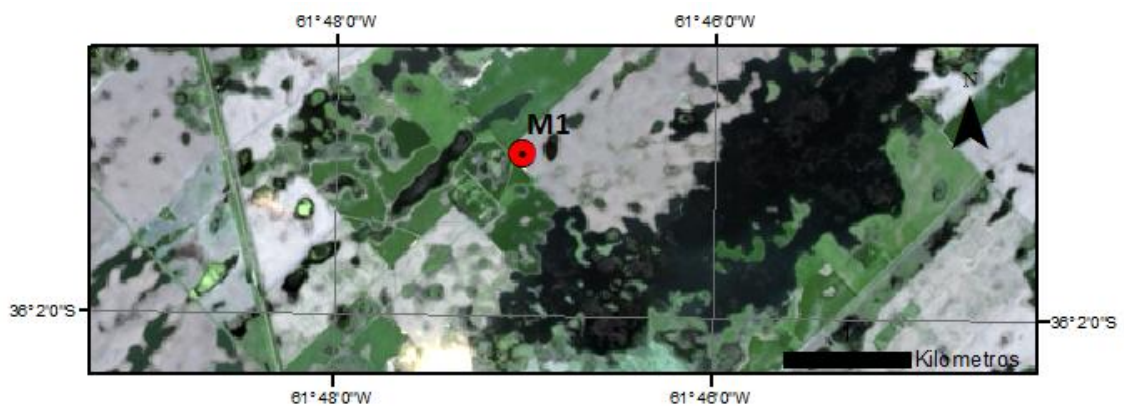


Figura 5. Posición de frentímetros de la localidad de Magdala, imagen satelital Landsat OLI-Color Real.

Datos de Satélites y metodología utilizada

Se efectuó el análisis visual de imágenes históricas mediante Google Earth, para reconocer las superficies cubiertas con agua contrastadas con los registros de lluvias, como paso previo a la descarga de imágenes. Los años seleccionados fueron 2009, 2012 y 2015, años con déficit hídrico, excesos y con valores de precipitaciones próximo a la media del módulo considerado (1911-2018) respectivamente.

El análisis de la evolución temporal de la cubierta de agua se hizo para 3 momentos de los años seleccionados, tratando que fueran coincidentes para su comparación, (factor supeditado a la cobertura de nubes). Se determinaron así los meses de marzo, septiembre y diciembre, con excepción de diciembre de 2012 y septiembre de 2015 dado que las imágenes presentaban alta cobertura de nubes, siendo reemplazadas por imágenes de enero de 2013 y octubre de 2015.

Se seleccionaron las imágenes satelitales de la serie Landsat, disponibles en sitios de internet (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (Servicio Geológico de Estados Unidos) (<http://www.conae.gov.ar>) (Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Argentina).

Las imágenes Landsat para los años seleccionados fueron del sensor Thematic Mapper (TM) del Landsat 5 para el año 2009 y para 2012, imágenes del sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM), Landsat 7. Para 2015, se seleccionaron imágenes satelitales correspondientes al sensor OLI del Landsat 8, evitando la utilización de imágenes Landsat 7 con fallas en el registro.

Las imágenes de 2012, Landsat 7, presentan un “bandeado” con falta de información hacia los bordes de las imágenes, debido a que en 2003 hubo un fallo en el Scan Line Corrector (SLC). La falla de este instrumento produjo que sólo pueda ser aprovechado al 70% de su rendimiento. Debido a esto se corrigieron las bandas utilizadas en los índices de agua (NDWI, MNDWI), mediante una extensión del programa ArcGIS denominada Landsat-Toolbox.

A su vez se descargó una imagen Landsat de octubre de 2017, con el fin de reconocer la distribución y superficies de agua, comparando su respuesta frente a una diferencia de lluvias muy pronunciada entre las estaciones de Pehuajó y Magdala.

Las imágenes descargadas están disponibles con georreferenciación, proyectadas en coordenadas UTM, datum WGS84.

Imágenes seleccionadas:

LT05_L1TP_227085_20090306_20161029_01_T1
 LT05_L1TP_227085_20090930_20161020_01_T1
 LT05_L1TP_227085_20091203_20161017_01_T1
 LE07_L1TP_227085_20120322_20161202_01_T1
 LE07_L1TP_227085_20120914_20161128_01_T1
 LE07_L1TP_227085_20130120_20161126_01_T1
 LO82270852015114COA00, FILE_DATE 2015-04-24
 LO82270852015290COA00 FILE_DATE 2015-10-17
 LO82270852015354COA00 FILE_DATE 2015-12-20
 LO82270852017295COA00 FILE_DATE 2017-10-22

Lansat 5		
Bandas espectrales	Longitud de onda (μm)	Resolucion espacial (m)
Banda 1 visible	0.45 - 0.52	30
Banda 2 visible	0.52 - 0.60	30
Banda 3 visible	0.63 - 0.69	30
Banda 4 Infrarrojo cercano	0.77 - 0.90	30
Banda 5 Infrarrojo cercano	1.55 - 1.75	30
Banda 6 Térmica	10.40 - 12.50	120
Banda 7 Infrarrojo medio	2.08 - 2.35	30

Tabla 3. Información general del satélite Landsat 5 fuente: USGS United States Geological Survey, Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Lansat 7		
Bandas espectrales	Longitud de onda (μm)	Resolucion espacial (m)
Banda 1 visible	0.45 - 0.52	30
Banda 2 visible	0.52 - 0.60	30
Banda 3 visible	0.63 - 0.69	30
Banda 4 Infrarrojo cercano	0.77 - 0.90	30
Banda 5 Infrarrojo cercano	1.55 - 1.75	30
Banda 6 Térmica	10.40 - 12.50	60
Banda 7 Infrarrojo medio	2.08 - 2.35	30
Banda 8 Pancromática	0.52 - 0.90	15

Tabla 4. Información general del satélite Landsat 7 fuente: USGS United States Geological Survey, Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Lansat 8		
Bandas espectrales	Longitud de onda (μm)	Resolucion espacial (m)
Banda 1 visible	0.43 - 0.45	30
Banda 2 visible	0.450 - 0.51	30
Banda 3 visible	0.53 - 0.59	30
Banda 4 Roja	0.64 - 0.67	30
Banda 5 Infrarrojo cercano	0.85 - 0.88	30
Banda 6 Infrarrojo de onda corta 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 Infrarrojo de onda corta 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 Pancromática	0.50 - 0.68	15
Banda 9 Cirrus	1.36 - 1.38	30

Tabla 5. Información general del satélite Landsat 8 fuente: USGS United States Geological Survey, Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Para diferenciar las superficies cubiertas por agua se resolvió emplear índices de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o $NDWI_{Xu}$) mediante el software ENVI v5.3. Sólo para las imágenes correspondientes a los meses de septiembre de 2009, septiembre de 2012 y octubre de 2015 se utilizaron dos índices, el mencionado y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), con el fin de comparar los resultados.

El Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (Xu, 2006) posee la siguiente fórmula:

$$MNDWI = \frac{\text{Verde} - IR_{\text{Medio}}}{\text{Verde} + IR_{\text{Medio}}}$$

Índice de Agua de Diferencia Normalizada, según la fórmula de Mc Feeters, 1996:

$$NDWI = \frac{\text{Verde} - NIR}{\text{Verde} + NIR}$$

Los valores de los índices están normalizados entre -1 y 1, siendo los valores positivos los que caracterizan zonas con agua. Se puede observar que la fórmula de Xu (MNDWI), sustituye el NIR (infrarrojo cercano) por el IR Medio (infrarrojo medio), lo cual permite realzar los cuerpos de agua y eliminar el “ruido” de suelo, vegetación y áreas urbanizadas.

Con el mencionado software, se empleó la herramienta de “Toolbox”, Band Algebra y se seleccionó Band Math, se introdujo el algoritmo de MNDWI. Para el caso de Landsat 7 y 5, se usaron las bandas B2 (longitud de onda verde) y B5 (longitud de onda del infrarrojo medio). Para la imagen Landsat 8, se emplearon las bandas B3 y B6 que

pertencen a las longitudes de onda indicadas. Se obtuvieron imágenes en escala de grises, donde las superficies más reflectivas (“blancas”) identifican cuerpos de agua y las de menor reflectividad (negras, grises oscura y medio) a cubiertas de vegetación, suelos sin cultivos y áreas urbanas. Luego se efectuó el cálculo estadístico del MNDWI a nivel del partido de Pehuajó y se exportó el histograma.

A los fines de visualización y para estimar las superficies con agua, se aplicó sobre el MNDWI, la opción “New Raster Color Slice”, que por defecto divide al histograma en 16 clases (Fig. 6). Se eligieron diferentes umbrales para separar agua/tierra mediante el análisis de cada histograma (Fig. 7).

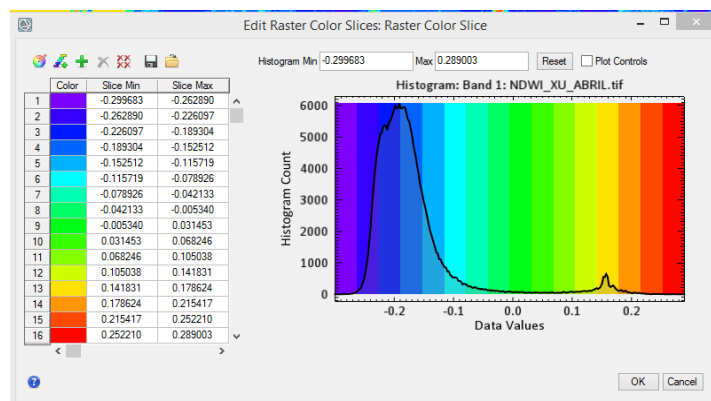


Figura 6. Histograma New Raster Color Slice

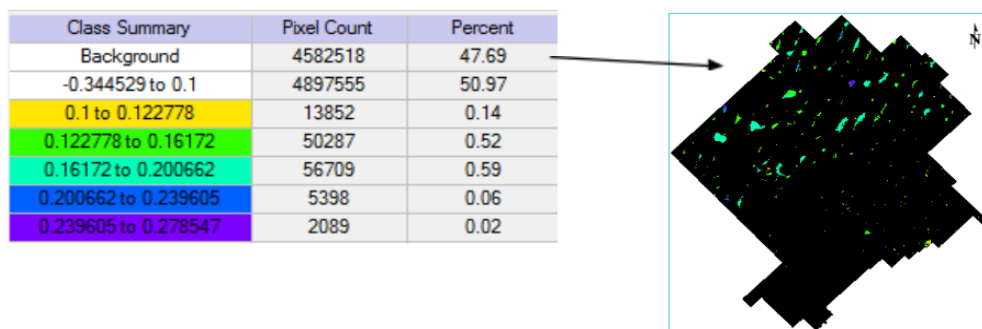


Figura 7. Selección de umbral agua-tierra y clases de las superficies con agua.

Finalmente se extrajeron y recalcularon los porcentajes (Statistics for All Color Slices). A su vez se efectuó en todos los casos una composición RGB IRColor (RGB 432, Landsat 5 y 7; RGB, 543, Landsat 8) donde se identifican las parcelas con vegetación en color rojo y los cuerpos de agua en tonalidades de azul. En particular para las imágenes de septiembre 2009, 2012 y octubre 2015, se realizaron composiciones color real, sólo a los fines de visualización. (RGB 321, Landsat 5 y 7; RGB, 432, Landsat 8).

Resultados

Rasgos geomorfológicos

En base al análisis visual de las imágenes satelitales se distinguieron dentro del partido de Pehuajó, tres regiones con geformas de origen eólico, un sector norte caracterizado por dunas longitudinales, un sector sur donde se identifican dunas parabólicas y una zona de transición tal como se observa en la Figura 8.

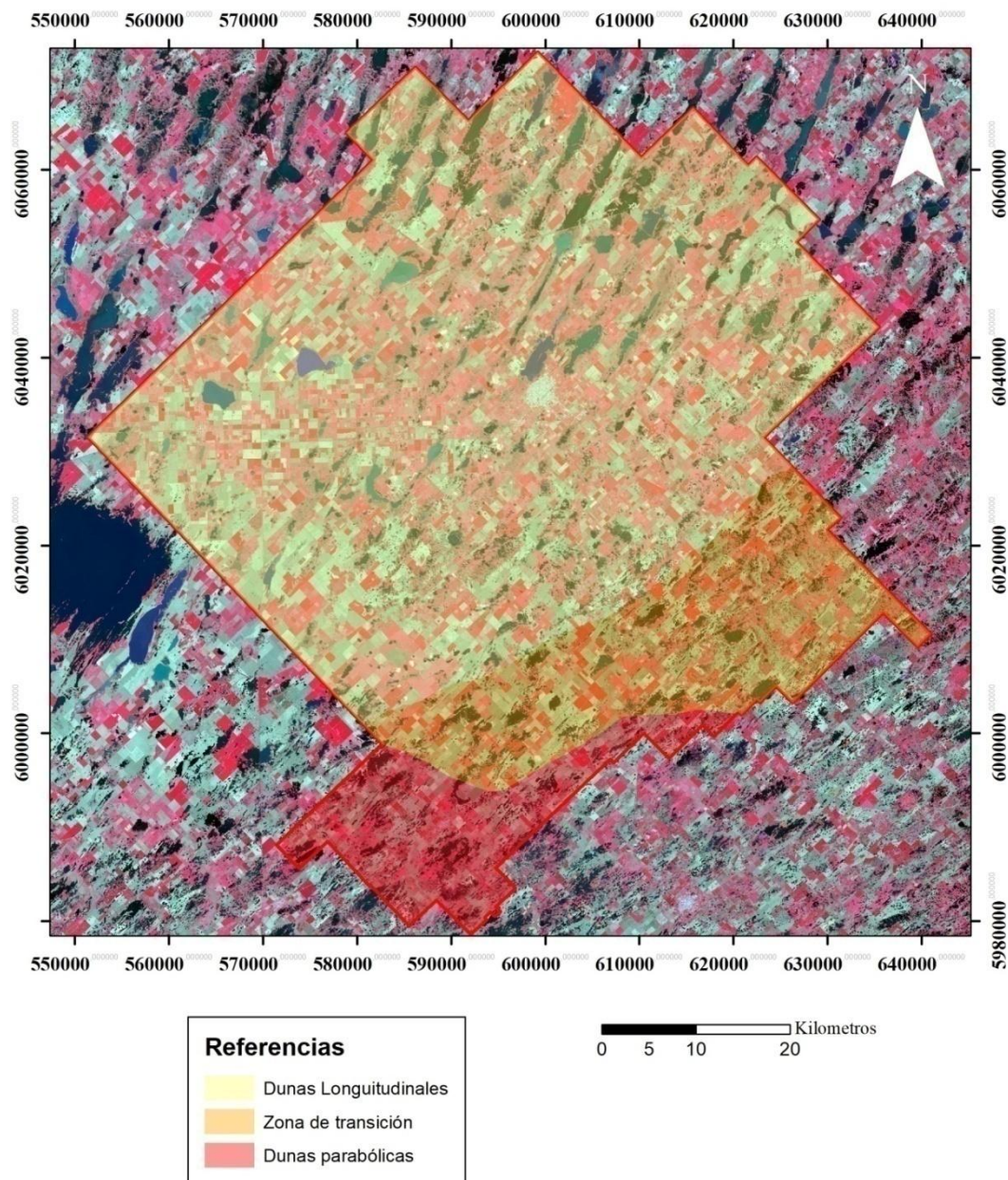


Figura 8. Geomorfología del Partido de Pehuajó, Provincia de Buenos Aires

En el sector de dunas longitudinales los cuerpos de agua se presentan en general bien demarcados en tramos lineales, definidos por pendientes más pronunciadas con respecto a la zona de transición y dunas parabólicas. Estas últimas muestran cuerpos de agua con bordes poco definidos y mayor cantidad de pequeñas depresiones diseminadas, controlados por geoformas con pendientes más suaves.

Hidrometeorología

La precipitación media mensual del período 1911-2018 (883 mm) (Fig. 9) indica que el partido de Pehuajó posee un régimen Atlántico en donde las estaciones de primavera-verano registran las mayores precipitaciones, siendo marzo el mes con los mayores valores medios (119,5 mm). Las menores precipitaciones se dan en las estaciones de otoño e invierno, siendo el mes de agosto el que posee las menores lluvias con un valor medio de 28.3 mm.

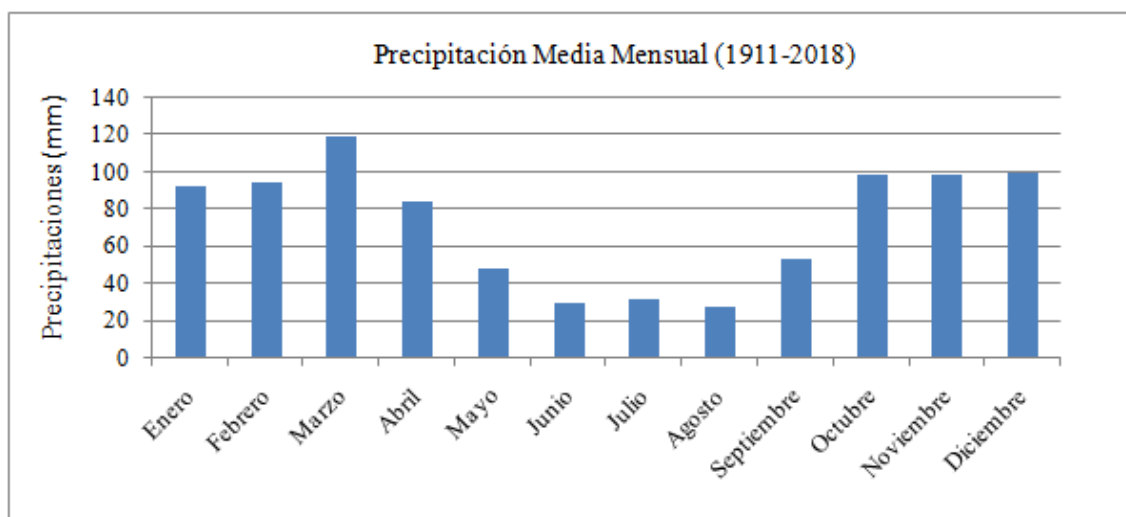


Figura 9. Precipitación media mensual, periodo 1911-2018. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

En la figura 10 se observa la evolución de las precipitaciones anuales desde 1911 hasta 2018 (107 años) de la Estación Meteorológica Pehuajó AERO. Se destacan tres picos para los años más lluviosos, el primero corresponde a 1914 con una precipitación anual de 1327 mm, el segundo pico a 1973 con 1500 mm y el tercer pico al 2012 con 1580 mm de precipitación anual, constituyendo el año más lluvioso de todo el periodo.

Los años menos lluviosos presentan picos de mínima con valores inferiores a 600 mm desde comienzos del registro hasta 1970, año en que empiezan a incrementarse las lluvias con el consecuente aumento de los valores mínimos, con excepción de 2013 que marcó un total de 530 mm. Podemos destacar valores mínimos en 1916 con 380 mm y más recientemente en 2009 con 637 mm (año que se utilizó para el análisis con imágenes).

La tendencia lineal de la serie de datos anuales muestra que existe un incremento de lluvias desde 1911 a 2018, con valores de 800 mm a 950 mm/año. En la tendencia polinómica de la serie se puede ver la alternancia entre períodos secos y húmedos. Existe un ciclo de elevadas precipitaciones en los años 1911-1933 (22 años), luego descienden en el período 1933-1967 (34 años), se repiten un ciclo húmedo, 1967-2005 (38 años), y una tendencia a un ciclo seco desde 2005, para los 12 últimos años del registro.

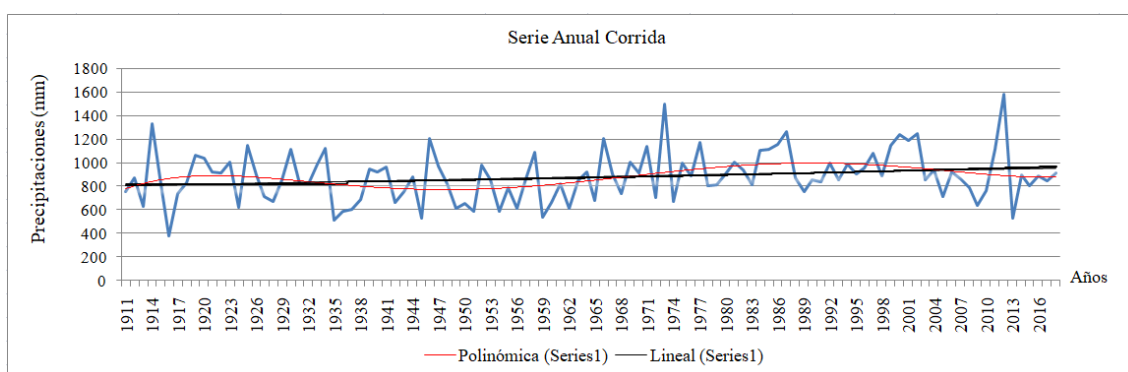


Figura 10. Serie anual corrida, periodo 1911-2018. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

Si se comparan los registros meteorológicos de la Estancia El Tostado y la Estación Pehuajó AERO para el período enero 2006 - diciembre 2007 se define que ambos muestran valores de precipitaciones similares (figuras 11a y 11b), con valores de 1830 mm para Pehuajó y 1835 mm para El Tostado. Se destaca que entre agosto de 2006 y junio de 2007, las precipitaciones muestran una distribución mensual con ciertas diferencias, aunque el total precipitado es similar (Pehuajó: 930 mm – El Tostado: 932 mm).

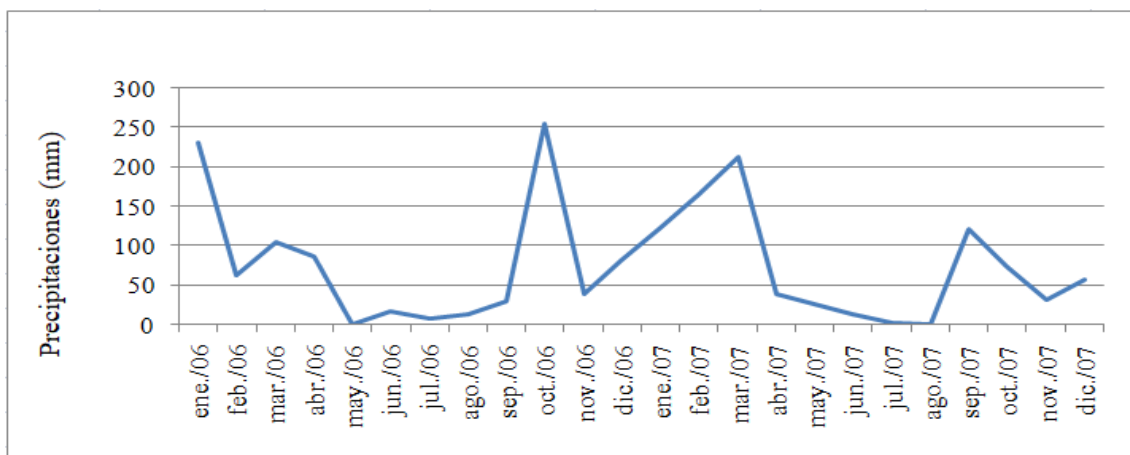


Figura 11a. Serie mensual corrida, periodo 2006-2007. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

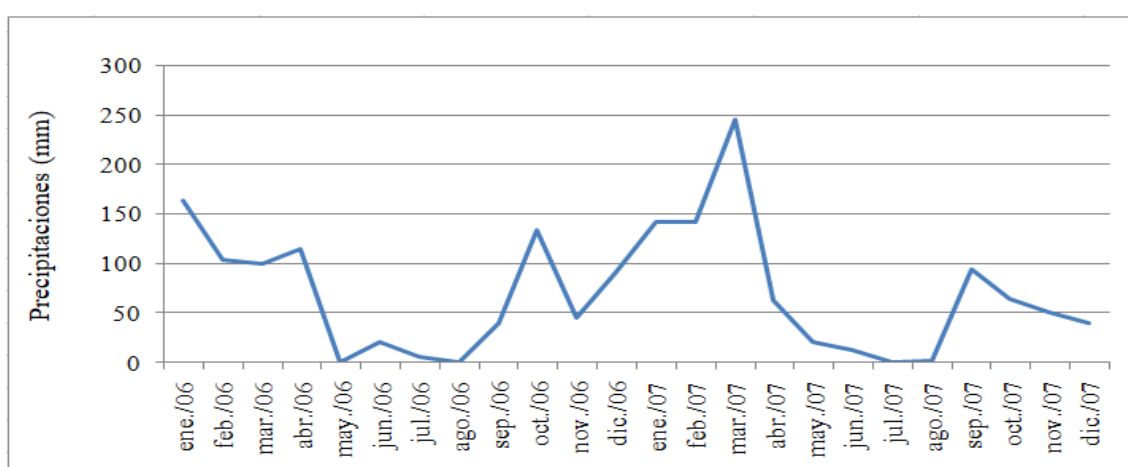


Figura 11b. Serie mensual corrida, periodo 2006-2007. Estación meteorológica Ea. El Tostado.

De la misma forma se compararon los registros de lluvias de Magdala y Pehuajó para el periodo enero 2008 – septiembre 2018. Las medias para Pehuajó y la Magdala, fueron de 883 mm y 934 mm respectivamente (Fig. 12a y 12b), lo cual significa una precipitación de 51 mm superior en la última estación.

Entre septiembre de 2011 y enero 2013(excesos hídricos) Pehuajó presenta un pico muy marcado en noviembre de 2011 con precipitaciones que superan los 350 mm. Para el mismo periodo en Magdala los picos no son tan pronunciados siendo próximos a 250 mm. Haciendo la suma de las precipitaciones para ese periodo se obtiene un valor de 2073 mm para Pehuajó y de 1978 mm para Magdala, lo cual se refleja en la cubierta de agua que se puede apreciar en las imágenes de 2012 (Fig. 24a-24b y 24c).

Para el periodo septiembre 2016 – enero 2018 se observa un máximo de precipitaciones próximo a 300 mm en Magdala en febrero de 2017, mientras que en Pehuajó no alcanza

a los 250 mm. La diferencia de precipitaciones para este periodo fue de 245 mm, lloviendo en Pehuajó 1309 mm y 1554 en Magdala.

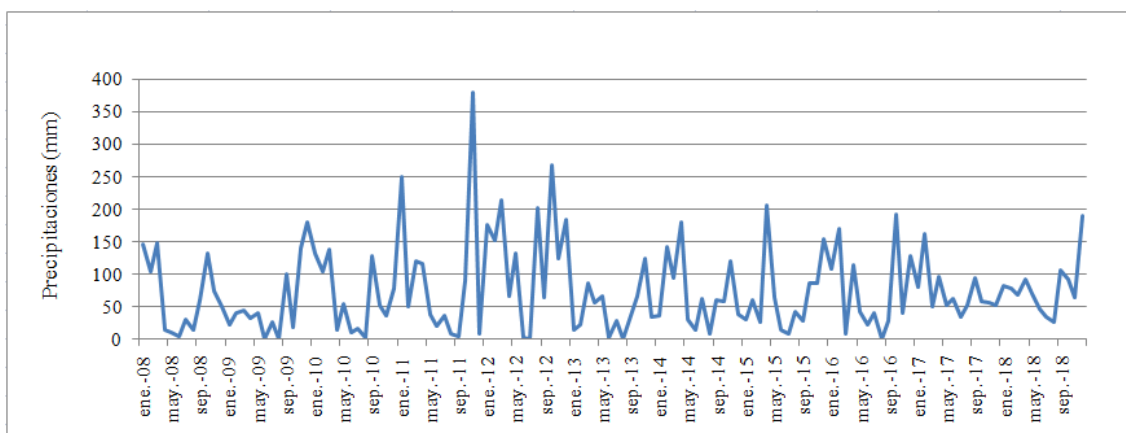


Figura 12a. Serie mensual corrida, periodo 2008-2018. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

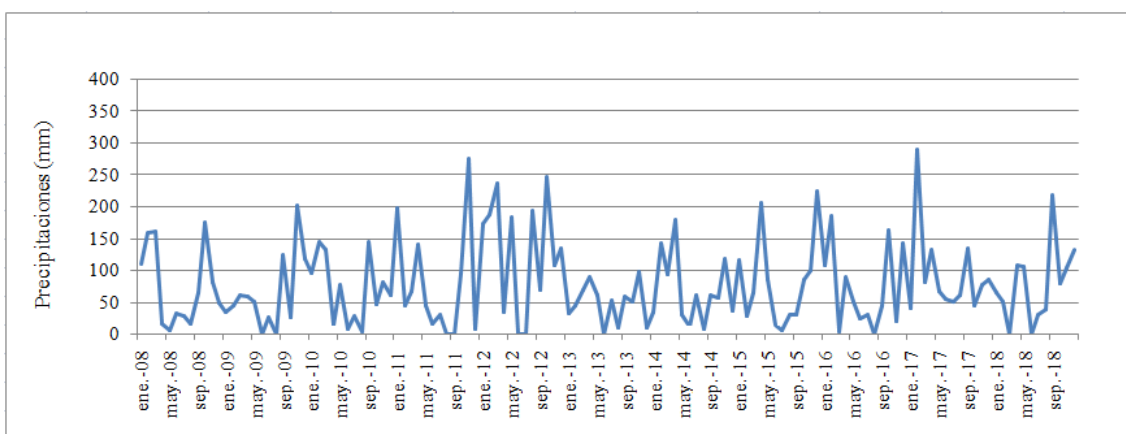


Figura 12b. Serie mensual corrida, periodo 2008-2018. Estación Magdala.

La precipitación media anual (1911-2018) es de 883 mm, alcanzando la evapotranspiración potencial anual un valor de 779 mm, y la evapotranspiración real un valor de 760 mm. Los meses más lluviosos muestran valores de 60 mm a 130 mm y los menos lluviosos corresponden a valores de precipitaciones de 30 mm. De acuerdo al balance hídrico los excedentes hídricos suceden preferencialmente entre marzo y noviembre (Fig. 13) mientras que los déficits ocurren en diciembre, enero y febrero donde la evapotranspiración domina por sobre la precipitación.

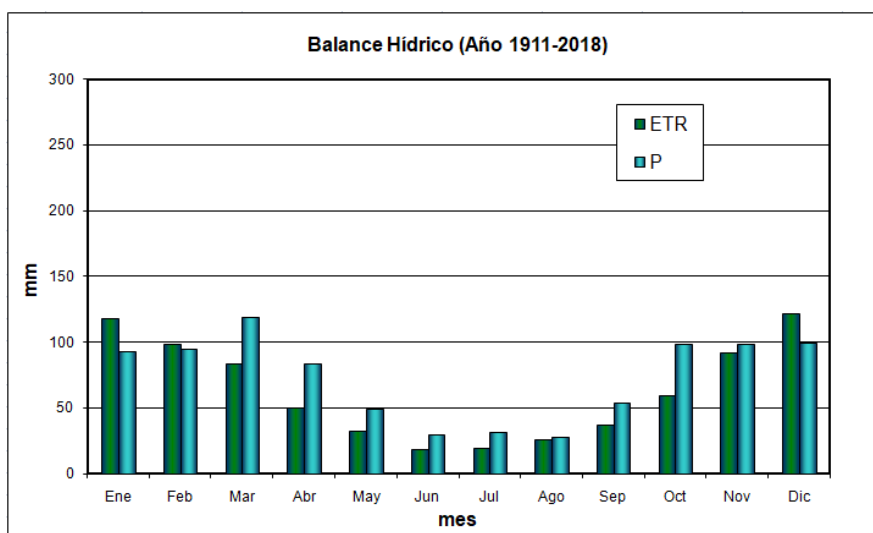


Figura 13. Balance Hídrico, periodo 1911-2018. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

Condiciones húmedas

Para 2012 (Fig. 14) los meses más lluviosos son agosto, octubre, diciembre, enero, febrero y marzo, con valores de precipitaciones que van de 120 mm a 270 mm. Los excedentes hídricos ocurren durante todo el año ya que las precipitaciones dominaron por sobre la evapotranspiración, excepto en junio y julio donde fueron mínimas con valores de 26 mm, coincidente con los meses donde la evapotranspiración real es prácticamente nula. La precipitación anual para este año fue de 1580 mm alcanzando la evapotranspiración potencial anual un valor de 779 mm y la evapotranspiración real un valor de 774 mm.

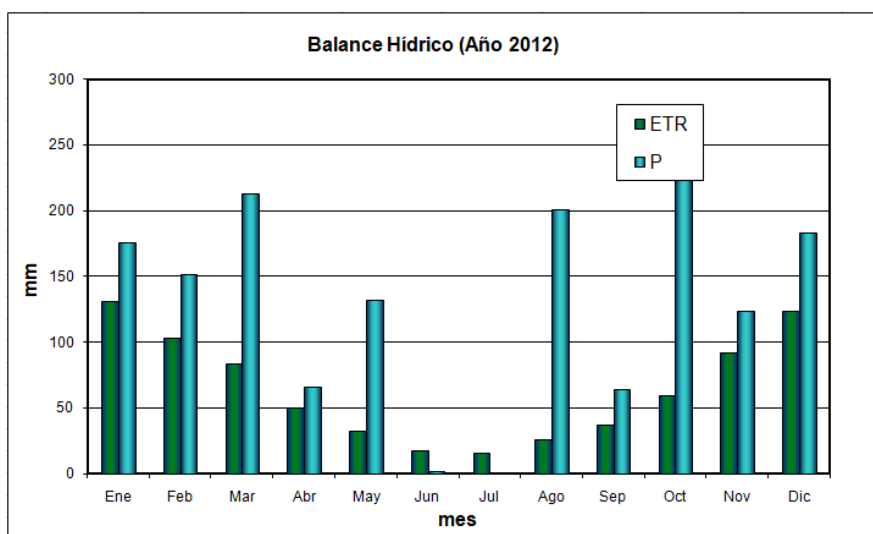


Figura 14. Balance Hídrico. Año 2012. Condiciones de excesos hídricos. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

Condiciones secas

En 2009 la precipitación anual fue de 638 mm (Figura 15), la evapotranspiración potencial anual alcanzó un valor de 779 mm y la evapotranspiración real un valor de 617 mm. El déficit hídrico predomina todo el año en donde las precipitaciones fueron muy escasas y la evapotranspiración dominó por sobre ellas. En los meses con mayores precipitaciones que son septiembre, noviembre y diciembre, con valores de 100 mm a 180 mm, ocurren los excesos hídricos.

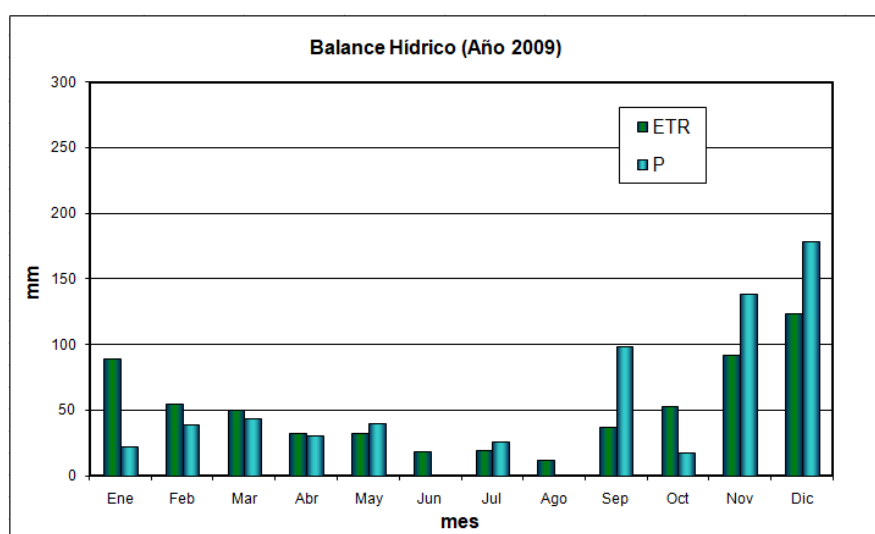


Figura 15. Balance Hídrico. Año 2009. Condiciones de déficit hídrico. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

Condiciones medias

Para 2015 (Fig. 16) los meses con mayores precipitaciones fueron octubre, noviembre diciembre y abril, con valores entre 85 mm y 200 mm. Los excedentes hídricos ocurren durante abril, mayo, agosto, octubre y diciembre. El déficit hídrico tiene lugar en los meses restantes. La precipitación anual para este año fue de 800 mm, valor cercano a la media anual de la serie analizada. La evapotranspiración potencial anual calculada por el método de Thornthwaite -Mather arroja un valor de 779 mm y la evapotranspiración real un valor de 661 mm. Por otro lado, el método de Hargreaves (Fig. 17) en comparación al anterior da valores más elevados de evapotranspiración potencial con un resultado de 1309 mm. La evapotranspiración real arrojó un valor de 762 mm.

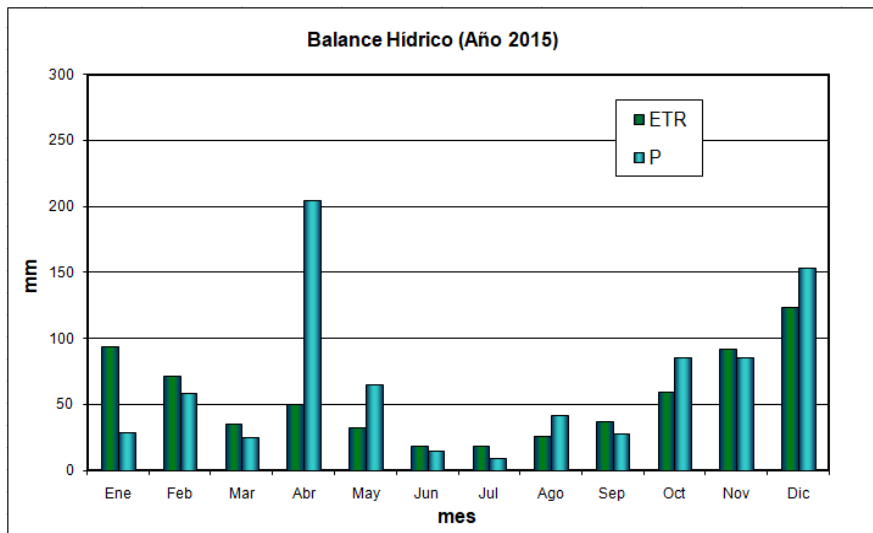


Figura 16. Balance Hídrico. Año 2015. Coincidente con la precipitación media anual de la región. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

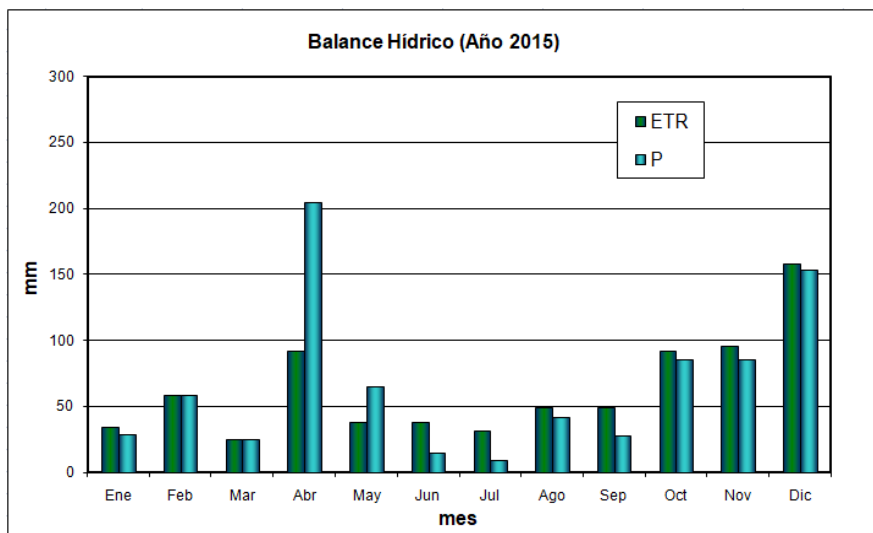


Figura 17. Balance Hídrico. Año 2015. Coincidente con la precipitación media anual de la región. Método Hargreaves. Estación meteorológica Pehuajó AERO, Servicio Meteorológico Nacional.

Variaciones de niveles freáticos.

Los tres sectores con freatómetros descritos en materiales y métodos se ubican en dos zonas geomorfológicas distintas: dunas longitudinales (freatómetros N) y zona de transición (freatómetros M y S), aunque estos últimos (S) están en el límite entre la zona de transición y las dunas parabólicas.

Los freatómetros N (período analizado 11/2005 – 12/2007), muestran los niveles más superficiales para N1 y N2, y los más profundos para N7 y N8, mientras que N3, N4, N5 y N6 tienen niveles intermedios con respecto a los anteriores.

Los balances hídricos de 2006-2007 (Fig. 19a y 19b) indican para noviembre y diciembre un déficit hídrico pronunciado. Los meses de mayo, julio y agosto registran también déficit, que se manifiesta con mayor intensidad en 2006.

Las profundidades de niveles freáticos en N1 y N2 (Fig. 18a y 18b), ubicados en zona de interduna, varían entre 1 m y profundidades máximas de 1,8 y 2,4 m respectivamente, siendo las mayores fluctuaciones en N2 (1,3 m) tal como se puede apreciar en la Figura 18b. Los niveles muestran una profundización en febrero-marzo de 2006 donde si bien no hay déficit hídrico, las lluvias de diciembre de 2005 están por debajo de los 30 mm (Fig. 18b) y el exceso hídrico de enero de 2006 no alcanza a compensar el déficit. En el balance se puede observar valores iguales o próximos de precipitación y evapotranspiración real, ETR, (Fig.19a) para enero, febrero y marzo de 2006. Septiembre de 2006 también sucede a meses con déficit hídrico que se manifiesta en el descenso de los niveles. El otro registro con niveles más profundos es en enero de 2007, donde se observa (Fig. 19b) valores de lluvias y ETR similares, que suceden a noviembre y diciembre de 2006 con déficit hídrico. A partir de octubre de 2007 los niveles comienzan a descender coincidente con los meses de mayor ETR y déficit hídrico.

Los meses con excesos hídricos más marcados en 2006 son abril y octubre, con precipitaciones que superan los 100 mm y valores relativamente bajos de ETR. Si bien el mes de enero presenta el máximo de precipitaciones, posee igualmente un valor elevado de ETR y por tanto los niveles continúan descendiendo. Luego de acumulaciones de excesos en los meses siguientes se observa el ascenso de los niveles. En 2007, marzo y septiembre presentan los mayores excesos hídricos con lluvias

próximas a los 250 mm y 100 mm respectivamente, que se manifiesta en el ascenso de los niveles freáticos.

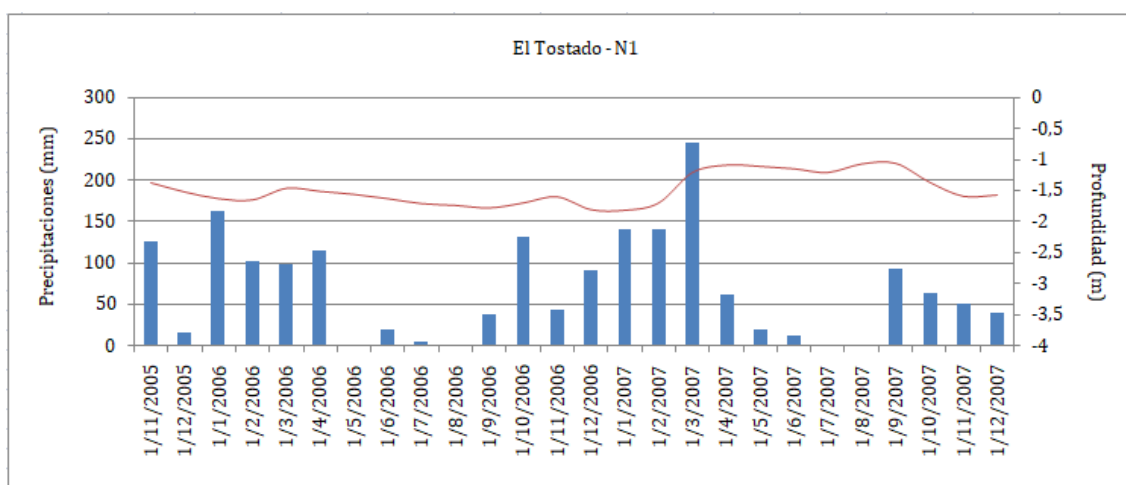


Figura 18a. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo noviembre 2005-diciembre 2007. Freatímetro N1- Ea. El Tostado.

Los freáticos N3-N4-N5-N6 (Fig.18c-18d-18e y 18f) presentan profundidades del nivel freático mayores a los anteriores alcanzando los 3 m, mientras que los niveles más altos llegan a profundidades de 1,6 m, con fluctuaciones medias de 1 m. Presentan un comportamiento similar a los freáticos N1 y N2. El freático N3 muestra descenso de niveles más pronunciados en julio y agosto de 2006 y 2007 coincidente con los meses de mínimas precipitaciones y mayor déficit hídrico.

El freático N6, al igual que los freáticos N7 y N8, muestra en marzo de 2007 una marcada profundización y el ascenso de los niveles se producen a fines de marzo y principios de abril. Este comportamiento está influenciado por la topografía ya que se encuentran ubicados en zonas de cresta de dunas. La profundidad máxima de los niveles de los freáticos N7 y N8 es de 3,8 m y la mínima de 2,2 m (Fig. 18g y 18h).

Para esa misma fecha, se puede observar una respuesta más rápida en el ascenso de los niveles frente a los excesos hídricos en los freáticos N1, N2, ubicados en bajos topográficos y N3, en zona de pendiente.

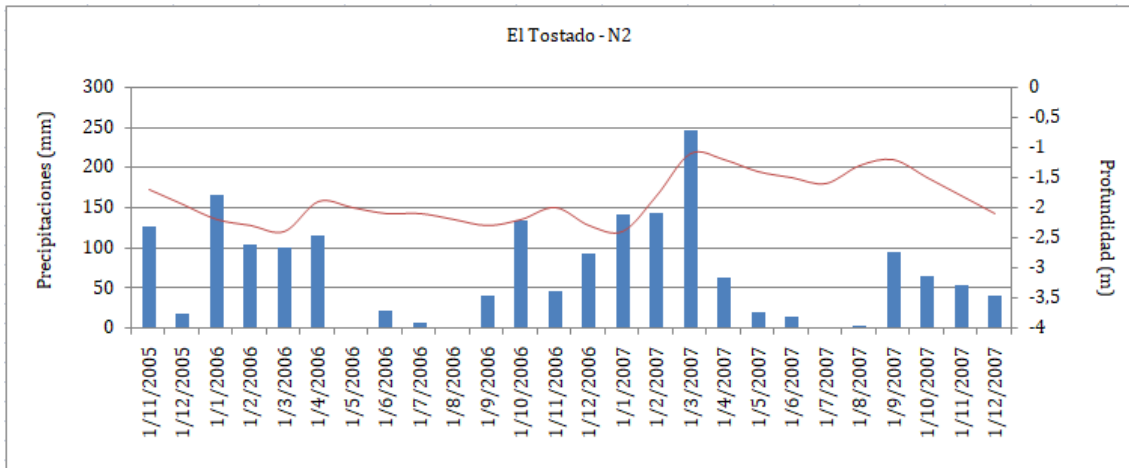


Figura 18b. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo noviembre 2005-diciembre 2007. Freatímetro N2- Ea. El Tostado.

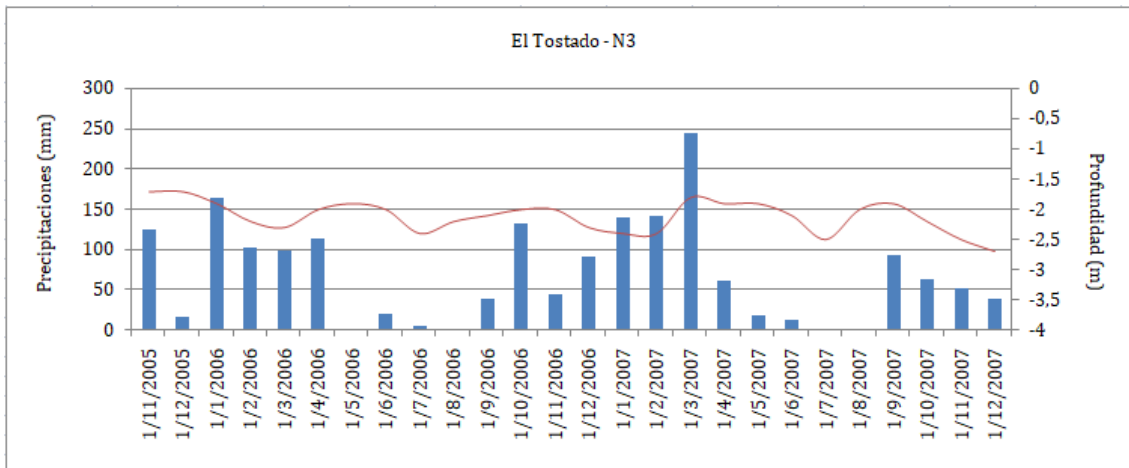


Figura 18c. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo noviembre 2005-diciembre 2007. Freatímetro N3- Ea. El Tostado.

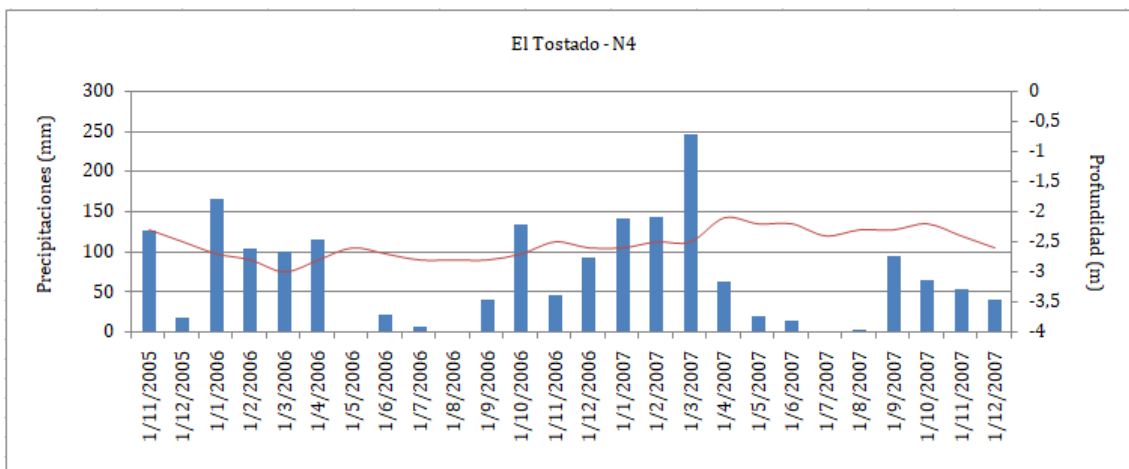


Figura 18d. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo noviembre 2005-diciembre 2007. Freatímetro N4- Ea. El Tostado.

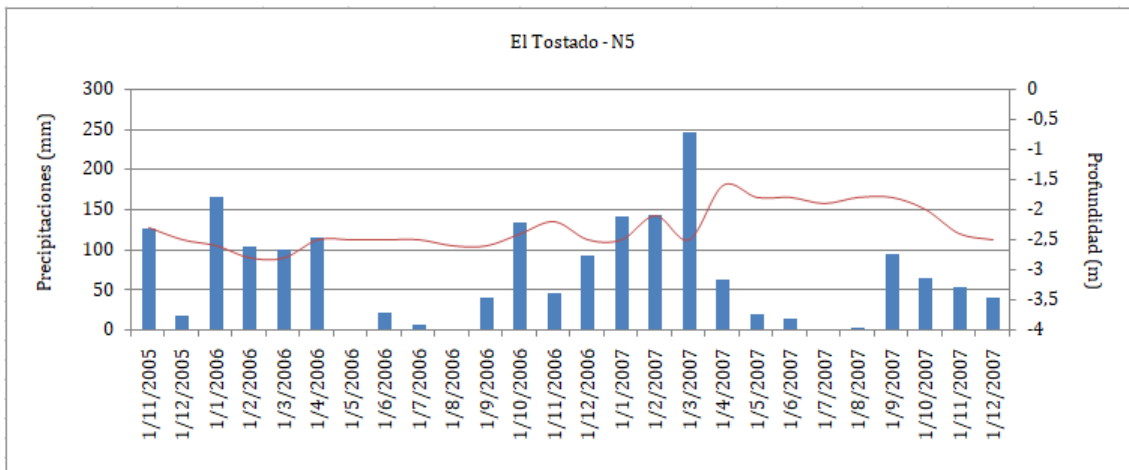


Figura 18e. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo noviembre 2005-diciembre 2007. Freatímetro N5- Ea. El Tostado.

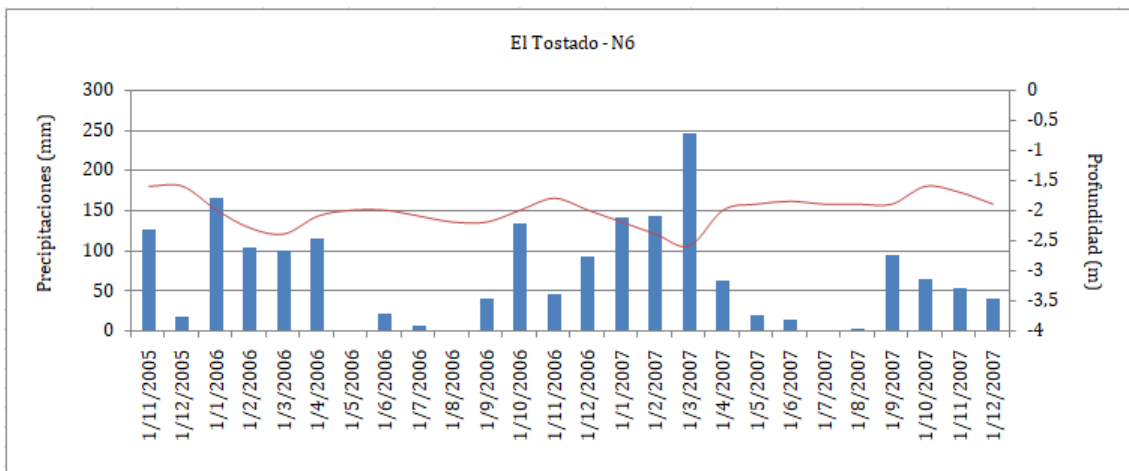


Figura 18f. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo noviembre 2005-diciembre 2007. Freatímetro N6- Ea. El Tostado.

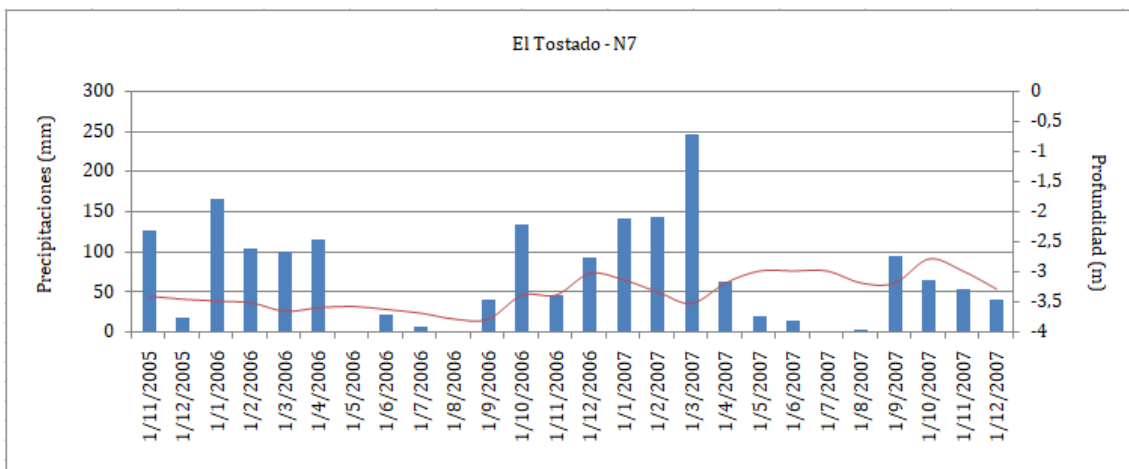


Figura 18g. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo noviembre 2005-diciembre 2007. Freatímetro N7- Ea. El Tostado.

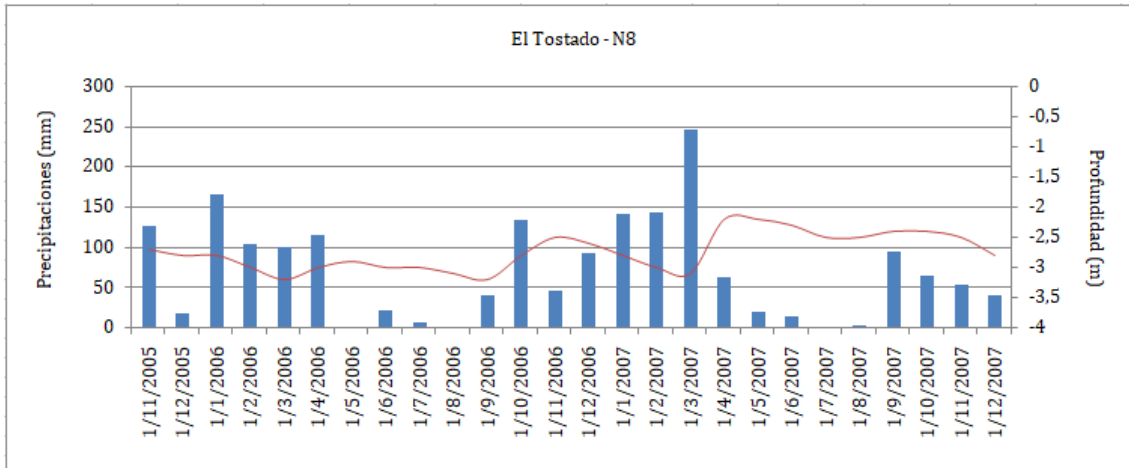


Figura 18h. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Período noviembre 2005-diciembre 2007. Freatímetro N8- Ea. El Tostado.

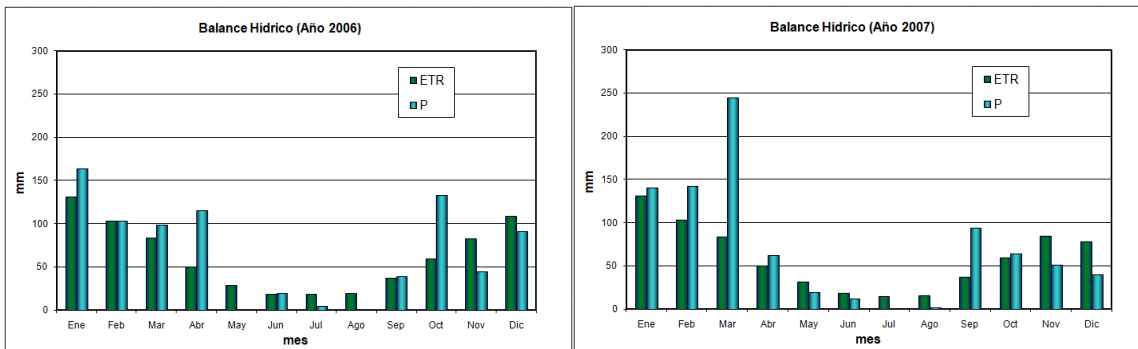


Figura 19a. Balance Hídrico. Año 2006.

Figura 19b. Balance Hídrico. Año 2007.

Los freatómetros del sector sur (S1-S2-S3-S4), tienen una respuesta similar frente a los déficit y excesos hídricos, (Fig. 20a-20b-20c-20d) presentando S1 y S2 niveles relativamente más profundos y posiciones topográficas más elevadas con respecto a S3 y S4. Así, los primeros alcanzan profundidades cercanas a los 3m y los niveles menos profundos llegan a 0,7 m, mientras que S3 y S4 varían entre los 2 m y 0,2 m.

El registro de estos niveles se extiende desde agosto del 2015 a diciembre de 2018. En diciembre de 2015 se destacan excesos que inciden en la elevación de los niveles (Fig. 21g). Los excesos de febrero de 2016 no producen el ascenso de los niveles ya que en el mes previo hubo déficit hídrico, al igual que el mes posterior (Fig. 21h). Otro ascenso apreciable ocurre entre septiembre y noviembre de 2016 que acompañan los marcados excesos producidos en octubre. En todo el registro, se destaca particularmente el año 2017, donde los niveles permanecen próximos a la superficie durante casi todo el año hasta profundizarse en abril de 2018. El balance hídrico (Fig. 21i) muestra para dicho

año, déficit hídrico en enero y en febrero un pico muy marcado de precipitaciones que llegaron a los 290 mm, provocando una elevación brusca de los niveles del orden de 1,5m a 2 m. Otro factor que determinó que los niveles permanezcan cercanos a la superficie durante varios meses, es que, a diferencia de otros años, se observan excesos hídricos hasta octubre. Las lluvias en estos meses fueron de 50 mm o superiores y para abril y septiembre estuvieron cercanas a los 150 mm. A partir de octubre de 2017 suceden varios meses de déficit hasta abril de 2018 que se refleja en un descenso gradual de los niveles hasta esa fecha. En junio de 2018 se registra un déficit mínimo, septiembre presenta los mayores excesos, con lluvias que superan los 200 mm, provocando una elevación paulatina de los niveles hasta diciembre, con un leve descenso en noviembre, dado por valores muy próximos de lluvias y ETR para octubre, noviembre y diciembre.

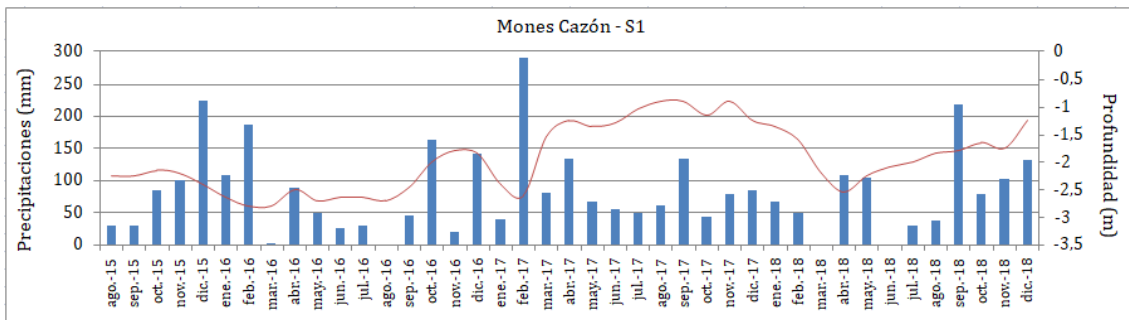


Figura 20a. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo agosto 20015-agosto 2018. Freático S1- Mones Cazón.

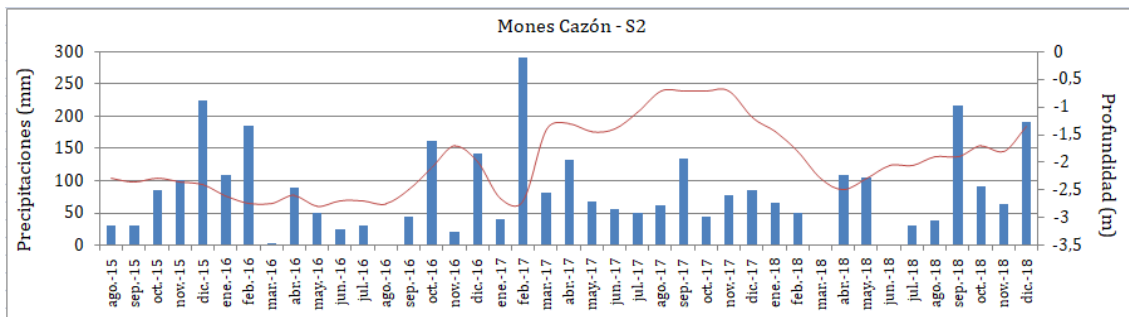


Figura 20b. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo agosto 20015-agosto 2018. Freático S2- Mones Cazón.

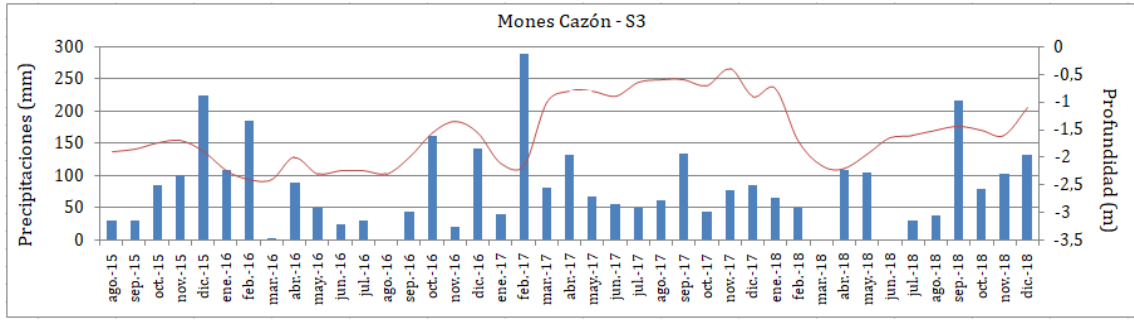


Figura 20c. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Período agosto 2015-agosto 2018. Freatímetro S3- Mones Cazón.

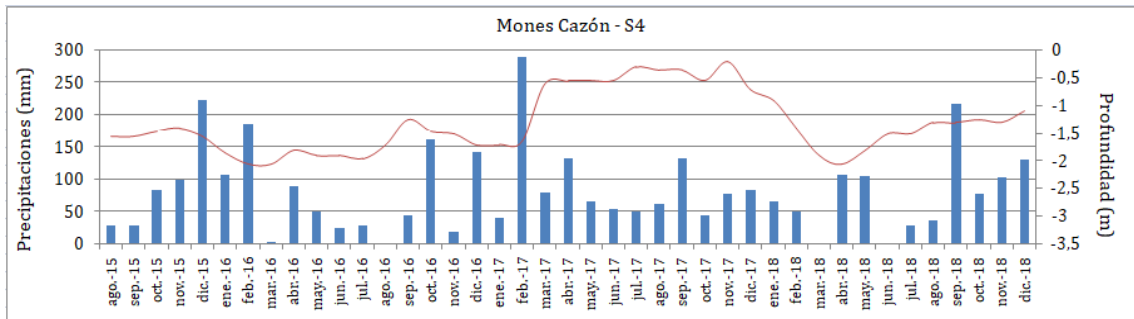


Figura 20d. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Período agosto 2015-agosto 2018. Freatímetro S4- Mones Cazón.

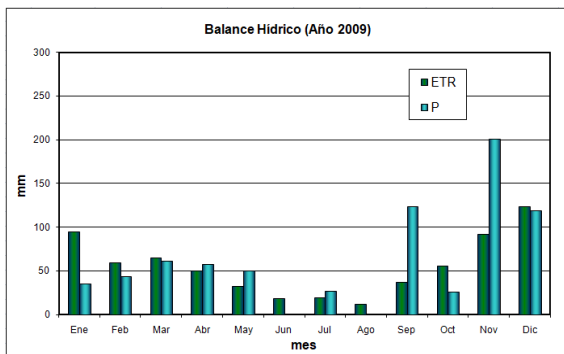


Figura. 21a. Balance Hídrico. Año 2009. Estación Magdala.

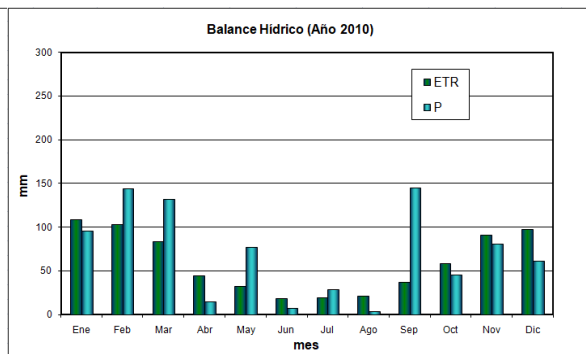


Figura. 21b. Balance Hídrico. Año 2010. Estación Magdala.

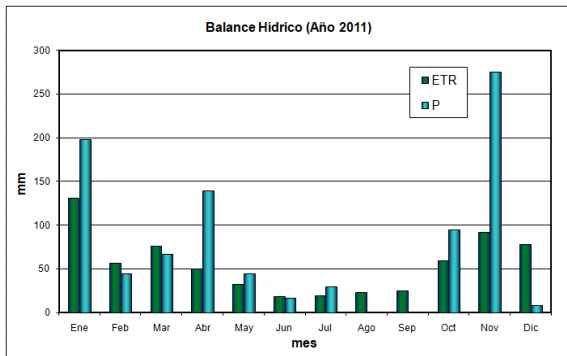


Figura. 21c. Balance Hídrico. Año 2011. Estación Magdala.

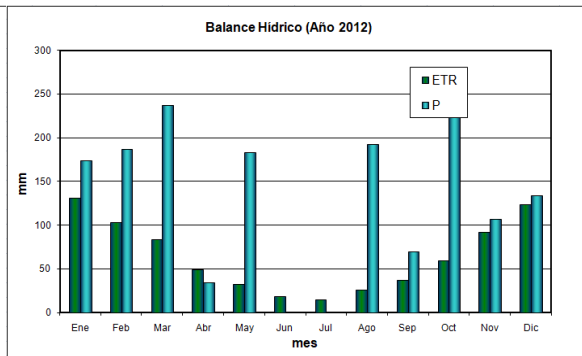


Figura. 21d. Balance Hídrico. Año 2012. Estación Magdala.

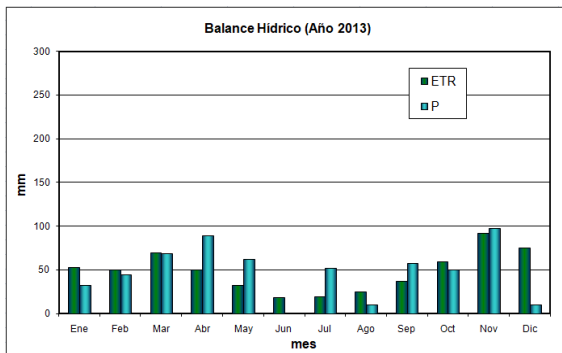


Figura. 21e. Balance Hídrico. Año 2013. Estación Magdala.

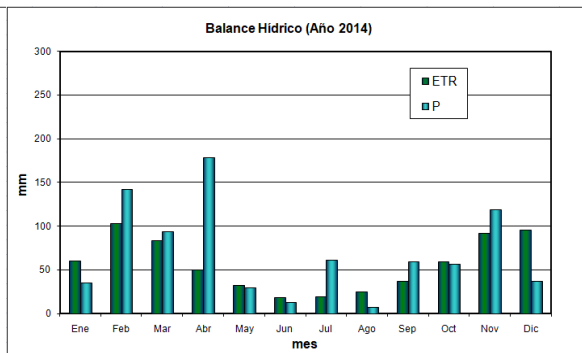


Figura. 21f. Balance Hídrico. Año 2014. Estación Magdala.

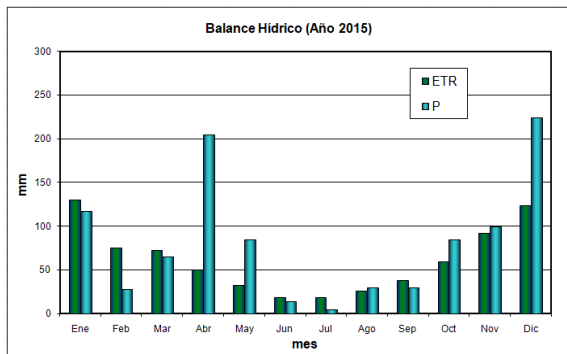


Figura. 21g. Balance Hídrico. Año 2015. Estación Magdala.

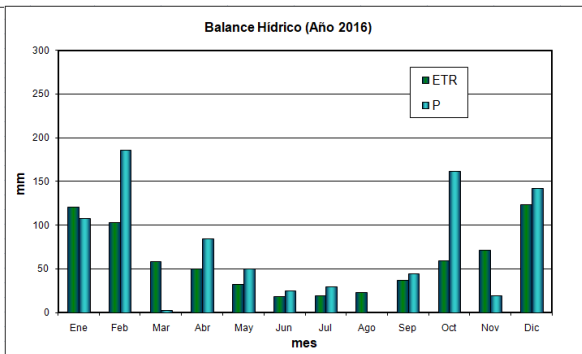


Figura. 21h. Balance Hídrico. Año 2016. Estación Magdala.

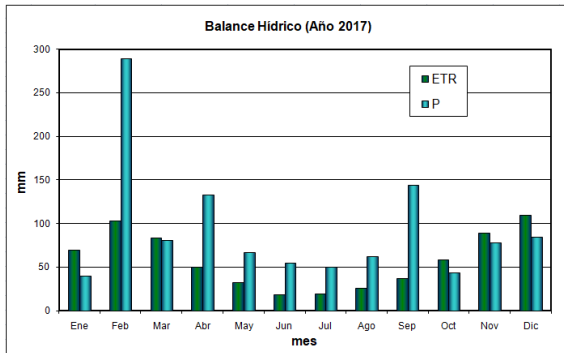


Figura. 21i. Balance Hídrico. Año 2017
Estación Magdala.

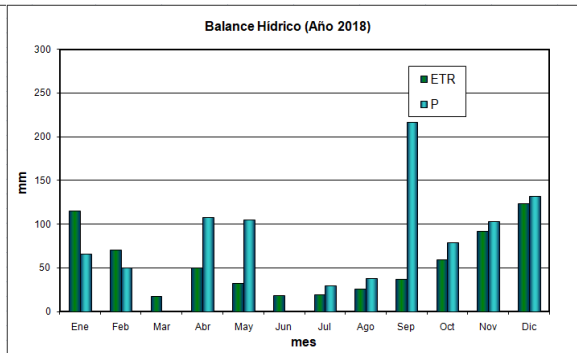


Figura. 21j. Balance Hídrico. Año 2018.
Estación Magdala.

El frentímetro M1 (Fig. 22), ubicado en Magdala posee un registro de niveles desde agosto de 2008 hasta agosto 2018, con profundidades de niveles comprendidas entre 2,6 y 0,3 m.

Los balances hídricos de 2009, 2010 y 2011 presentan varios meses con déficit hídrico, que se evidencian para los primeros meses de 2009 (Fig. 21a), los últimos meses de 2010 y febrero, marzo, agosto, septiembre y diciembre de 2011 (Fig. 21b y 21c). En estos años se destaca un mes con excesos muy marcados en noviembre de 2011 con lluvias superiores a los 250 mm, donde se tiene el registro más alto de los niveles para estos años, alcanzando una profundidad de 1 m. En marzo y abril de 2009 es cuando los niveles tienen la máxima profundidad con 2,6 m, observándose en la figura 24a la ausencia de agua en superficie.

A partir de 2012, los niveles se incrementan en forma pronunciada desde febrero y al igual que en 2017 están cercanos a la superficie con profundidades de 0,3 m, favoreciendo la formación y extensión de cuerpos lagunares. Se identifican estos dos años con los máximos excesos de todo el registro, el 2012 presenta un déficit mínimo para junio y julio (Fig. 21d), mientras que 2017 presenta déficit poco pronunciado para enero y los tres últimos meses del año (Fig. 21i). Las lluvias de estos dos años son las máximas del período con 1566 mm y 1119 mm respectivamente. Esto se puede observar en las imágenes Landsat (Fig. 24b y 24c y 28) con el aumento y expansión de los cuerpos de agua como consecuencia del ascenso y afloramiento del acuífero freático.

Se puede observar en el registro que durante el año 2013 los niveles se profundizan hasta llegar a 1 m aproximadamente y se mantienen constantes. Los niveles se conservan relativamente altos a pesar de observarse en el balance (Fig. 21e) varios

meses de déficit hídrico y registrarse las menores precipitaciones con 576 mm, valor inferior a 2009 (745mm) donde se registra los niveles más profundos. Esto se debe a los excedentes de 2012, y los años posteriores al 2013 con registros de excesos próximos a valores medios o superiores.

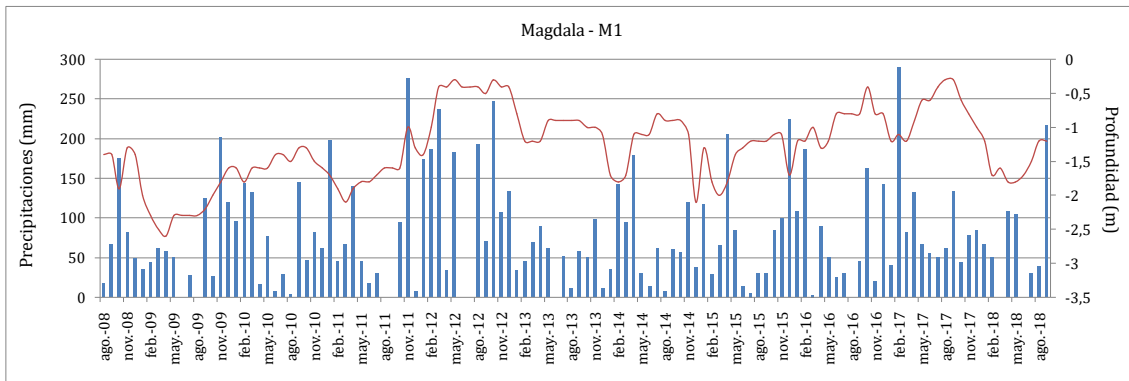


Figura22. Variación de las precipitaciones y profundidad del nivel freático. Periodo agosto 2008-agosto 2018. Freatímetro Magdala.

Imágenes satelitales y su interpretación

En las figuras de los índices de agua se puede apreciar en color blanco ($MNDWI > 0$; $NDWI > 0$) las áreas con agua para 2009, 2012 y 2015.

En las imágenes satelitales de 2009 se observa que los cuerpos de agua son escasos, evidenciando condiciones de déficit hídrico. Podemos ver como se incrementan las áreas cubiertas de agua hacia diciembre (Fig. 23c). Otra observación importante es que hay presencia de agua en superficie coincidente con las dunas longitudinales, mientras que para la zona de transición y dunas parabólicas prácticamente no hay almacenamiento de agua en superficie (localidades de Magdala y Mones Cazón). Vinculándolo con los datos de precipitaciones se registra para los dos últimos meses del año 2008, precipitaciones de 124,2 mm acumuladas. A comienzo de 2009 (enero y febrero) las lluvias acumuladas fueron de 51 mm, reflejándose en la imagen de marzo (Fig. 23a) con el escaso almacenamiento en superficie, estimado en 0,96%. En los meses anteriores al mes septiembre (abril, mayo, junio, julio agosto) los valores de precipitaciones acumuladas llegaron a 97 mm. En la imagen de septiembre (Fig. 23b) se puede observar que las superficies de agua permanecen prácticamente igual, (0,92%) con respecto a marzo. En octubre y noviembre las precipitaciones aumentaron a 157 mm, que se manifiesta en la imagen de diciembre (Fig. 23c), registrándose 1,34 % de agua en superficie, siempre restringidas al sector de dunas longitudinales.

Para 2009, en Magdala llovieron 745 mm, mientras que en Pehuajó 637 mm, esta situación no se ve reflejada en las imágenes, hecho condicionado fundamentalmente por el control de la geomorfología y topografía.

Los histogramas de marzo, septiembre y diciembre presentan características similares, las poblaciones de “tierra” – “agua”, están bien discriminadas, y a su vez ésta última tiene mínima expresividad, con un pico próximo al valor 0,5. Se puede observar que la porción correspondiente a “tierra” posee un pico en -0,5 (Fig. 23a-23b-23c).

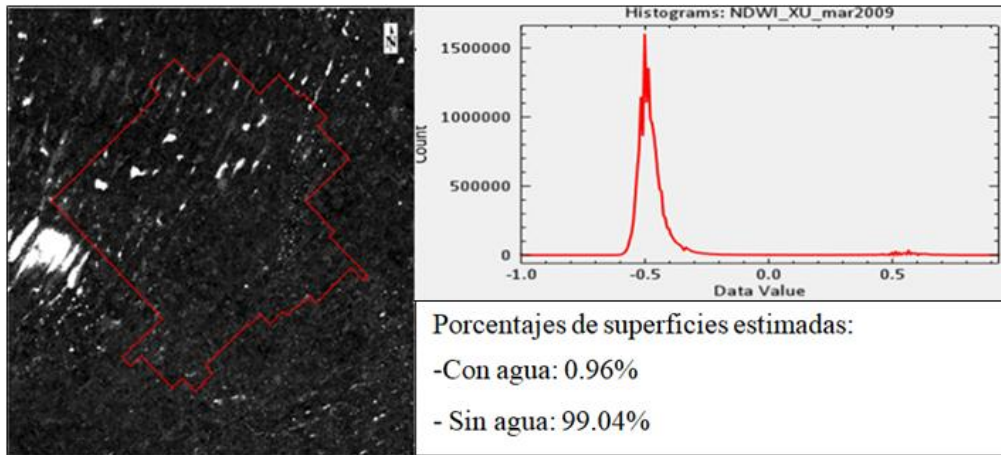


Figura 23a. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWI_{xu}) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2009, mes de marzo.

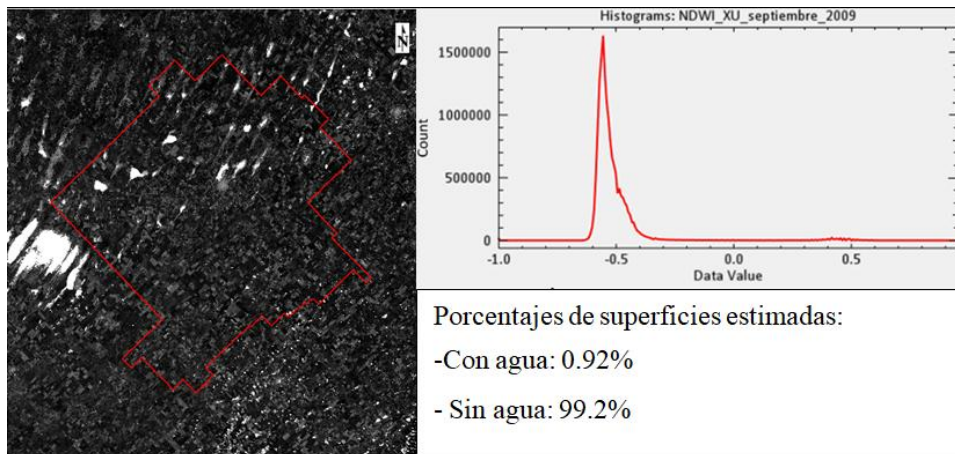


Figura 23b Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWI_{xu}) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2009, mes de septiembre.

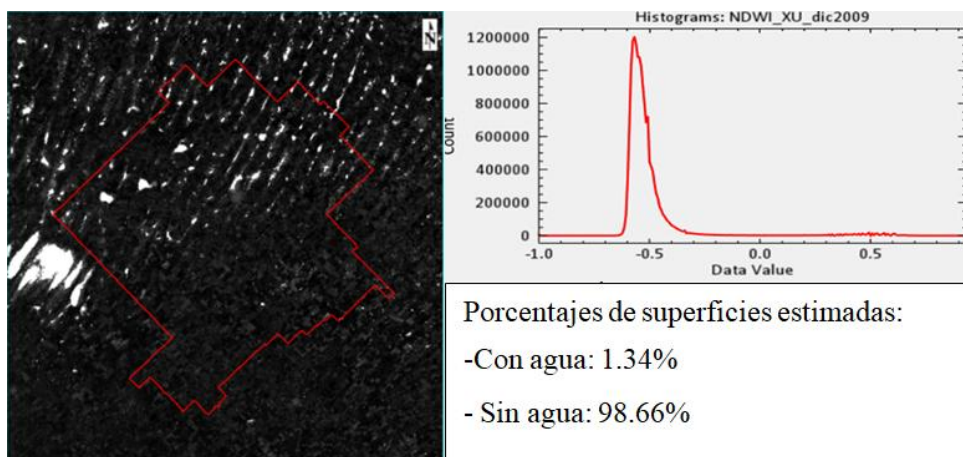


Figura 23c. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWI_{xu}) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2009, mes de diciembre.

Para 2012 se observó el predominio de las áreas anegadas, indicando condiciones de excesos hídricos. En marzo de 2012, la mayor parte del partido, exceptuando su zona sur de dunas parabólicas, presenta agua en superficie, circunscripta al sector interduna (Fig. 24a). Se observa en la imagen del MNDWI, franjas estrechas “blancas”, prácticamente continuas en el caso de las dunas longitudinales, alternantes con franjas oscuras, que corresponden a los sectores de crestas de las dunas. En la zona de transición, estas acumulaciones de aguas superficiales son discontinuas. En la imagen MNDWI de septiembre (Fig. 24b), estas franjas son más anchas y el sur del partido también presenta agua en superficie evidenciando la morfología de las dunas parabólicas. En enero de 2013 (Fig. 24c), los cuerpos de agua, en general, se retraen, con algunos sitios como una cuña del centro-norte del partido, donde el agua permanece y se expande.

En cuanto a la distribución de las lluvias, se tiene que en los dos últimos meses de 2011 las precipitaciones acumuladas alcanzaron los 387.2 mm y a principio del año 2012 (enero, febrero y marzo) fueron de 540,2 mm. En la imagen de marzo (22 de marzo) se puede ver la gran extensión de los cuerpos lagunares en color blanco, con una superficie estimada en 13%. En los meses anteriores a septiembre de 2012 (abril, mayo, junio, julio agosto) el valor de precipitaciones acumuladas fue de 401 mm, reflejándose en la imagen de dicho mes un incremento de las superficies anegadas, alcanzando un 39,23 %. En los meses de octubre, noviembre y diciembre, las precipitaciones acumuladas llegaron a 573,3 mm. La imagen de enero de 2013, en comparación a la imagen de septiembre presenta prácticamente la mitad del porcentaje de agua, 19,22%, evidenciando la disminución de las precipitaciones en noviembre y diciembre de 2012 y valores similares de ETR y el comienzo de 2013 con déficit hídrico.

Las lluvias caídas en el norte y sur del partido fueron homogéneas con valores de 1580 y 1566 mm, respectivamente, poniéndose de manifiesto el afloramiento de la freática en las dunas parabólicas recién en la imagen de septiembre, esto puede estar controlado no sólo por las geoformas sino más probablemente a la distribución diferencial de las lluvias en las dos estaciones, Magdala y Pehuajó.

Los histogramas de este año muestran la mayor expresividad de la población de agua con respecto al 2009, el pico de agua para el mes de marzo está en 0,3, mientras que para septiembre y diciembre se encuentra en 0,5; mientras que la porción correspondiente a tierra presenta picos en -0,35 y -0,3 (Fig. 24a-24b-24c).

En la figura 25 se resalta en colores la distribución del almacenamiento de agua superficial mediante density slicing de los años 2009 y 2012.

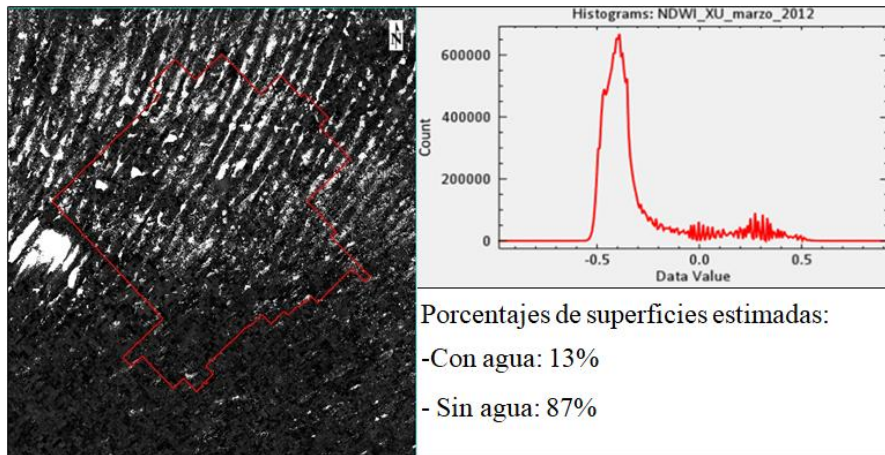


Figura 24a Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWI_{xu}) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2012, mes de marzo.

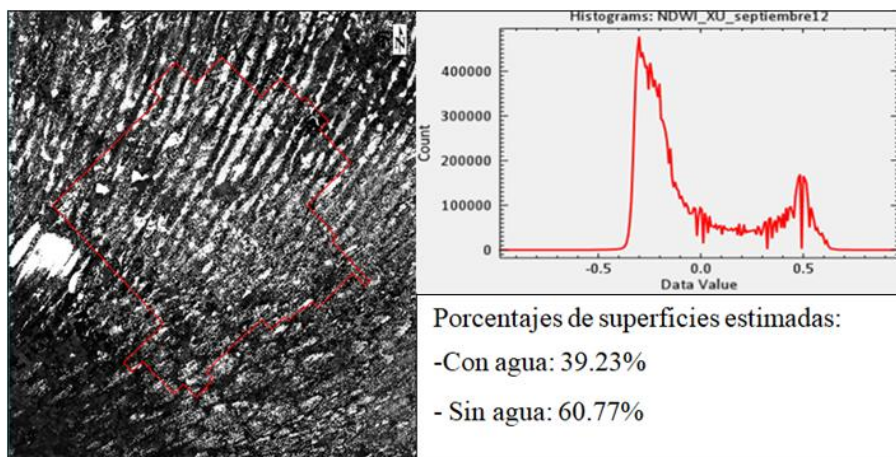


Figura 24b. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWI_{xu}) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2012, mes de septiembre.

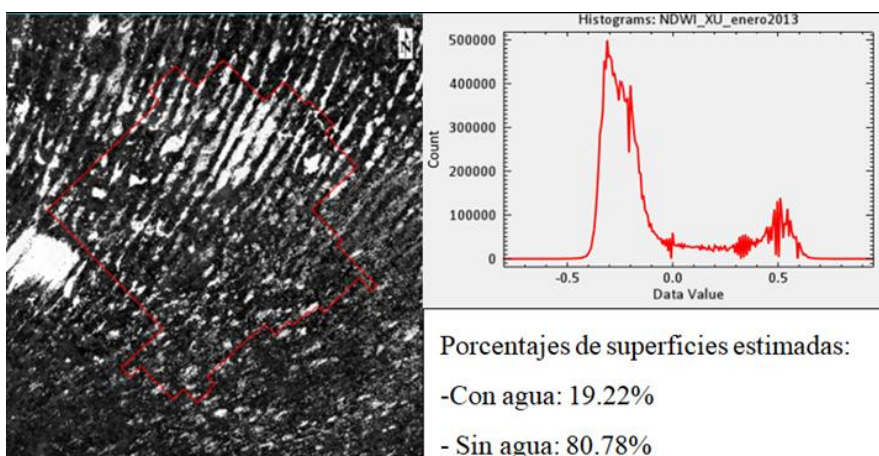
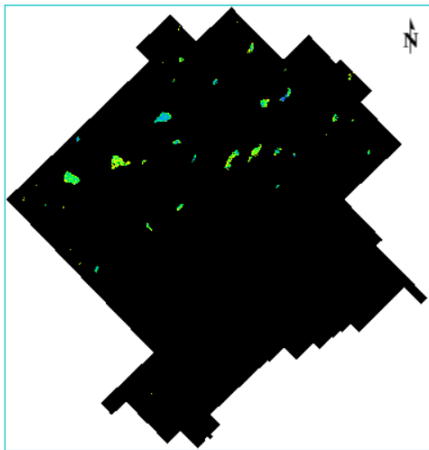


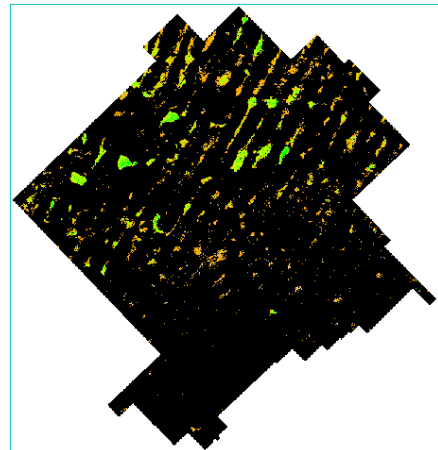
Figura 24c. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWI_{xu}) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2013, mes de enero.

2009

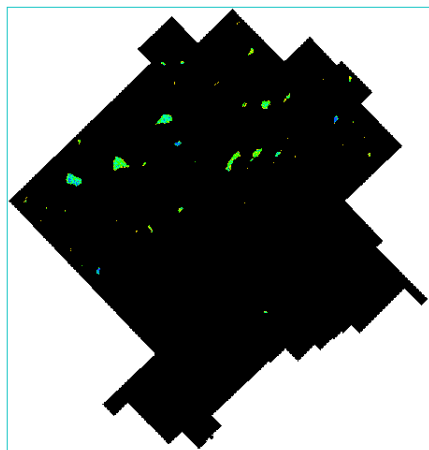


Marzo

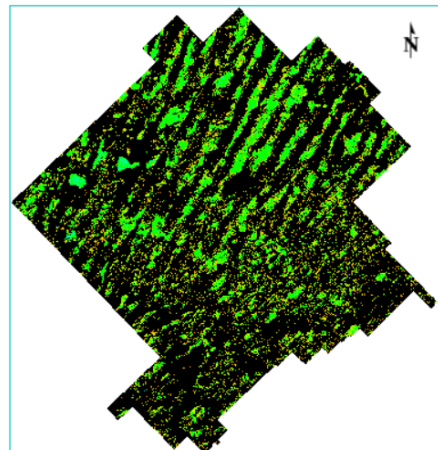
2012



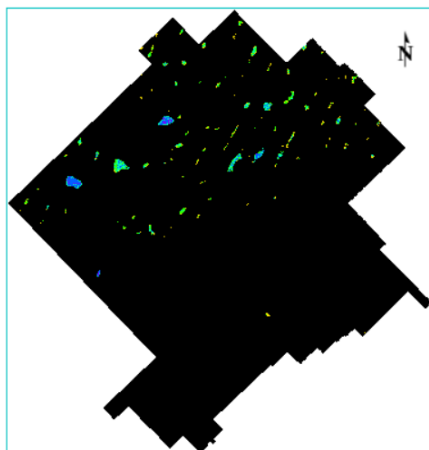
Marzo



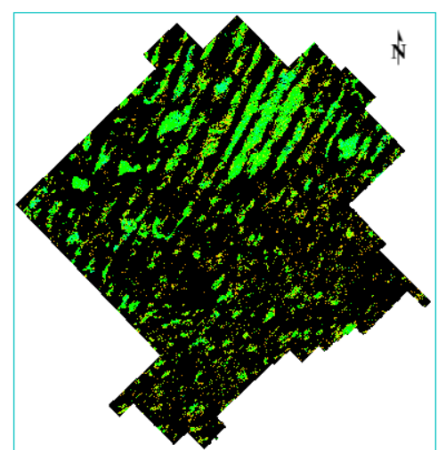
Septiembre



Septiembre



Diciembre



Enero 2013

Figura 25. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI ó NDWI_{xu}). Aplicación de density slicing.

Para 2015, se puede observar que las áreas anegadas de los tres períodos seleccionados, abril, octubre y diciembre, son similares en cuanto a los porcentajes de agua en superficie, siendo de 2,57 %; 2,6 % y 3,03 % respectivamente. En forma análoga a las imágenes de 2009, el agua se acumula en el sector de dunas longitudinales. El año 2015 corresponde a un valor próximo a la media de precipitaciones de la serie 1911-2018, que se evidencia en las imágenes (Fig. 26a-26b y 26c) con superficies de agua discontinuas (tonos blanquecinos) restringidos a los sectores bajos de las dunas longitudinales y con una expansión intermedia con respecto a 2009 y 2012.

Este año presenta valores mayores de precipitaciones en Magdala, con una diferencia de 188 mm entre las dos estaciones, ya que se registraron 988 mm en Magdala y 800 mm en Pehuajó. Las imágenes muestran que en el sur no hay presencia de agua en superficie, evidenciando una respuesta diferente en las dos áreas para los años que no se incluyen en las condiciones de excesos hídricos elevados. Esto está vinculado principalmente a la diferencia de cotas y pendientes entre ambos sitios se indicó en el ítem geomorfología.

Los histogramas muestran un comportamiento similar en los meses seleccionados, con mayor dispersión en la población de tierra y con alta separabilidad de las dos poblaciones (Fig. 26a-26b y 26c).

En la figura 27 se resalta en colores la distribución del almacenamiento de agua superficial mediante density slicing.

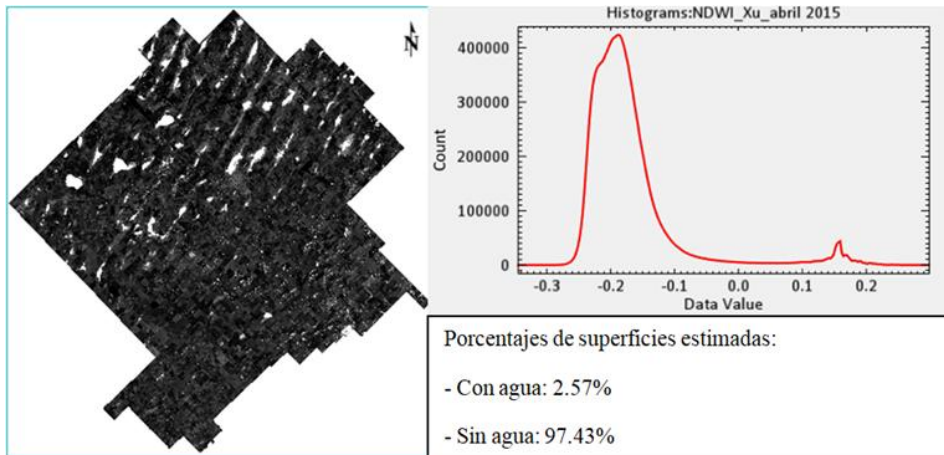


Figura. 26a. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWIx) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2015, mes de abril.

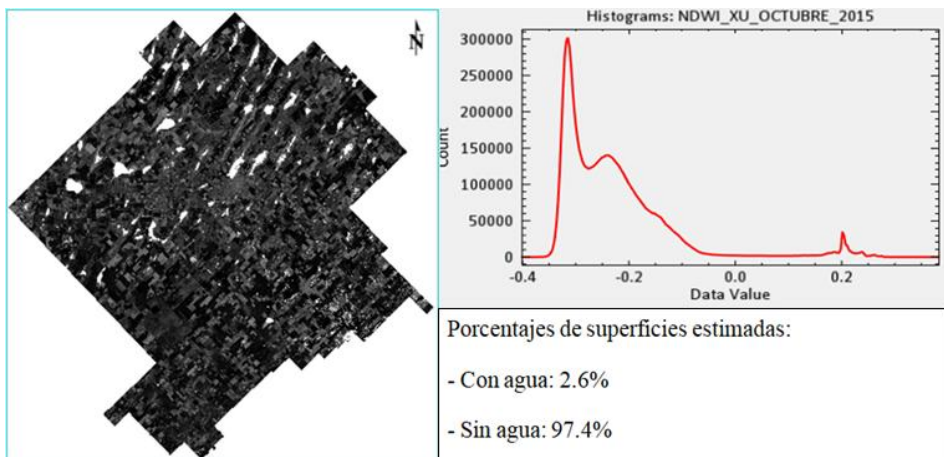


Figura. 26b. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWIx) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2015, mes de octubre.

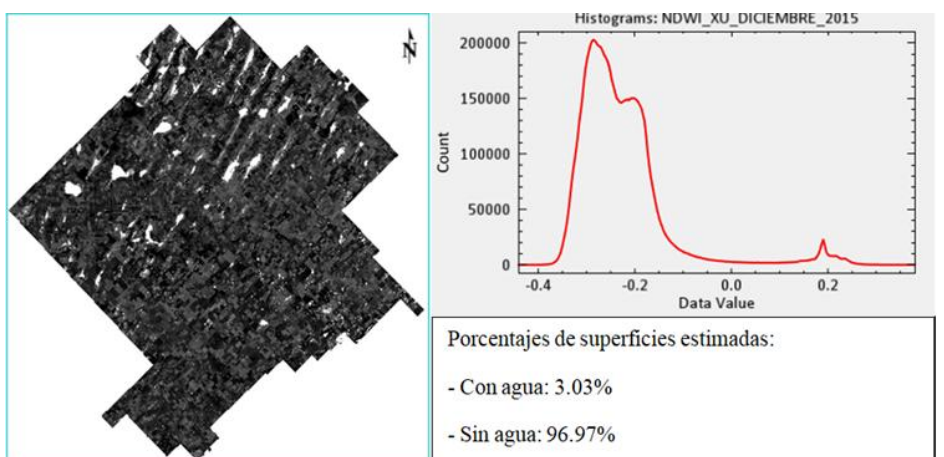


Figura. 26c. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWIx) y estimación de almacenamiento de agua superficial para el año 2015, mes de diciembre.

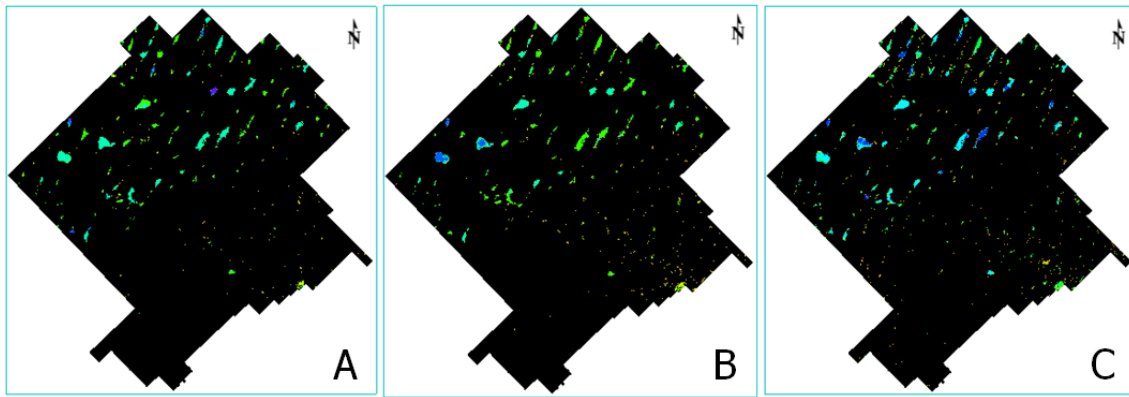


Figura. 27. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI o NDWI Xu) con aplicación de densityslicing. Año 2015 A) Abril B) Octubre C) Diciembre.

Se seleccionó una imagen de 2017 con el fin de mostrar el comportamiento en superficie del ascenso y afloramiento del acuífero freático particularmente en el sur del partido en un año donde los datos de los niveles freáticos en Mones Cazón y Magdala permanecen cercanos a la superficie a lo largo de todo el año (Fig. 20 y 22). En la figura 28 se pueden observar un índice de agua (MNDWI) y una composición falso color (RGB, green, NIR, SWIR) de una imagen Landsat OLI del 22 de octubre de 2017.

Los datos de lluvias indican para Magdala un total de 1119 mm y en Pehuajó de 843 mm, lo que determina una diferencia muy pronunciada entre ambos sitios, de 276 mm. Se puede apreciar que en estas condiciones de excesos hídricos para el sur del partido y con un año precedente con lluvias de 860 mm, el sistema se recarga y los niveles ascienden para aflorar en las depresiones según la configuración de la geomorfología.

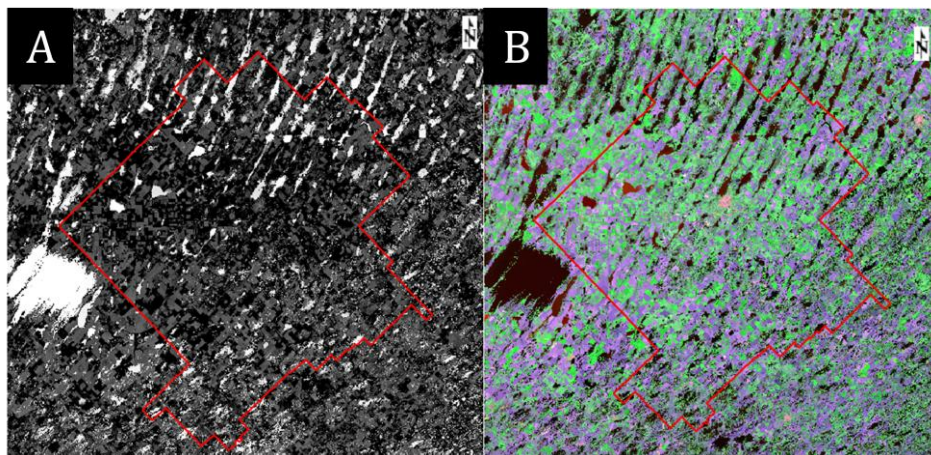


Figura. 28. A: índice MDWIx B: Imagen falso color (RGB-GREEN, NIR, SWIR1), LandsatOLI, 22 de octubre de 2017

En las figuras 29-32-35, se consideraron los índices de agua MNDWI y NDWI de los meses de septiembre de 2009 y 2012, y octubre de 2015, con el fin de analizar las diferencias de los porcentajes de agua en superficie arrojados por ambos métodos. En todos los casos el NDWI da porcentajes menores:

Septiembre de 2009 MNDWI, 0,92 % y NDWI, 0,73 %

Septiembre de 2012 MNDWI, 39,23 % y NDWI, 33 %

Octubre de 2015 MNDWI, 2,6 % y NDWI, 1,5 %

En las figuras 30-31-33-34-36-37, se muestran las capturas de porciones de imágenes de NDWI (A), MNDWI (B), IR color (C) y Color Real (D), con el fin de observar cómo los índices separan las superficies de agua – tierra.

Se pudo apreciar que parcelas de un color rojo intenso (imagen IRcolor), o verde oscuro (imagen color real), indicativas de vegetación con un estadio fenológico desarrollado y en buen estado, tienen un tono gris muy oscuro a negro en la imagen NDWI y gris claro en la MNDWI. Los campos sin cultivo, colores cian (IRcolor) y violáceas muy claras en la imagen color real, se observan en gris claro en la NDWI y en tonos grises muy oscuro a negro en la MNDWI, poniendo de manifiesto, en este último caso, un elevado contraste entre tierra-agua.

Septiembre de 2009

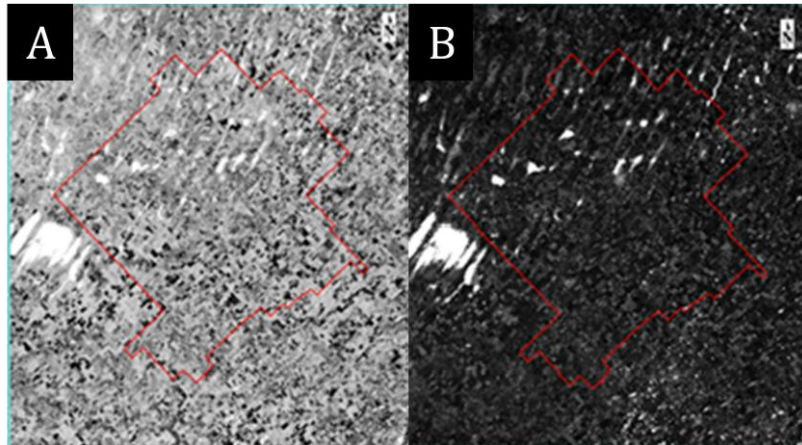


Figura 29. Porcentaje estimados de superficies cubiertas con agua,
A: MNDWI, 0,92% B: NDWI, 0,73%

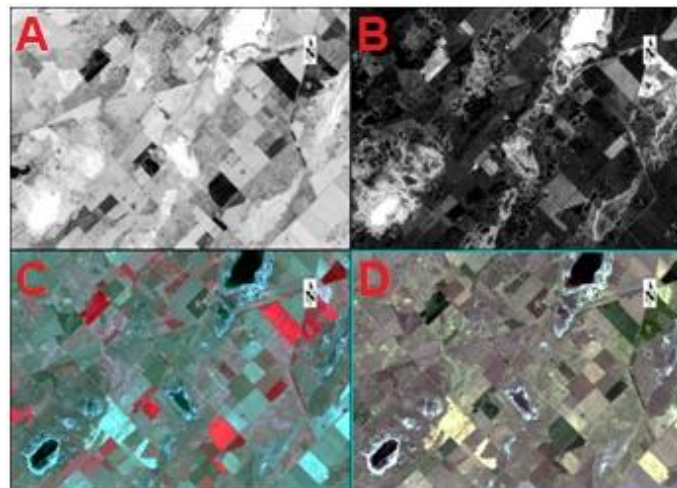


Figura 30. A.NDWI; B. MNDWI; C.RGB IRCOLOR; D.RGB Color Real

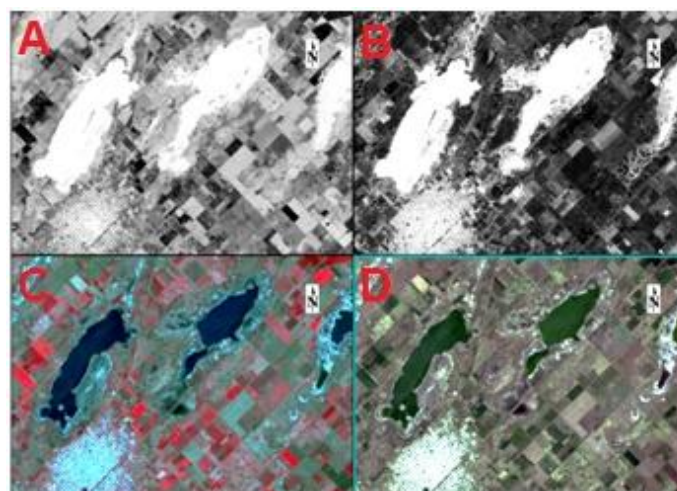


Figura 31. A.NDWI; B. MNDWI; C.RGB IRCOLOR; D.RGB Color Real

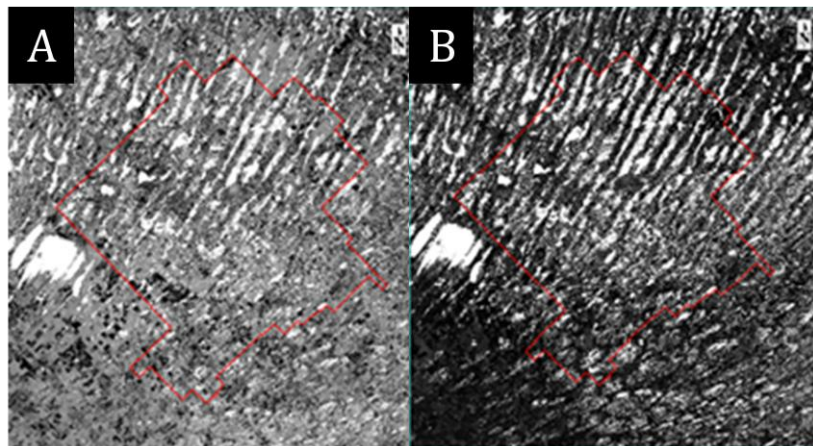


Figura 32. Porcentaje estimados de superficies cubiertas con agua, A: MNDWI, 39,23% B: NDWI, 33%

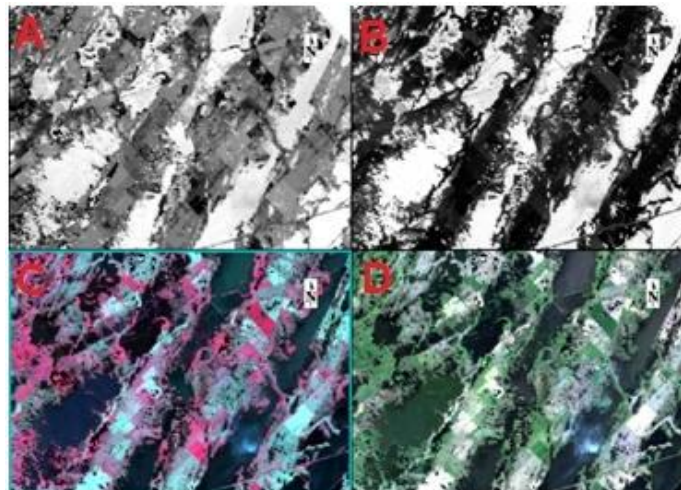


Figura 33. A.NDWI; B. MNDWI; C.RGB IRColor; D.RGB Color Real

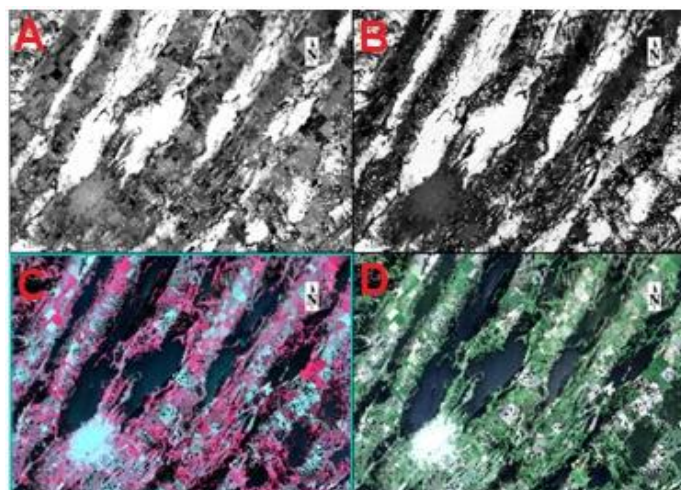


Figura 34. A.NDWI; B. MNDWI; C.RGB IRColor; D.RGB Color Real

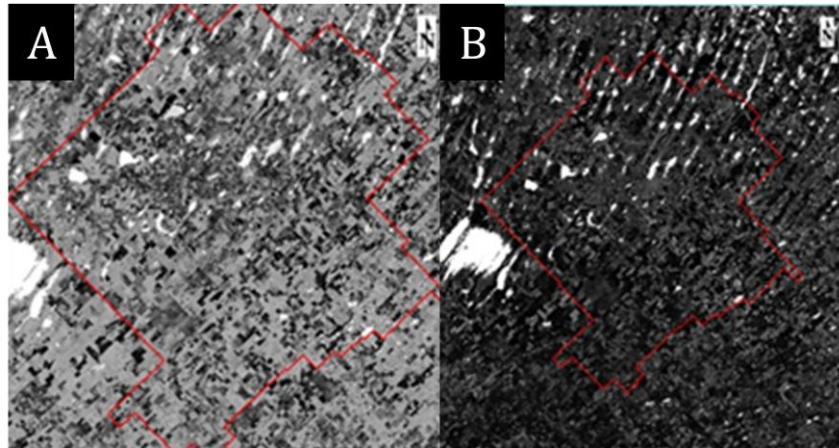


Figura 35. Porcentaje estimado de superficies cubiertas con agua, A: MNDWI, 2,6% B: NDWI, 1,5%

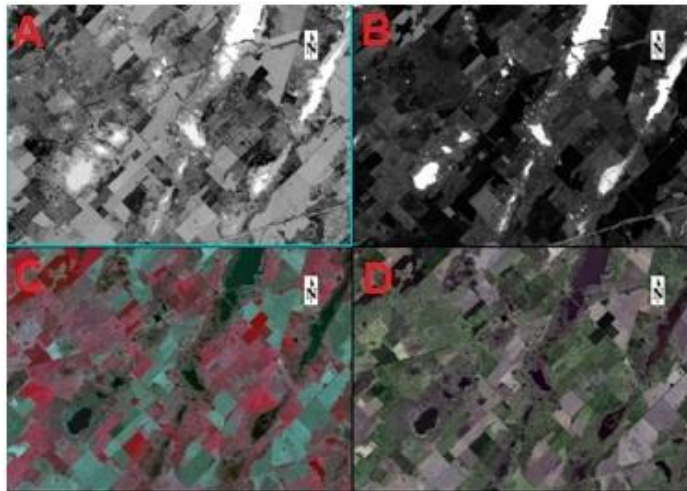


Figura 36. A.NDWI; B. MNDWI; C.RGB IRColor; D.RGB Color Real

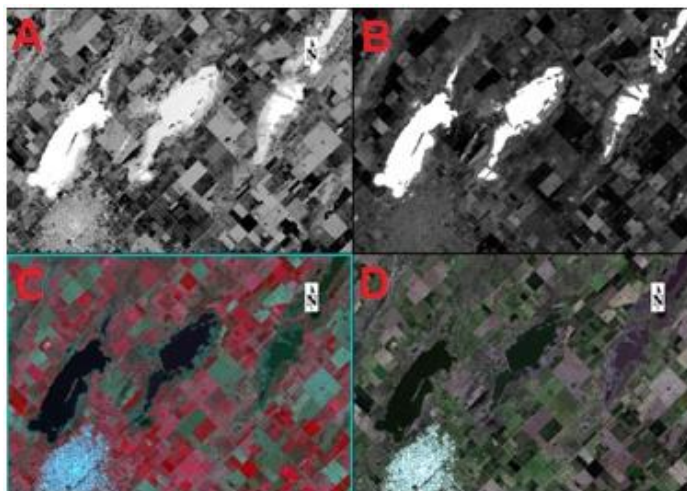


Figura 37. A.NDWI; B. MNDWI; C.RGB IRColor; D.RGB Color Real

Conclusiones

El desarrollo de este TFL permitió actualizar la información disponible acerca del comportamiento hidrológico en el Partido de Pehuajó. Ello se refiere a la extensión y densificación de los registros de precipitaciones. Además, debe destacarse la obtención e interpretación de datos freaticométricos en distintos sectores del partido que posibilitaron precisar la respuesta de los niveles freáticos frente a las precipitaciones. La posibilidad de análisis de imágenes satelitales seriadas constituyó un aporte de interés para reconocer la evolución de las superficies anegadas en el partido.

La evaluación de datos hidrometeorológicos y de imágenes satelitales verifica la alternancia entre períodos húmedos y secos para los últimos años. Se reconoce que la recarga del acuífero freático se produce a través de los excesos de las precipitaciones y la salida de agua del sistema está dada fundamentalmente por la evapotranspiración.

A nivel general se pudo establecer que el balance hídrico está afectado principalmente por las precipitaciones y la evapotranspiración. A partir de esta generalidad, el aporte a nivel de detalle del partido surge en el reconocimiento de la influencia de las variaciones en los campos de precipitación.

Se pudo determinar que en el Partido de Pehuajó dichas variaciones influyen en los distintos sectores analizados. Así si las mayores precipitaciones coinciden con aquellos sectores en las que la evapotranspiración es baja, la formación y extensión de las lagunas se verá especialmente favorecida específicamente en dichos sectores.

A causa de las precipitaciones y por el ascenso del nivel freático, el agua freática aflora en las depresiones. En esta situación se producen los mayores anegamientos en la región. Solamente con el aumento de la evapotranspiración y la disminución de las precipitaciones (menores excesos de agua), el nivel freático desciende y existe una retracción en las superficies anegadas.

Se verificó que la variación del nivel freático está asociada principalmente a la relación precipitación - evapotranspiración. El ascenso de los niveles freáticos, producto de significativos excesos hídricos puede producir anegamientos fundamentalmente en la zona de interdunas.

A través de las imágenes satelitales se ha podido observar un comportamiento diferencial en cuanto al almacenamiento de agua en la superficie en el sector de dunas longitudinales con respecto a la zona de transición y dunas parabólicas.

Particularmente para 2017 las precipitaciones fueron mayores en la zona sur del partido (Magdala y Mones Cazón), que se evidenciaron con niveles freáticos elevados durante todo este periodo.

El análisis conjunto de datos de excesos /déficit de agua del balance hídrico, niveles freáticos y variación de las superficies anegadas permite corroborar la hipótesis relacionada a la situación que las variaciones de los niveles freáticos se reflejan en la expansión o retracción de los cuerpos de agua en superficie. Por otra parte, la respuesta de una situación de un ciclo húmedo analizada en la TFL (2012) se asocia a una sucesión de períodos con excesos hídricos que dan lugar a niveles próximos a la superficie o aflorantes en las partes bajas del terreno.

Para un análisis de mayor detalle de la relación niveles freáticos – áreas anegadas es necesario contar con similares periodos de registros de los niveles freáticos en todos los ambientes geomorfológicos. Además, resulta imprescindible disponer de datos hidrometeorológicos homogéneamente distribuidos en el área de estudio.

El tratamiento de imágenes satelitales resultó una herramienta adecuada para una actualización y precisión de los distintos estados hídricos a escala del Partido de Pehuajó, donde se pudo relacionar que la expansión y retracción de los cuerpos de agua está asociada a los periodos de excesos y déficit hídricos.

Bibliografía

- Cabral, M., González, N., Giménez, J.E., Hernández, M.A., y Hurtado, M.A. (1996). Analisis geoambiental de la región semiárida del noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Riesgo de anegamiento y propuesta de ordenación. Sexto Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del territorio. Vol III. 345-364.
- Cabral, M., González, N., Giménez, J.E., Hernández, M.A., y Hurtado, M.A. (1995). Caracterización del medio físico y de los fenómenos naturales y antrópicos en un sector del noroeste bonaerense como aporte al ordenamiento territorial. Primera reunión nacional de geología ambiental y ordenación del territorio. Tomo II. 357-370.
- Dangavs, N. (2005). Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires, La Plata, Argentina. 219–235.
- De Salvo, O. E., Ceci, J. H., y Dillon, A. (1969). Caracteres geológicos de los depósitos eólicos del Pleistoceno superior de Junín (provincia de Buenos Aires). Actas de las Cuartas Jornadas Geológicas Argentinas I, 269-292.
- Díaz-Zorita, M., Barraco, M., y Álvarez, C. (2004). Efectos de doce años de labranzas en un Hapludol del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. Ciencia del suelo, 22 (1), 11-18.
- Dillon A, Castronovo R. (2006). Inundaciones de llanura pampeana de la provincia de Buenos Aires, República Argentina. Centro de Estudios Ambientales. UNICEN. Tandil.
- Dillon, A. A., Hurtado, M., Giménez, J., y Castillo, R. J. (1985). Consideraciones geomorfológicas y estratigráficas como base del carteo de suelos de un sector de la Pampa Arenosa (Provincia de Buenos Aires). Actas Primeras Jornadas Geológicas Bonaerense, 737-749.
- Forte Lay, J.A., Kruse, E., Aiello, J.L. (2005). Hydrologic Scenarios Applied to the Agriculture Management of the Northwest of the Buenos Aires Provincie (Argentina). Environmental change and rational water use. Buenos Aires: Union Geographical International, 1 - 17.

Forte Lay, J.A., Kruse, E., Aiello, J.L. (2007). Hydrologic scenarios applied to the agriculture management of the northwest of the Buenos Aires Province, Argentina. *GeoJournal*, 70: 263-271.

Frenguelli, J. (1956). Rasgos generales de la hidrografía de la provincia de Buenos Aires. Provincia de Buenos Aires, Ministerio de Obras Públicas, Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas.

González, N. (2005). Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. Geología y recursos naturales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata. 359-374.

Hargreaves, G.H., y Samani, Z.A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.

Hurtado, M.A., Moscatelli, G.N. y Godgnone, R.E. (2005). Los suelos de la Provincia de Buenos Aires. Geología y recursos naturales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata. 201-218.

Irondo, M., y Krohling, D.M. (1995). El sistema eólico pampeano. Comisión Museo provincial de ciencias naturales "Florentino Ameghino". Vol. 5,1, pp. 79. Santa Fe.

Kruse, E., Aiello, J., y Forte Lay, J. A. (1993). Aspectos hidrológicos en el Oeste de la Provincia de Buenos Aires y Este de La Pampa. República Argentina. Brasil. Gramado. I Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur.

Kruse, E., Aiello, J., y Forte Lay, J. A. (1994). Pautas para un modelo hidrológico en el área de Pehuajó (Buenos Aires). 18° Reunión Científica de Geofísica y Geodesia. AAGG. La Plata, Argentina.

Kruse, E., Ainchil, J. (2017). Comportamiento hidrológico en grandes llanuras: caso de estudio Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. AUGMDOMUS. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Pp 1 - 11. ISSN 1852- 2181.

Kruse, E., Forte Lay, J.A., y Aiello, J. (1995). Características hidrológicas e hidrometeorológicas en la zona de Pehuajó (Buenos Aires). Argentina. Junín (Buenos Aires). Cuartas Jornadas geológicas y Geofísicas Bonaerenses.

Kruse, E., Forte Lay, J.A., y Aiello, J. (2001). Hydrological Processes on Large Flatlands. Case Study: Northwest region of Buenos Aires Province (Argentina). IAHS-AISH Publication. Wallingford: IAHS Press. Pp 531 - 536. ISSN 0144-7815.

Kruse, E., Hiller, K., Aiello, J. (1992) Kartezur risikoabschätzung überschwemmungsgefährdeter flächen (Mapa de evaluación de zonas propensas a inundaciones en el Pdo de Pehuajó, Buenos Aires, Argentina). mapas . Alemán. Alemania. 199.

Kruse, E., Laurencena, P., Deluchi, M., Forte Lay, J.A., y Rojo, A. (2007). Influencia de los niveles freáticos en el funcionamiento hidrológico regional del noroeste de la provincia de Buenos Aires. Argentina. V Congreso Argentino de Hidrogeología. Entre Rios, Argentina. 400-408.

Kruse, E., y Laurencena, P. (2005). Aguas superficiales. Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento. Geología y recursos naturales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata, Argentina. 313-326.

Kruse, E.; Forte Lay, J.A.; Aiello, J. (1998). Indicadores hidrológicos aplicados a la agricultura en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). Brasil. Florianopolis. II Reunión Latino-americana de Agrometeorología.

Malagnino, E.C. (1989). Paleoformas de origen eólico y sus relaciones con los modelos de inundación de la provincia de Buenos Aires. IV Simposio de Percepción Remota, IX Reunión Plenaria SELPER. Bariloche, Argentina. Tomo II: 611-620.

McFeeters, S.K. (1996). El uso del Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) en la delineación de las características de aguas abiertas. Revista internacional de teledetección, 17 (7), 1425-1432.

Mehl, H., Hiller, K., Kruse, E., y Aiello, J. 1993. Provincia de Buenos Aires/Argentina: Kartenfolge zur Darstellung Überschwemmter Flächen/ Sucesión de Mapas para la exposición de superficies inundadas, Teil 1, 1973 87, Maßstab 1:200.000. Alemania.

Rojo, A., Deluchi, M., Laurencena, P., Forte Lay, J.A., y Kruse, E. (2011). Factores influyentes en la disponibilidad de agua subterránea dulce en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Argentina. Salta. VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V

Seminario Hispano-latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Cat. Hidrogeología (UNSa) - AIH Grupo Argentino.

Salso, J. H. (1966). La cuenca de Macachín, provincia de La Pampa. Nota preliminar: Revista Asociación Geológica Argentina, 21, 107-117.

Thornthwaite, C. W., Mather, J. R., Thornthwaite, C. W., y Mather, J. A. (1955). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Climate Crewel Institute of Technology. 10(3).

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International journal of remote sensing, 27(14), 3025-3033.

Zaniboni, C.M., y Villegas, I.A.G. (2011). Uso del suelo en el territorio agrícola ganadero del Oeste bonaerense. Memoria Técnica, 2012, 200-206.

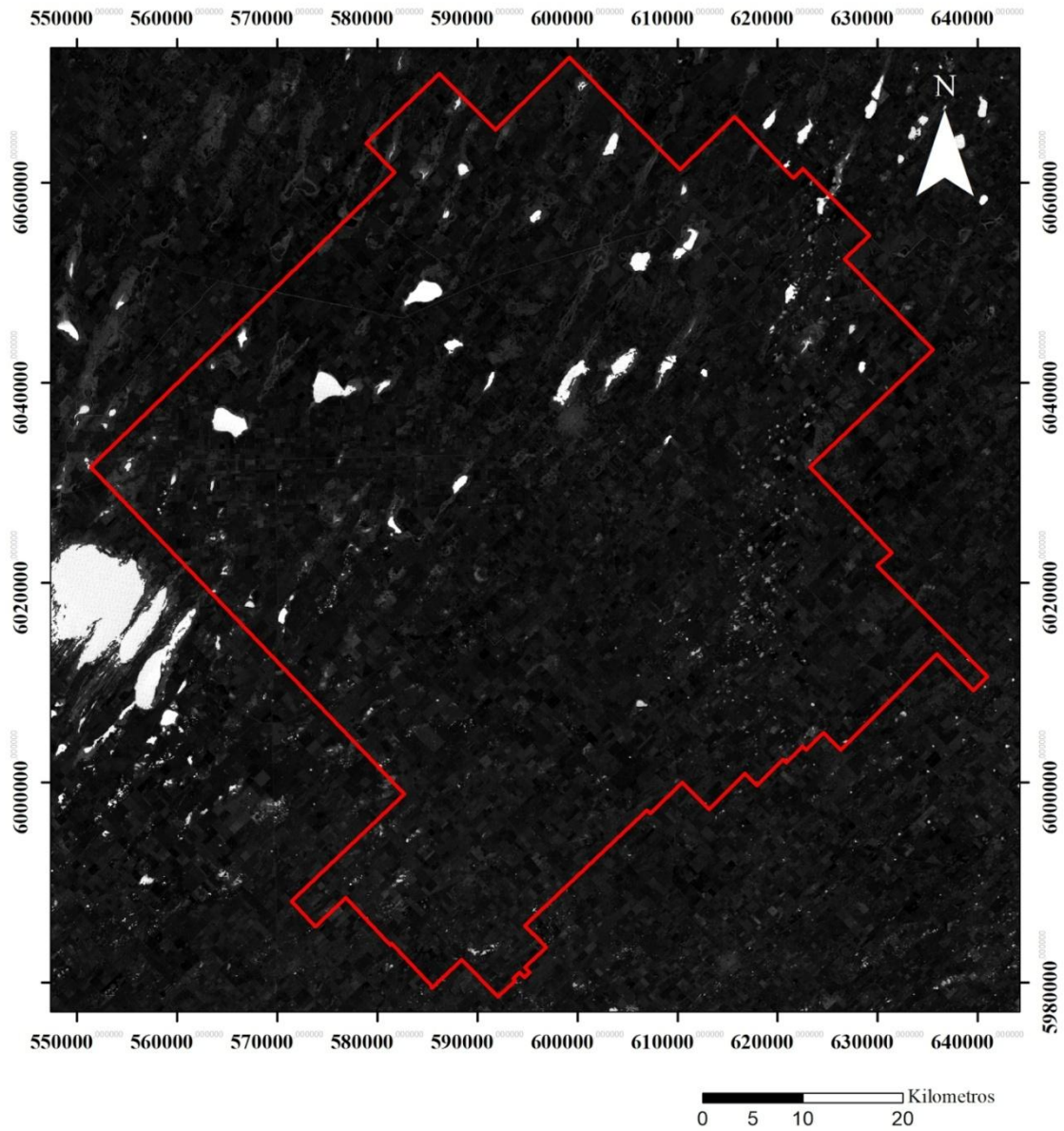
Zárate, M., y Rabassa, J. (2005). Geomorfología de la provincia de Buenos Aires. Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino (pp. 119-138). UNLP La Plata.

ANEXO

Índices normalizados para agua

Lansat 5 Marzo 2009

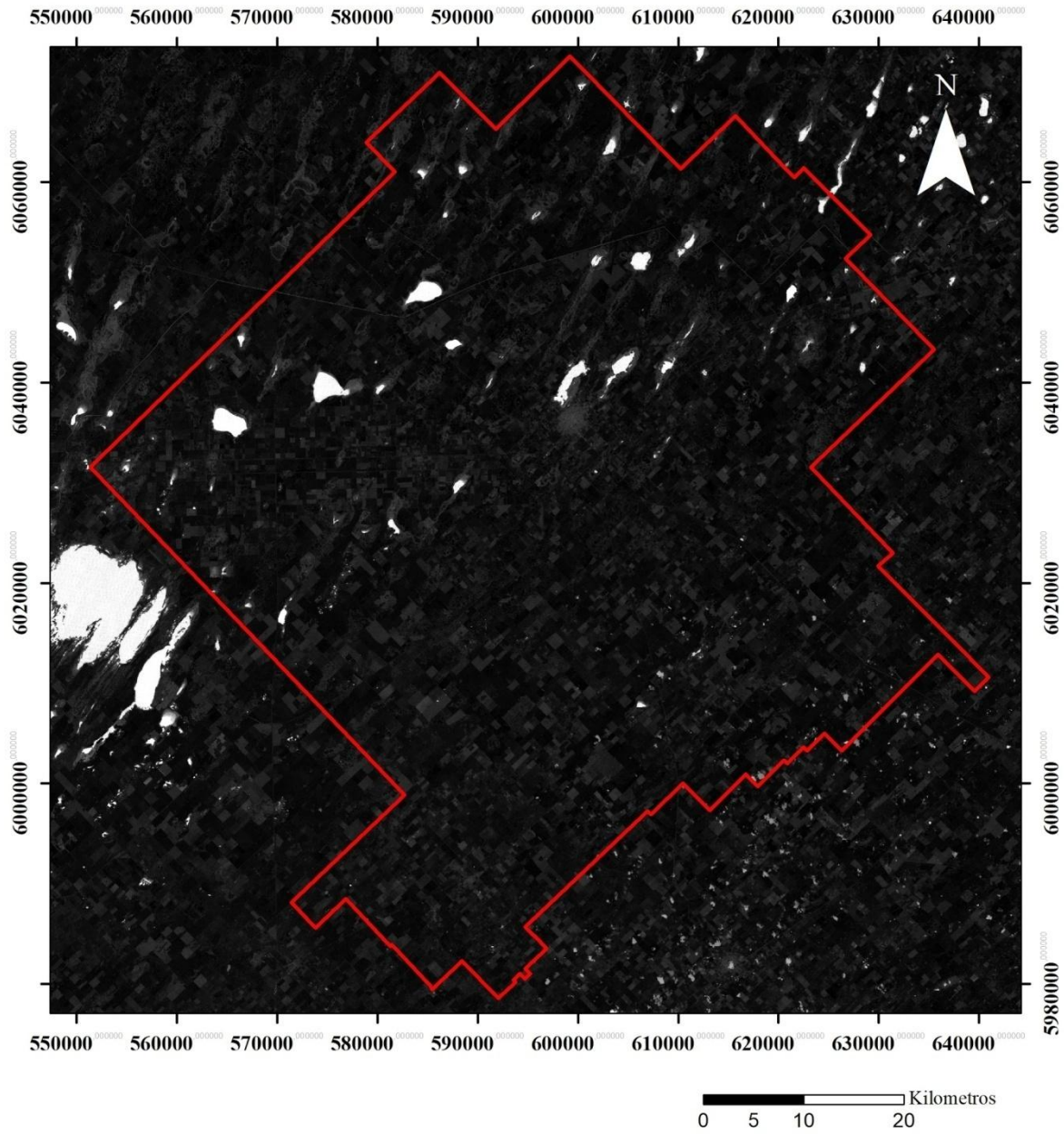
Método xu



Índices normalizados para agua

Lansat 5 Septiembre 2009

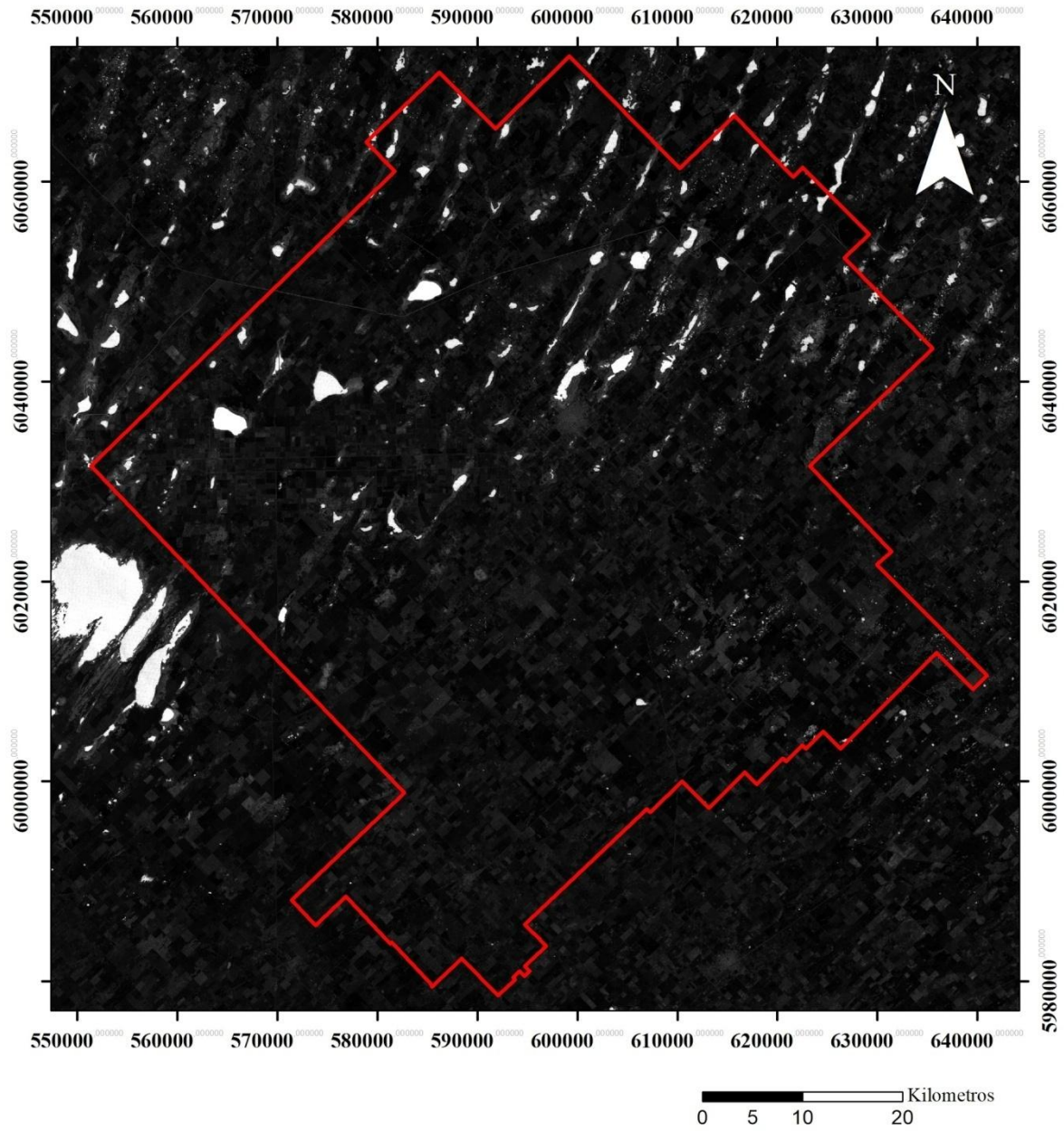
Método xu



Índices normalizados para agua

Lansat 5 Diciembre 2009

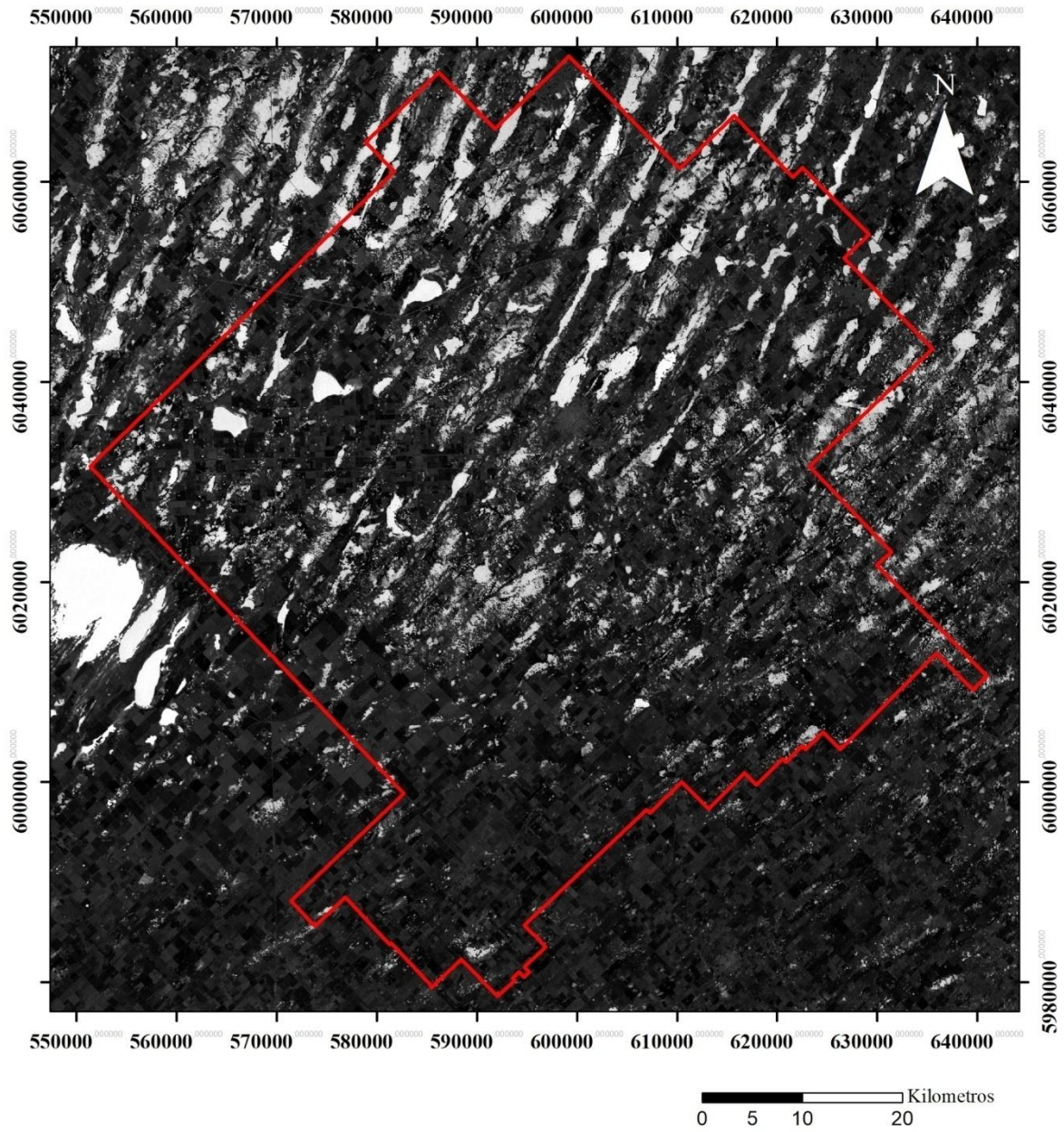
Método xu



Índices normalizados para agua

Lansat 7 Marzo 2012

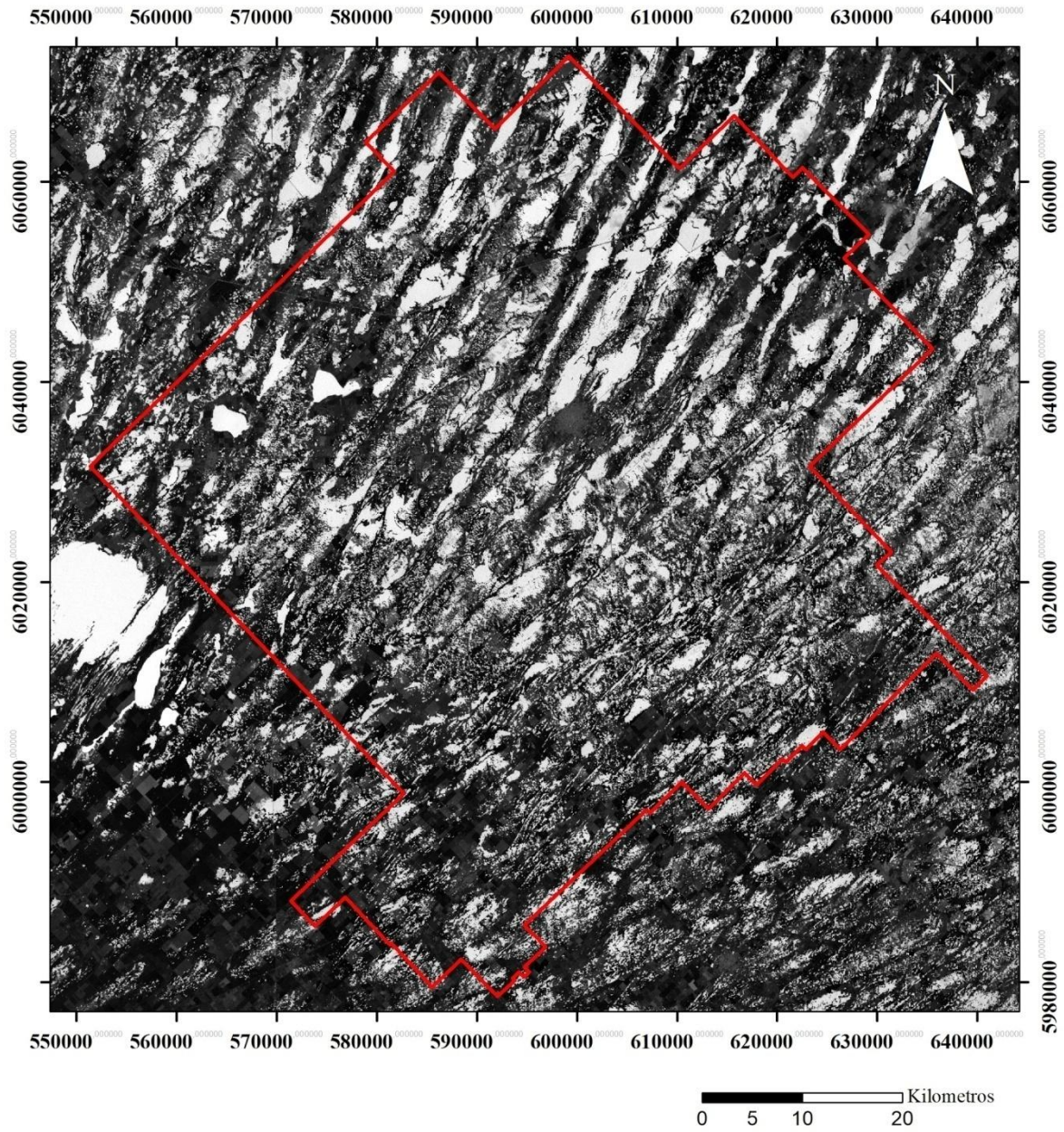
Método xu



Índices normalizados para agua

Lansat 7 Septiembre 2012

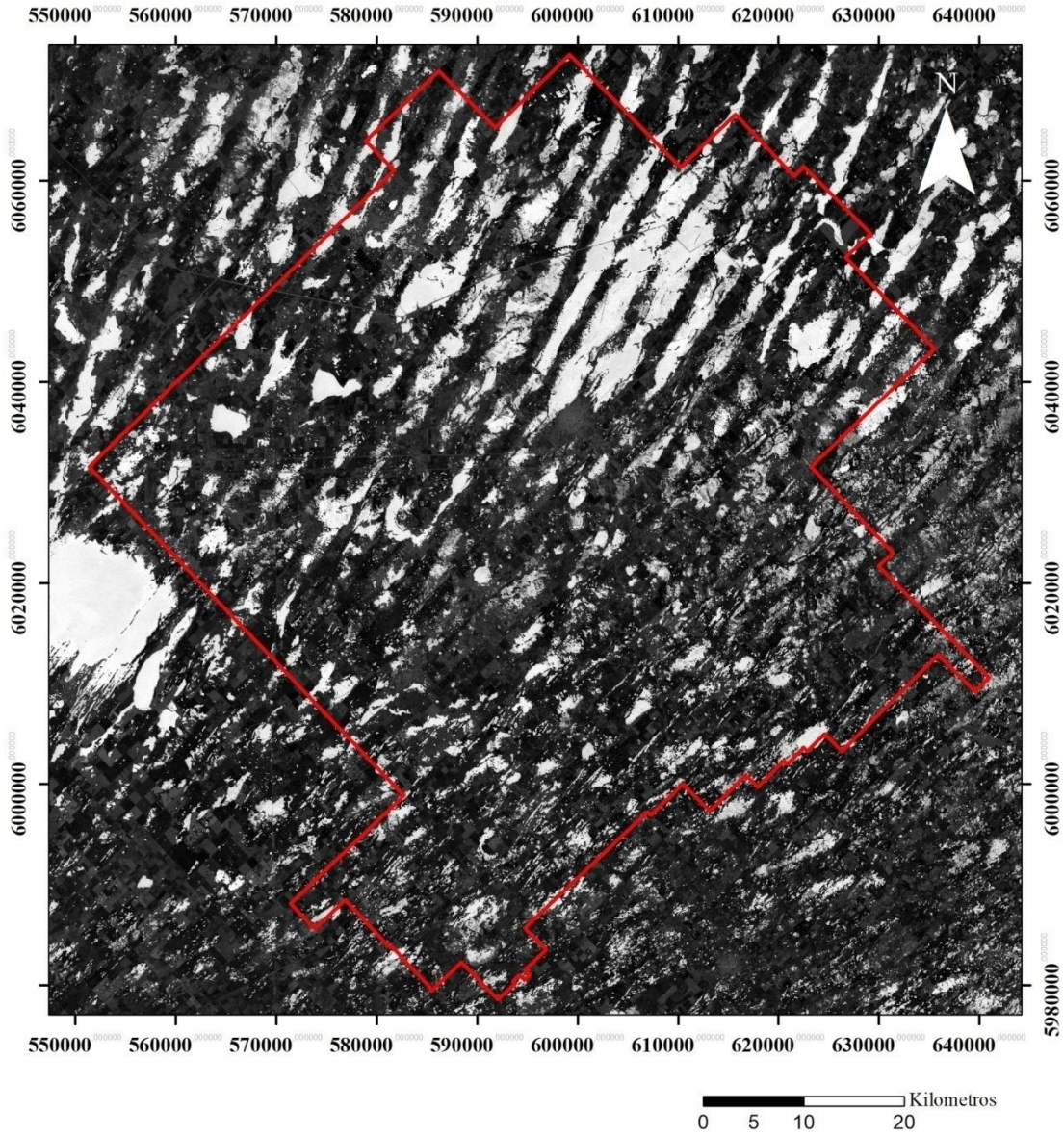
Método xu



Índices normalizados para agua

Lansat 7 Enero 2013

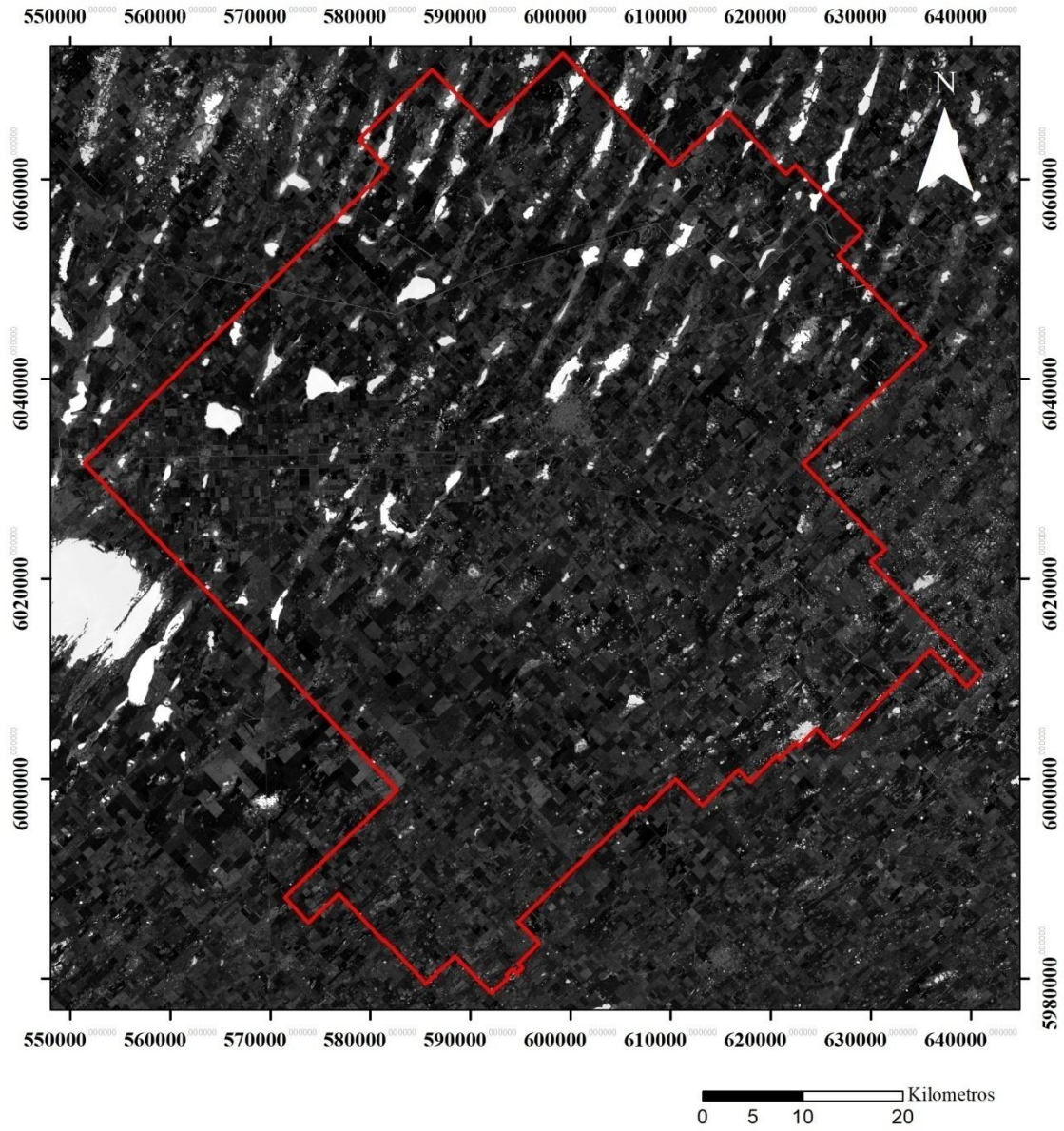
Método xu



Índices normalizados para agua

Lansat 8 Abril 2015

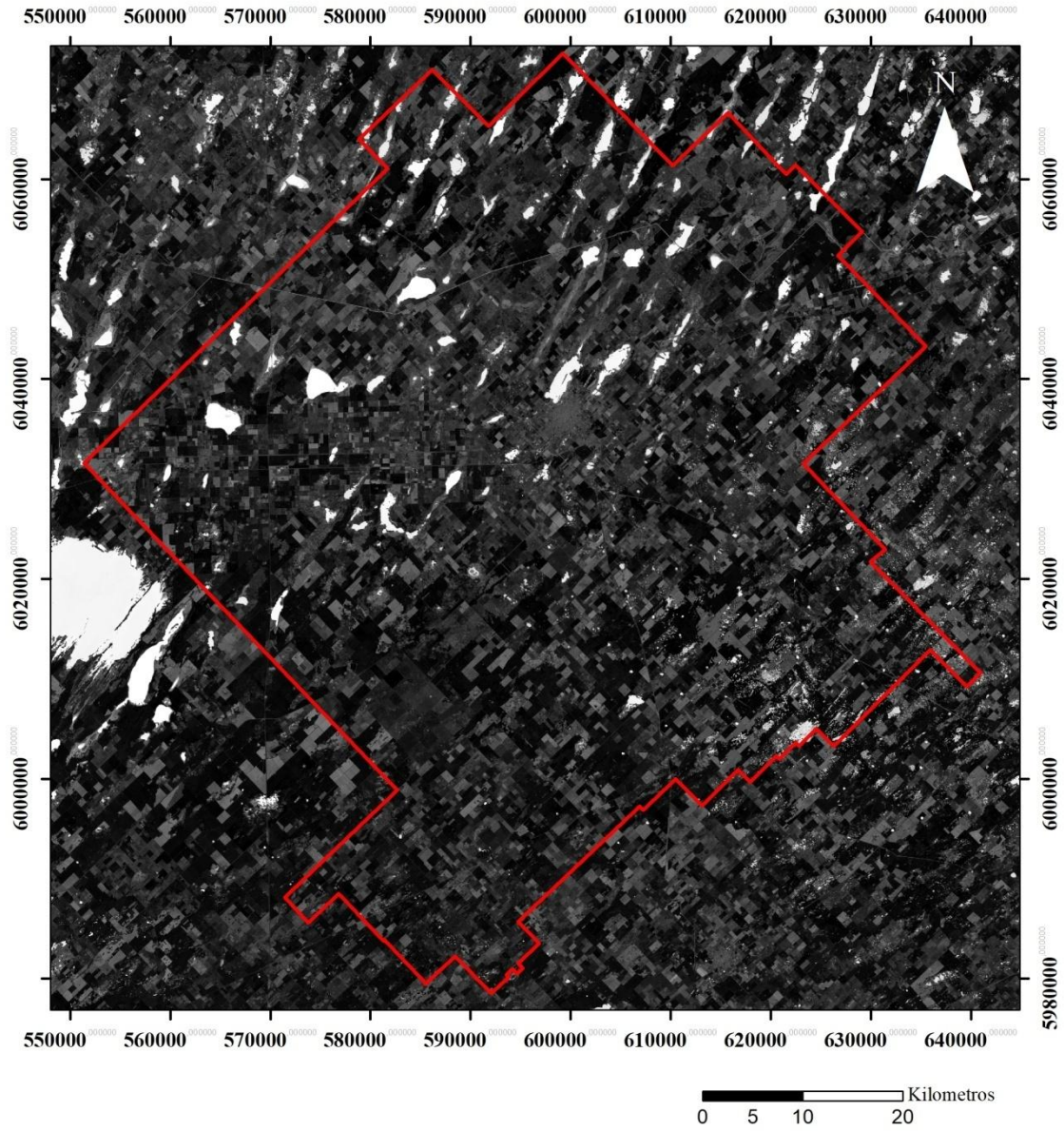
Método xu



Índices normalizados para agua

Lansat 8 Octubre 2015

Método xu



Índices normalizados para agua

Lansat 8 Diciembre 2015

Método xu

