



# Influencia del nivel freático somero sobre la temperatura de la superficie terrestre

Trabajo Fin de Máster

Master Oficial de Teledetección

VNIVERSITAT (ò-τ) FACULTAT de Física  
DE VALÈNCIA

**Christian Alberto Mancino**

Ch.a.mancino@gmail.com

Directores: Raquel Niclos Corts y Raúl E. Rivas

Burjassot, 2024

VNIVERSITAT (E) VALÈNCIA (E) Facultat de Física  
Departament de Física de la Terra i Termodinàmica  
Máster Oficial de Teledetección

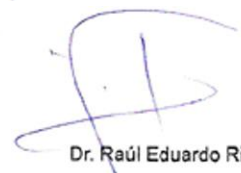
D<sup>a</sup>. *Raquel Niclòs Corts*, Profesora de la Universitat de València y Co-directora del estudiante del Máster Oficial de Teledetección, D. *Christian Alberto Mancino*

DECLARA: Que la presente Memoria titulada "INFLUENCIA DEL NIVEL FREÁTICO SOMERO SOBRE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE", ha sido realizada tanto bajo la dirección del Dr. *Raúl Eduardo Rivas* como mía, y constituye el Trabajo de Fin de Máster de este estudiante, dando el visto bueno para su presentación ante el Tribunal de Trabajo de Fin de Máster que corresponda.

Y para que así conste, firmo la presente declaración en

Burjassot, 12 de julio de 2024

Firmado por RAQUEL NICLOS CORTS -  
NIF:\*\*\*4468\*\* el día 12/07/2024

  
Dr. Raúl Eduardo Rivas

Agradecimientos:

*A mis directores Raquel y Raúl para haber aceptado dirigirme, por sus sugerencias, tiempo y conocimientos compartidos;*

*A mis compañeros del máster por compartir sus conocimientos de física y programación;*

*A mi familia que soy quien soy gracias a ellos, y en especial a mi hermana Natalia que fue un sostén emocional y colaboró con mi viaje y estancia en Valencia;*

*A los Drs. Pablo Weinzettel, Claudio Lexow y Sebastián Dietrich por sus experiencias e intercambios de ideas sobre este trabajo;*

*A Florencia y Laura por el apoyo administrativo desde Tandil;*

*Al Instituto de Hidrología de llanuras “Dr. Eduardo Usunoff” (IHLLA), la Comisión de investigaciones científicas (CIC) quienes hicieron posible la financiación para este Máster; y CCT Tandil del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la gestión y administración;*

*A los profesores del Máster Universitario en Teledetección de la Universidad de Valencia por compartir sus conocimiento y experiencias profesionales;*

*Y finalmente a mí, por la autopaciencia, perseverancia, dedicación y por aventurarme a este desafío académico después de muchos años de haber terminado la licenciatura en Geología.*

*¡A todos ellos infinitas gracias!*

*Valencia, 12/7/2024*

## Índice

Resumen .....	1
Summary .....	2
1. Introducción.....	3
1.1. Antecedentes .....	3
1.2. Objetivo .....	5
2. Caracterización de la zona de estudio .....	6
2.1. Ubicación .....	6
2.2. Clima .....	6
2.3. Hidrología e hidrogeología .....	7
2.4. Distribución del agua en el subsuelo .....	8
2.5. Suelo y cubierta vegetal .....	10
3. Funcionamiento del sistema acuífero-suelo-planta-atmósfera .....	11
4. Materiales y métodos .....	13
4.1. Datos de campo.....	14
4.1.1. Nivel freático del P10 .....	14
4.1.2. Precipitación del SMN.....	14
4.2. Datos de satélite y reanálisis .....	14
4.2.1. Producto ETp Hargreaves .....	15
4.2.2. Producto LST .....	16
4.2.3. Producto PPT-ETo (Déficit potencial de agua).....	16
4.2.4. Producto NDVI .....	17
4.3. Función de temperaturas .....	17
5. Resultados .....	17
6. Valoración del modelo.....	24
7. Conclusiones.....	26
8. Bibliografía.....	27
9. Anexos .....	30

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	6
Figura 2. Distribución mensual (izquierda)/anual (derecha) de las precipitaciones. ....	7

Figura 3. Hidrología y topografía del área de estudio. Ubicación del freatómetro (P10, latitud: -36,37668°S; Longitud: -59,48834°O Ea. La Madrugada) y de la estación meteorológica del SMN (Azul Aero). .....	7
Figura 4. Perfil transversal de la cuenca en una sección longitudinal suroeste (SO)-noreste (NE) de la vertiente sur del río Salado. La línea de puntos indica el nivel freático.....	8
Figura 5. Distribución y comportamiento del agua en el suelo, donde $p$ es la presión del agua en el suelo, $z$ es la profundidad, $\Theta$ es el contenido de agua en el suelo, $\Theta_{fc}$ es la capacidad de campo, $\Theta_{pwp}$ es el punto de marchitez permanente, $\psi$ es la carga de presión, $\psi_{ae}$ es la presión de entrada de aire; y $\phi$ es el potencial de succión (Tomado de la portada de la XII Jornadas de investigación en la Zona No Saturada del Suelo. Alcalá de Henares, noviembre de 2015. Editores: Silvia Martínez Pérez y Antonio Sastre Merlín).....	9
Figura 6. Tipos de suelos según INTA en la cuenca sur del río Salado y tipo de suelo en el freatómetro P10. ....	11
Figura 7. Modelo conceptual de funcionamiento del sistema en la zona de estudio. a) NF someros, b) NF profundos. ....	12
Figura 8. Diagrama de trabajo con diferentes resoluciones temporales: instantánea, diaria y escala mensual.....	13
Figura 9. Ubicación del Freatómetro P10 y ubicación del píxel analizado (Izquierda), entorno del freatómetro (derecha). ....	15
Figura 10. Fluctuaciones del nivel freático (NF) instantáneo, las precipitaciones (PPT) anuales y ciclos hidrogeológicos para la serie 2007-2023.....	18
Figura 11. Influencia del nivel freático en dos situaciones hidrológicas distintas, sequía en enero del 2010 con NF profundos (Izquierda) e inundación en septiembre del 2014 con NF someros (Derecha). Satélite EOS-Aqua/Terra sensor MODIS, composición color verdadero (RGB143).....	19
Figura 12. Suavizado de la LST para el período 2007-2023. ....	19
Figura 13. Correspondencia entre el nivel freático (NF) diario, precipitaciones diarias (PPT) y la LST suavizada. Ciclo Hidrogeológico con períodos de recarga y descarga del acuífero .....	20
Figura 14. Comportamiento de producto ETp Hargreaves diaria en relación con los datos tomados in situ (P10) del nivel freático (NF) instantáneo (arriba) y la precipitación (PPT) registrada por el SMN - ETp diaria (abajo). ....	21
Figura 15. Regresiones lineales intermensuales de la LST (los datos tienen el filtrado del efecto de precipitación). ....	21
Figura 16. Relación entre el déficit de agua potencial (PPT-ETo) mensual y el nivel freático (NF) instantáneo para la serie temporal 2007-2023. ....	22
<i>Figura 17. Variaciones del índice de vegetación normalizada (NDVI) respecto a la LST en los meses de enero seleccionados. ....</i>	<i>22</i>

Figura 18. Dispersión de datos lograda para el conjunto de meses de enero considerados, función exponencial ajustada y coeficiente de determinación. ....	23
Figura 19. Comportamiento del factor de influencia del nivel freático sobre la transpiración, el NDVI y la LST.....	24
Figura 20. a) Mapa del NDV, b) Mapa de la influencia del NF modelado sobre el área de valoración del método (diferencias entre valores medidos y modelados en rectángulo blanco). Todos los mapas corresponden a la fecha 28/01/2018. ....	26
Anexo, Figura A. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P03 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996. ....	30
Anexo, Figura B. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P05 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996. ....	31
Anexo, Figura C. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P06 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996. ....	32
Anexo, Figura D. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P07 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996. ....	33
Anexo, Figura E. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P08 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996. ....	34
Anexo, Figura F. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P09 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996. ....	35
Anexo, Figura G. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P10 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996. ....	36
Anexo, Figura H. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P20 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996. ....	37
Anexo, Figura I. Comportamiento del nivel freático y la LST suavizada en la serie temporal analizada 2007-2023 .....	38

## Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción complementaria de los antecedentes referidos en los párrafos anteriores.....	4
Tabla 2. Estadísticos de las variables analizadas para toda la serie 2007-2023: temperatura de superficie terrestre (LST), nivel freático (NF), precipitación del Servicio Meteorológico Nacional (PPT) y evapotranspiración potencial (ETp). ....	18
Tabla 3. Disponibilidad de agua (PPT-ETo) para los meses de enero. ....	22
Tabla 4. Valores medidos y estimados, diferencia y Estadísticos (BIAS, DS y RMSD) para la valoración del modelo propuesto. Desviación estándar (SD) de las diferencias, root-mean-square difference (RMSD; la suma cuadrática de bias y SD) .....	25
Anexo, Tabla A. Valores de las variables físicas utilizadas en los meses de enero para el análisis. ....	39



## Resumen

El efecto de la influencia del nivel freático (NF) y la franja capilar son esenciales en la dinámica del agua en el suelo, afectando a la disponibilidad de agua para las plantas, a la humedad del suelo (HS), a la evapotranspiración y a la temperatura de superficie terrestre (LST, del inglés). Las investigaciones basadas en datos in situ y datos derivados de satélites y reanálisis sobre la relación entre el NF y la LST representan un desafío significativo y han sido abordadas desde diversas perspectivas por distintos autores, considerando distintas metodologías, diferentes períodos estacionales, diferentes climas, profundidades del NF, tipos de suelo, cubiertas vegetales, además del uso de distintos sensores y satélites.

En este trabajo de fin de máster se analizó la influencia del NF y la franja capilar sobre el comportamiento-respuesta de la LST en la vertiente sur de la cuenca del río Salado, provincia de Buenos Aires, Argentina. Para ello, se utilizaron datos medidos en campo del NF y precipitaciones, junto con productos satelitales de la serie Landsat y de reanálisis tomados del repositorio de Climate Engine. Así, se utilizaron datos de la LST, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la evapotranspiración potencial (ETp) Hargreaves por reanálisis ERA5-Ag y el índice de déficit potencial de agua, que usa la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración de referencia (ETo). La serie temporal analizada abarca desde febrero 2007 hasta finales de diciembre 2023.

El análisis de los datos reveló una relación inversa entre la LST y el NF, particularmente en períodos de alta demanda evaporativa, precipitaciones nulas y suelos secos, que solo se daban en enero (verano del Hemisferio sur). Estas condiciones son excluyentes para analizar el funcionamiento del modelo, garantizando que la capa superficial del suelo esté seca y asegurando que el único proceso que ocurre es el de transpiración de la planta, dado solamente por de la influencia del NF y la franja capilar desde abajo.

Esta investigación introduce un enfoque metodológico distintivo al usar una función exponencial que representa mejor los descensos del NF en el comportamiento hidrogeológico del acuífero. Se comprobó que cuando el NF llega a una profundidad de 1,89 m el proceso de transpiración es máximo enfriando la superficie y reduciendo de esta manera la LST. Mientras que, por debajo de los 4 m la influencia del NF y la franja capilar es mínima y la LST es máxima. A partir de la función desarrollada se definieron 2 parámetros del acuífero: factor de influencia del NF y factor de influencia térmico. Ambos parámetros, son propios de este acuífero, y de las propiedades texturales y edáficas de los suelos de la vertiente sur del río Salado.

## Summary

The effect of the influence of the groundwater table level (GTL) and the capillary fringe are essential in soil water dynamics, affecting water availability for plants, soil moisture, evapotranspiration, and land surface temperature (LST). Research based on in situ data and data derived from satellites and reanalysis on the relationship between GTL and LST represents a significant challenge and has been approached from various perspectives by different authors, considering different methodologies, seasonal periods, climates, GTL depths, soil types, vegetation covers, and the use of different sensors and satellites.

In this master's thesis, the influence of the GTL and the capillary fringe on the behavior-response of LST was analyzed on the southern slope of the Salado River basin, Buenos Aires province, Argentina. For this, field-measured data of the GTL and precipitation were used, along with satellite products from the Landsat series and reanalysis taken from the Climate Engine repository. Data of LST, normalized difference vegetation index (NDVI), potential evapotranspiration (ET<sub>p</sub>) Hargreaves by ERA5-Ag reanalysis, and the potential water deficit index, which uses the difference between precipitation and reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), were used. The analyzed time series spans from February, 2007 to the end of December, 2023.

Data analysis revealed an inverse relationship between LST and GTL, particularly during periods of high evaporative demand, zero precipitation, and dry soils, which only occurred in January (summer in the Southern Hemisphere). These conditions are exclusive for analyzing the model's performance, ensuring that the soil surface layer is dry and that the only process occurring is plant transpiration, solely influenced by the GTL and capillary fringe from below.

This research introduces a distinctive methodological approach by using an exponential function that better represents the declines of the GTL in the aquifer's hydrogeological behavior. It was found that when the GTL reaches a depth of 1.89 m, the transpiration process is maximal, cooling the surface and thus reducing LST. Conversely, below 4 m, the influence of the GTL and the capillary fringe is minimal, and LST is maximal. From the developed function, two parameters of the aquifer were defined: the GTL influence factor and the thermal influence factor. Both parameters are specific to this aquifer and the textural and edaphic properties of the soils on the southern slope of the Salado River.

## 1. Introducción

A continuación, se presenta una breve descripción de la evolución del conocimiento sobre la relación entre la HS, el NF y la LST.

### 1.1. Antecedentes

Los primeros estudios sobre los efectos del agua subterránea en la temperatura del suelo se remontan a la década de 1930. Entre las primeras publicaciones, Kappelmeyer (1957) utilizó las temperaturas del suelo a 1,5 m de profundidad para identificar fisuras con agua caliente (geotermia). Chase (1969) usando sensores remotos aéreos, midió temperaturas radiativas en grandes áreas sobre salinas y sedimentos glaciarios cubiertos por praderas vegetadas. En la investigación de Myers y Moore (1972) se utilizaron radiómetros térmicos en vuelos estacionales y encontraron que la mejor época para detectar térmicamente acuíferos someros era a mediados del verano, correlacionando la temperatura del suelo con el espesor del acuífero. Desde entonces, se ha investigado cómo la temperatura del suelo a profundidades superficiales (0,5 a 2,0 m) puede ayudar a localizar acuíferos y delinear sistemas de flujo de agua subterránea.

Con la llegada de la teledetección fue posible medir temperaturas radiativas en grandes áreas (Heilman y Moore, 1982). Heilman y Moore (1982) correlacionaron en el verano, las temperaturas radiométricas diurnas con profundidades del NF, sugiriendo que los efectos complementarios de los NFs poco profundos y la HS sobre las temperaturas diurnas no se pueden separar. Alkhaier et al. (2012a) abocan sus esfuerzos en entender primero los procesos físicos básicos involucrados abordando simulaciones numéricas (SHAW) que consideran varios aspectos del impacto del agua subterránea superficial en la temperatura y el balance de energía de la superficie terrestre. En un documento complementario, Alkhaier et al. (2012b) respaldan los hallazgos al investigar la interrelación entre la profundidad del NF medido in situ y la LST medida por el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), pero para condiciones específicas: durante 5 días en invierno, en un área con 90 puntos de muestreo, escasez de lluvia, sin variaciones del NF, suelo desnudo con barbecho, alta evapotranspiración potencial y gran contraste de temperatura entre el día y la noche (-5°C y 14°C). Pablos et al. (2016) evaluaron la dinámica de la HS y la LST a escalas diarias y estacionales utilizando cuatro años de datos, tanto de observaciones in situ como derivadas de los satélites EOS-Aqua/Terra MODIS y Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS). Concluyeron que a escala diaria hay una mayor correlación de la HS con la LST máxima diaria, mientras que para las series temporales muestran períodos de acoplamiento HS-LST, correspondientes a primavera, verano y otoño; y períodos de desacoplamiento HS-LST, correspondientes a invierno. Así, se muestra el verano con mejor correlación, pero con valores bajos de ajuste en el coeficiente de correlación, debido a que no se excluyen los días con precipitación.

Otros autores han utilizado estas técnicas, como es el caso de Hamzeh et al. (2018), donde han realizado mapas de la relación entre el NF y la LST usando una imagen de Landsat 8 para 1 día de adquisición en verano sobre varios puntos de muestreo de la HS y el NF estabilizado (entendiendo estabilizado como sin variaciones diarias). Sin embargo, en el trabajo no mencionan el tipo de cubierta vegetal, el cual tiene relevancia en el comportamiento del sistema. Concluyeron que el NF y la HS pueden estimarse y ser cartografiados utilizando la LST recuperada de las imágenes de satélite.

Subzar Malik et al. (2021) han analizado el efecto del NF sobre la HS y temperatura de suelo; y la LST en dos sitios de observación con agricultura y para diferentes NF (mayor y menor a 5 m), usando imágenes Landsat 8 para un período de 6 meses durante noviembre y abril del Hemisferio Norte (HN) (otoño, invierno, primavera) previo a la etapa de monzón. Durante el período de medición, los NF tuvieron una variación de 2 m en ambos emplazamientos. Concluyeron que el emplazamiento donde el NF está cerca de la superficie tiene una fuerte correlación con los parámetros medidos, a diferencia del área experimental con NF profundos donde la correlación es pobre.

Un resumen de los antecedentes de los estudios sobre la influencia del agua subterránea en la LST se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción complementaria de los antecedentes referidos en los párrafos anteriores.

<b>Autor(es)</b>	<b>Lugar y duración estudio</b>	<b>Suelo</b>	<b>Vegetación</b>	<b>Metodología</b>	<b>Objetivo</b>
Kappelmeyer (1957)	No especificada	No especificado	No especificado	Medición in situ Temperatura del suelo a 1.5m	Identificar fisuras con agua caliente
Chase (1969)	Sur Alberta, Canadá	Sedimentos glaciarios, salinas	Praderas con cubierta vegetal indiferenciada	Sensores remotos aéreos	Medir temperaturas radiativas en grandes áreas.
Myers y Moore (1972)	1 día a mediados del verano. Centro-Oeste de EE UU	Sedimentos glaciarios	No especificado	Medición In situ con radiómetros térmicos en vuelo	Correlacionar la temperatura del suelo con el espesor del acuífero
Heilman y Moore (1982)	4 momentos del verano HN (en junio, julio, agosto). Sur de Dakota, EE. UU.	Depósitos glaciarios	Avena, trigo de primavera, cebada, cultivos en hileras (maíz, soja), y pastizales	NF in situ, imágenes de la misión HCMM radiómetro de dos canales	Correlacionar la LST diurna con las profundidades del NF.
Alkhaier et al. (2012a)	1 año, veranos cálidos y secos; e inviernos frescos y húmedos	Suelo con partes iguales de arena, limo y arcilla	Sin cobertura	NF in situ, datos meteorológicos y simulaciones numéricas (SHAW) , 2 condiciones: NF superficiales y profundos	Entender los procesos físicos básicos del impacto del agua subterránea superficial en la temperatura y el balance de energía de la superficie terrestre.
Pablos et al (2016)	Diario y serie temporal de 4 años, en Cca. Río Duero España	No especificado	No especificado	LST, HS in situ y satelitales MODIS y SMOS	Evaluar la dinámica de la HS y la LST a escalas diarias y estacionales

<b>Autor(es)</b>	<b>Lugar y duración estudio</b>	<b>Suelo</b>	<b>Vegetación</b>	<b>Metodología</b>	<b>Objetivo</b>
S. Hamzeh et al. (2018)	1 día de verano (Junio, HN) al suroeste de Irán	Suelos salinos	Libre de vegetación	NF, HS in situ e imágenes Landsat 8	Mapear arealmente la relación entre el NF y la LST con datos de satélite
Subzar Malik et al. (2021)	6 meses previo al monzón, de otoño a primavera, en la cca. Tawa, India (PPT 1200mm)	Suelo aluvial	Área agrícola	NF, HS, Ts in situ e imágenes Landsat 8 en 2 sitios de observación NF altos y bajos.	Analizar el efecto del NF sobre la HS y temperatura del suelo; y la LST en sitios agrícolas con diferentes profundidades del NF

## 1.2. Objetivo

Como se ha mencionado, las investigaciones basadas en datos in situ y datos derivados de satélites sobre la relación entre el agua subterránea y la LST representa un desafío significativo. Ha sido abordada desde diversas perspectivas metodológicas, abarcando diferentes períodos estacionales del año, clima, profundidades del NF, tipos de suelo, cobertura vegetal; y el uso de distintos sensores y satélites.

En ese escenario, este trabajo final de máster (TFM) se enfoca en comprender el funcionamiento del sistema acuífero-suelo-planta-atmósfera en un sector de la región pampeana, Argentina; utilizando datos in situ e información de satélite. La hipótesis de este estudio es evaluar si la LST es capaz de responder ante la influencia de la dinámica del NF mediante el análisis de observaciones in situ (NF y precipitación) y productos derivados de datos de satélites y reanálisis (la LST, la evapotranspiración potencial Hargreaves (ETp), el déficit de agua potencial (PPT-ETo) y el índice de vegetación normalizada (NDVI)) durante el período febrero 2007 y diciembre 2023.

Para probar esta hipótesis se deben encontrar situaciones excepcionales en la capa superficial del suelo que iremos mencionando a lo largo del texto. En este marco, el TFM se estructura comenzando con una introducción que aborda los antecedentes de la temática y el objetivo (Capítulo 1), seguida por la caracterización de la zona de estudio (Capítulo 2), la explicación del funcionamiento del sistema (Capítulo 3), la propuesta de una metodología de análisis (Capítulo 4), la presentación de los resultados (Capítulos 5); finalmente una valoración del modelo utilizado y las conclusiones (Capítulos 6 y 7).

## 2. Caracterización de la zona de estudio

### 2.1. Ubicación

La zona de estudio se encuentra en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina; en la denominada pampa húmeda sobre la cual se llevan a cabo prácticas agropecuarias y cuyos beneficios representan una porción sustancial del PBI nacional.

Dentro de las cuencas hídricas más importantes de la provincia de Buenos Aires (Figura 1), se destaca la vertiente sur del río Salado y sus subcuencas asociadas (40.000 km<sup>2</sup>). En la subcuenca baja del arroyo del Azul se encuentra el freaímetro con los niveles freáticos analizados en este TFM. Las coordenadas del freaímetro P10 (ubicado en la Ea. La Madrugada) son latitud: -36,37668°S; Longitud: -59,48834°O con una elevación de 69,9 msnm (Figura 1).

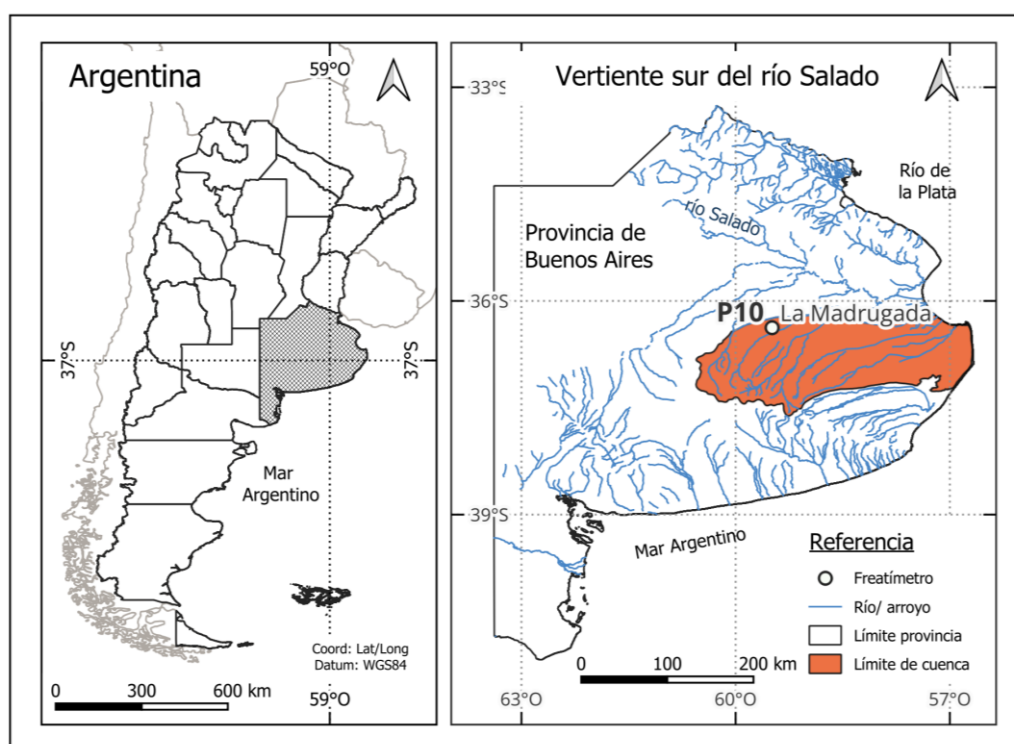


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

### 2.2. Clima

Según la clasificación climática de Köppen, el clima en el centro de la provincia de Buenos Aires es templado húmedo con veranos cálidos, alternando períodos de inundaciones y sequías. La distribución de la precipitación anual dentro de la cuenca no es uniforme, con más lluvias en el norte de la cuenca y en menor proporción al sur. Según los datos recolectados del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el período 2007-2023 el promedio anual de las precipitaciones para la estación meteorológica de Azul Aéreo (la más cercana al freaímetro analizado) fue de 911,7 mm, siendo los veranos con mayor registro de precipitaciones (marzo) y los inviernos con menos precipitaciones (junio). El año 2012 fue el que registró más precipitaciones con 1448,7 mm y el 2008 el año con menos precipitación, con 665,4 mm (Figura 2).

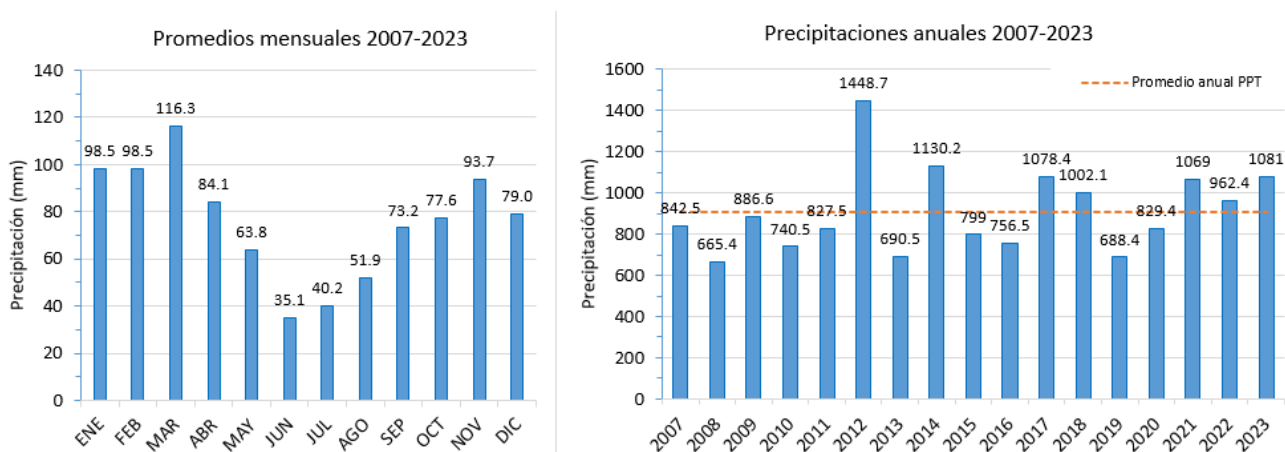


Figura 2. Distribución mensual (izquierda)/anual (derecha) de las precipitaciones.

### 2.3. Hidrología e hidrogeología

La vertiente sur del río Salado es una cuenca de llanura con una pendiente promedio del orden del 1 % donde predominan los flujos verticales respecto a los horizontales. El 85 % del agua que ingresa al sistema se va por los procesos de evaporación y transpiración, el 10 % por infiltración y el 5 % restante por escurrimiento superficial (Weinzettel y Usunoff, 2001).

La Figura 3 muestra la topografía de la zona de estudio obtenida del Modelo de Elevación Digital Global ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) (GDEM, resolución de píxeles de 30 m).

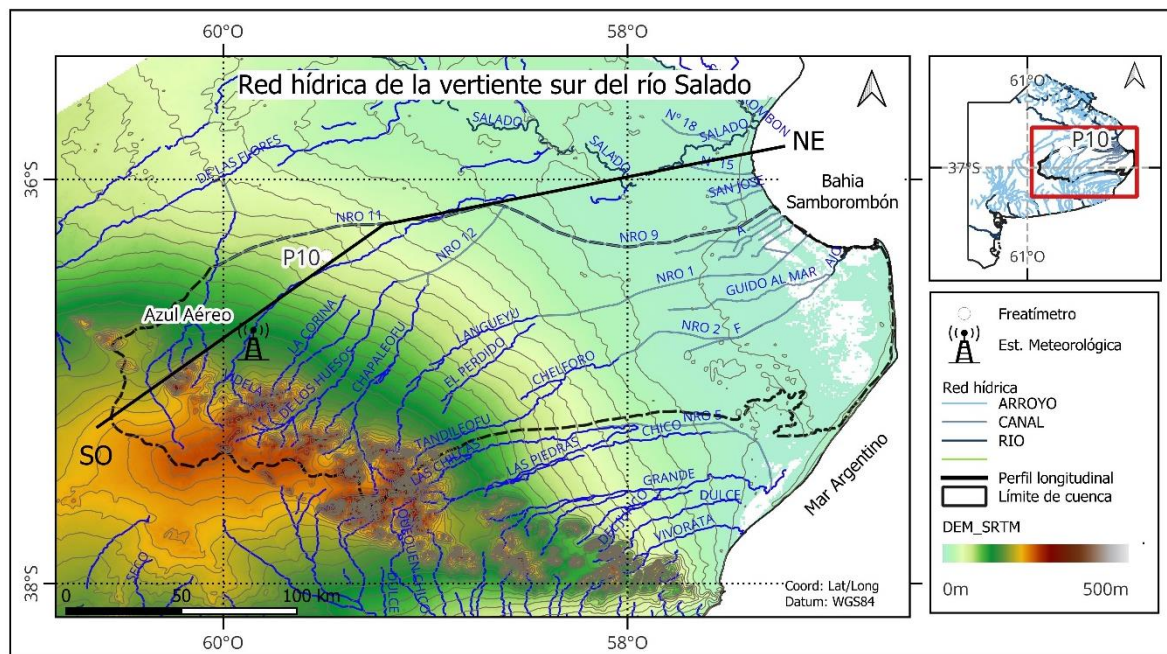


Figura 3. Hidrología y topografía del área de estudio. Ubicación del freatímetro (P10, latitud: -36,37668°S; Longitud: -59,48834°O Ea. La Madrugada) y de la estación meteorológica del SMN (Azul Aero).

La cuenca tiene las nacientes de los arroyos más importantes en el sistema serrano de Tandilia (cuenca alta, pendiente 5 %) con una altura aproximada de 502 msnm que descarga sus aguas en la

Bahía de Samborombón (cuenca baja, pendiente 0.1 %), situada en la parte distal del estuario del río de la Plata. El área serrana y la llana están conectadas por una zona pedemontana semiplana (cuenca media, pendiente 0,5-0,8 %) (Figura 4).

Los afloramientos del basamento hidrogeológico se encuentran en el extremo suroeste de la cuenca, y se corresponden con rocas metamórficas e ígneas. Tales rocas se profundizan a lo largo del eje longitudinal de la cuenca (SO-NE) y, por ejemplo, a la altura del freatómetro analizado se las detecta a una profundidad de 500 m (Usunoff et al, 2000). Sobre este basamento se disponen sedimentos cuaternarios, que Fidalgo et al. (1975) denominan Pampeano y Pospampeano (Figura 4). El Pampeano se caracteriza por limos castaño rojizos frecuentemente cementados con carbonatos. Las Figuras A a H, del Anexo muestran la descripción litológica de campo de los primeros 5 m del perfil en distintas perforaciones. Lo cubren los materiales del Pospampeano, que son principalmente limos arenosos de origen eólico y otros sedimentos de granulometría similar de origen fluvial y lacustre. El acuífero regional es verticalmente heterogéneo en virtud de los eventos de deposición sedimentaria que le dieron origen. Sin embargo, su comportamiento a la escala del trabajo permite considerarlo como un acuífero único, libre, y sin variaciones potenciométricas importantes con la profundidad (Usunoff et al., 2000). Las profundidades de los NF varían desde 20 m en la cuenca alta hasta los 0,5 m o 0 m cuando afloran en lagunas de la cuenca baja.

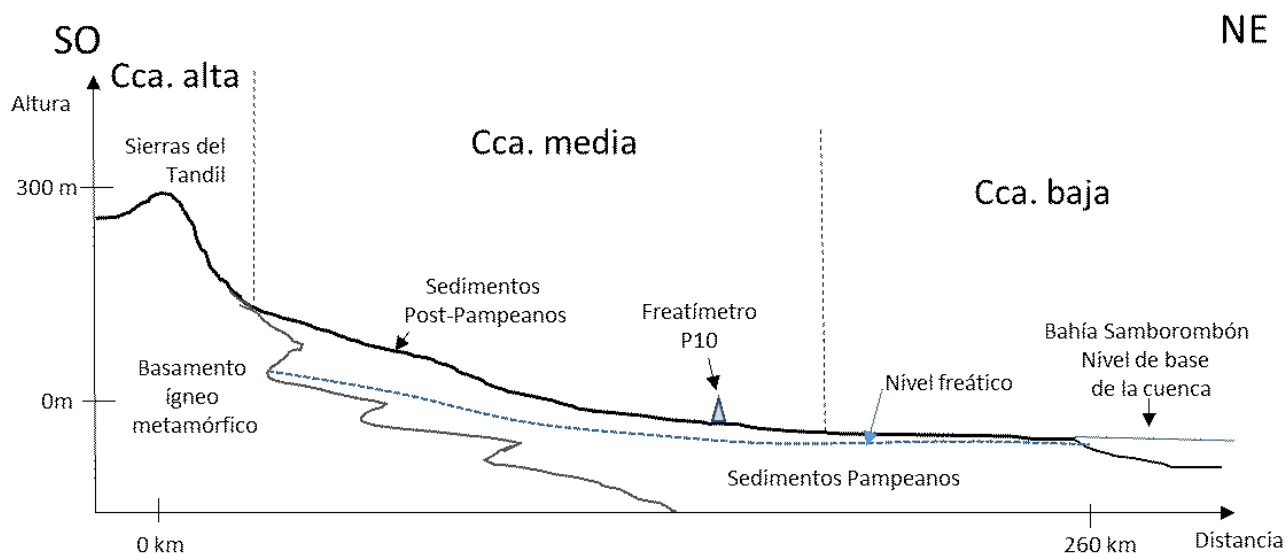


Figura 4. Perfil transversal de la cuenca en una sección longitudinal suroeste (SO)-noreste (NE) de la vertiente sur del río Salado. La línea de puntos indica el nivel freático.

## 2.4. Distribución del agua en el subsuelo

El subsuelo consta de 2 zonas: zona no saturada y zona saturada, esta división se basa en la distribución y el comportamiento del agua en relación con el suelo (Figura 5). Estudiar estas zonas es fundamental para entender cómo el agua se mueve a través del subsuelo, cómo son los efectos en los cultivos, y cómo afecta a la HS y la LST.

Zona No Saturada (ZNS): es la capa en la que los poros contienen tanto aire como agua. En esta zona, el agua se encuentra en forma de película alrededor de las partículas del suelo y dentro de los poros,

pero no llena completamente estos espacios. La cantidad de agua en la zona no saturada varía dependiendo de la precipitación, la evapotranspiración y las características del suelo. Dentro de la ZNS se encuentra:

- La zona edáfica: capa superficial del suelo donde ocurren la mayoría de las actividades biológicas y donde las raíces de las plantas están más concentradas, pueden alcanzar profundidades máximas que van desde 1 m para los pastizales naturales (Sakalauskas et al. 2001) hasta 0,6 m para las pasturas implantadas (Nosetto et al. 2012). El contenido de agua en la zona edáfica varía significativamente debido a los procesos de infiltración, evaporación y transpiración. En esta zona, las presiones son negativas (succión), lo que significa que el agua está bajo tensión y es retenida en los poros del suelo (Figura 5).

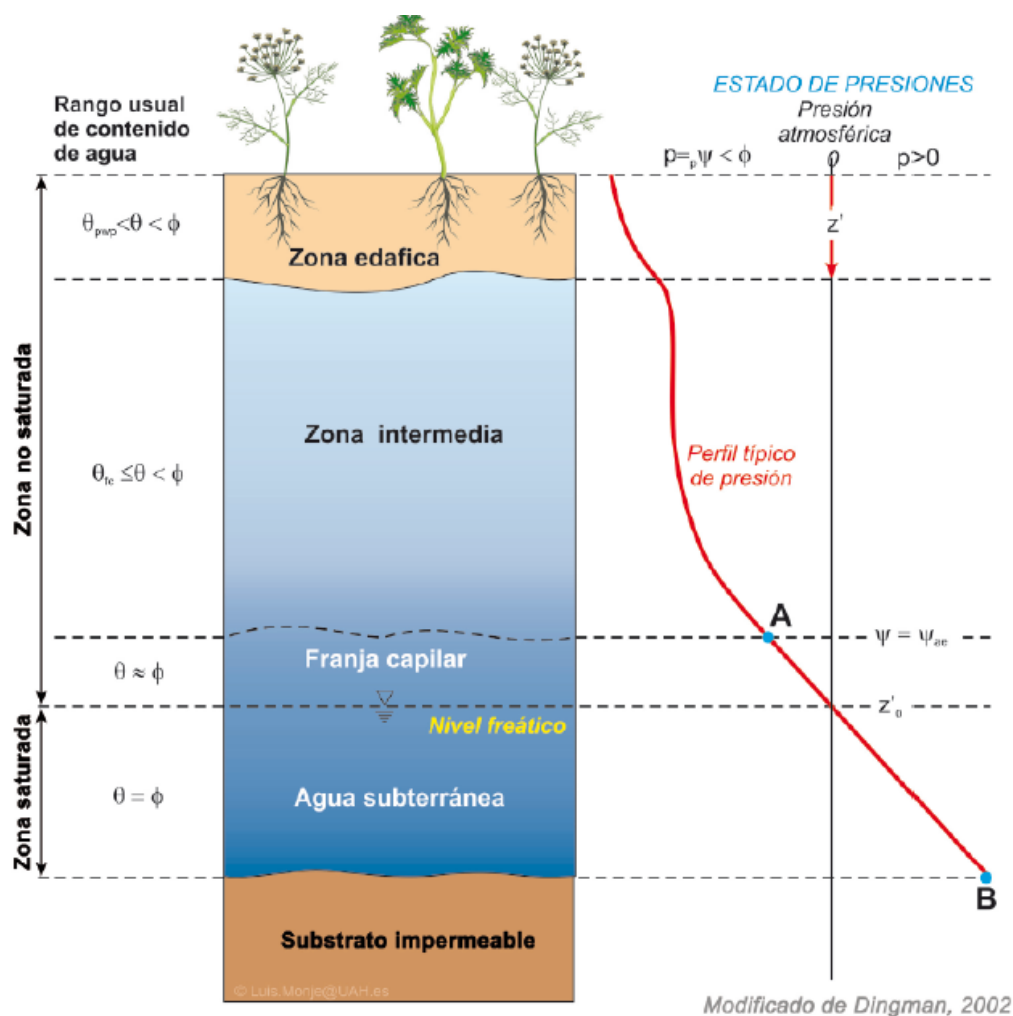


Figura 5. Distribución y comportamiento del agua en el suelo, donde  $p$  es la presión del agua en el suelo,  $z$  es la profundidad,  $\theta$  es el contenido de agua en el suelo,  $\theta_{fc}$  es la capacidad de campo,  $\theta_{pwp}$  es el punto de marchitez permanente,  $\psi$  es la carga de presión,  $\psi_{ae}$  es la presión de entrada de aire; y  $\phi$  es el potencial de succión (Figura Tomaa de la portada de la XII Jornadas de investigación en la Zona No Saturada del Suelo. Alcalá de Henares, noviembre de 2015. Editores: Silvia Martínez Pérez y Antonio Sastre Merlín).

- La zona intermedia: región que se encuentra entre la zona edáfica y la franja capilar. Es menos influenciada por los procesos biológicos directos y más por la dinámica del movimiento del

agua en el suelo. El contenido de agua en la zona intermedia suele ser menor que en la zona edáfica y disminuye con la profundidad. Las presiones en esta zona son negativas, indicando succión. La magnitud de la presión negativa disminuye con la profundidad a medida que el contenido de agua aumenta (Figura 5).

- La franja capilar (FC): región situada justo encima del NF. El límite superior de la franja capilar no es un límite neto, más bien es una zona difusa donde el contenido de agua disminuye gradualmente. En esta franja, el agua es atraída hacia arriba desde la zona saturada por acción capilar, un fenómeno que ocurre debido a la tensión superficial del agua y la adhesión del agua a las partículas del suelo. El contenido de agua en la franja capilar es alto, cercano a la saturación, pero disminuye gradualmente hacia arriba. En la franja capilar, las presiones son menos negativas que en las otras dos zonas, y cerca del NF las presiones pueden estar muy cercanas a la presión atmosférica. A medida que se asciende en la franja capilar, la presión se vuelve más negativa (Figura 5). La altura de la franja capilar depende de la textura del suelo: en suelos más finos como las arcillas, la franja capilar puede ser más alta que en suelos más gruesos como las arenas. En suelos como los de la región pampeana la franja capilar alcanza espesores de 0,68 m para sedimentos limo arenosos (Lexow y Bonorino, 2003) hasta 1,50 m para limo arcillosos (Dingman, 2002). Además, el espesor de la franja capilar está relacionado con los tiempos de retardo del acuífero hasta alcanzar el nuevo equilibrio debido a los ascensos o descensos del NF.

Zona Saturada (ZS): es la capa del suelo donde todos los poros y espacios están completamente llenos de agua. Aquí se encuentran los acuíferos, y se distingue por tener un contenido de agua del 100 %. Esta zona comienza en el NF, superficie en la cual la presión del agua es igual a la presión atmosférica. Este nivel marca la parte superior de la zona saturada. La posición del NF puede variar temporalmente debido a cambios en la recarga (como la precipitación) y la descarga (como períodos extensos de sequía o la extracción artificial de agua). La presión en la zona saturada está dominada por la presión hidrostática, que aumenta con la profundidad. La presión en cualquier punto es mayor que la presión atmosférica (Figura 5).

## 2.5. Suelo y cubierta vegetal

Según las cartas de suelo en escala 1:50.000 del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Argentina los suelos del área de estudio pertenecen al subgrupo Argiudoles típicos con una textura franco arcillo limosa, bien drenados (Figura 6).

La actividad agropecuaria, en la cuenca, se desarrolla en 2 zonas bien definidas de acuerdo a las áreas de anegamiento. En cuenca alta y media donde hay más pendiente y los NF están más profundos, se realizan principalmente prácticas de agricultura con siembra de cereales (soja, trigo, maíz, cebada) y oleaginosas; mientras que en la parte baja, donde las pendientes son bajas y los NF son pocos profundos, se realizan actividades relacionadas a ganadería bovina de cría e invernada con siembra de pasturas para engorde en zonas donde los suelos permiten el laboreo, y en aquellos sitios que no es posible domina el campo natural. Un NF muy cercano a la superficie, puede tener efectos negativos en los cultivos, disminuyendo el rendimiento debido al encharcamiento y la anoxia de las raíces (Nosetto et al., 2009).

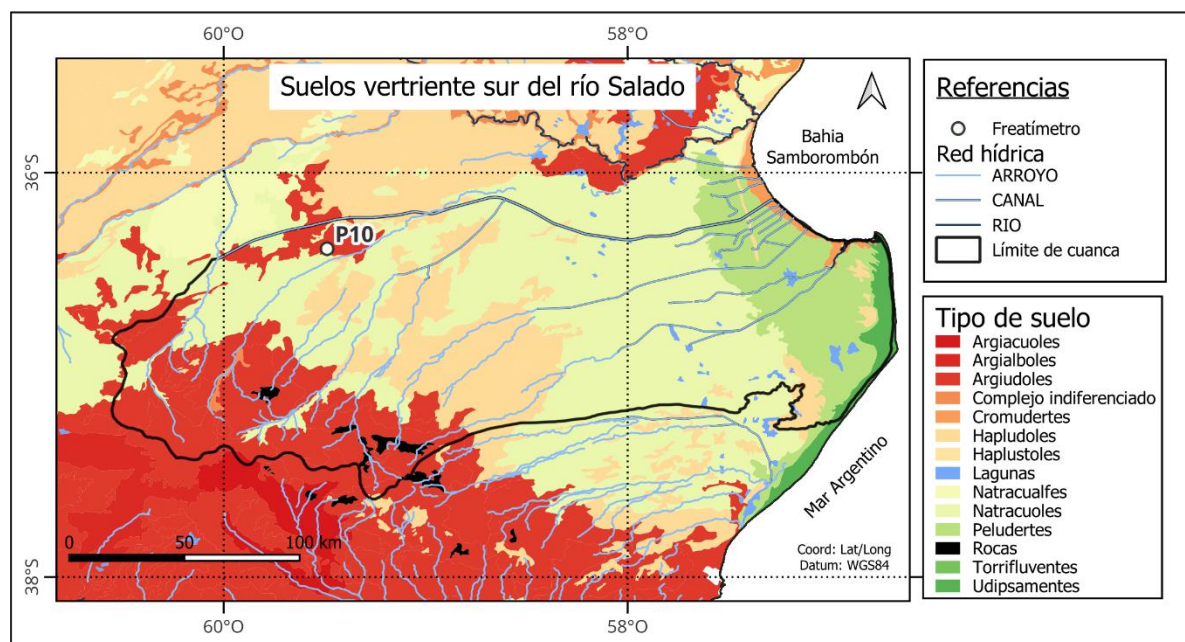


Figura 6. Tipos de suelos según INTA en la cuenca sur del río Salado y tipo de suelo en el frentómetro P10.

### 3. Funcionamiento del sistema acuífero-suelo-planta-atmósfera

La influencia del NF y la franja capilar son fenómenos cruciales en la dinámica del agua en el suelo, influyendo directamente en la disponibilidad de agua para las plantas, en la evapotranspiración y por consecuencia en la temperatura de la superficie.

Tal como se indica en la sección 2.4, el NF y la franja capilar se encuentran influenciados por la relación entre presión atmosférica y presión hidráulica. El límite superior de la franja capilar no es un límite neto; más bien, es una zona transicional difusa en la que el contenido de agua de los poros disminuye gradualmente hasta alcanzar una región donde los poros están llenos exclusivamente de aire (Dingman, 2002).

La profundidad del NF varía según factores como la topografía, la precipitación y las características del suelo. Cuando el NF está cercano a la superficie, la franja capilar puede alcanzar las raíces de las plantas, proporcionando una fuente adicional de agua, sobre todo en períodos de sequía agronómica. La franja capilar puede extenderse desde unos pocos centímetros en suelos arenosos hasta unos pocos metros en suelos arcillosos debido a la variación en el tamaño de los poros (Dingman, 2002).

La profundidad de exploración de las raíces y su capacidad de extraer agua están adaptadas a las condiciones del suelo y la disponibilidad de agua pudiendo de esta manera aprovechar el agua de la franja capilar. En situaciones donde el NF es somero, las raíces se desarrollan más superficialmente y obtienen agua directamente de la franja capilar (Figura 7a). Esto es especialmente importante en suelos con alta capacidad de retención de agua, como los suelos arcillo-limosos que se encuentran en el área de estudio. En estas situaciones cuando los procesos de evaporación y transpiración dominan y perduran en el tiempo reducen la cantidad de agua en el suelo, lo que da lugar a que el NF descienda (si no hay ingreso de agua al sistema por precipitaciones).

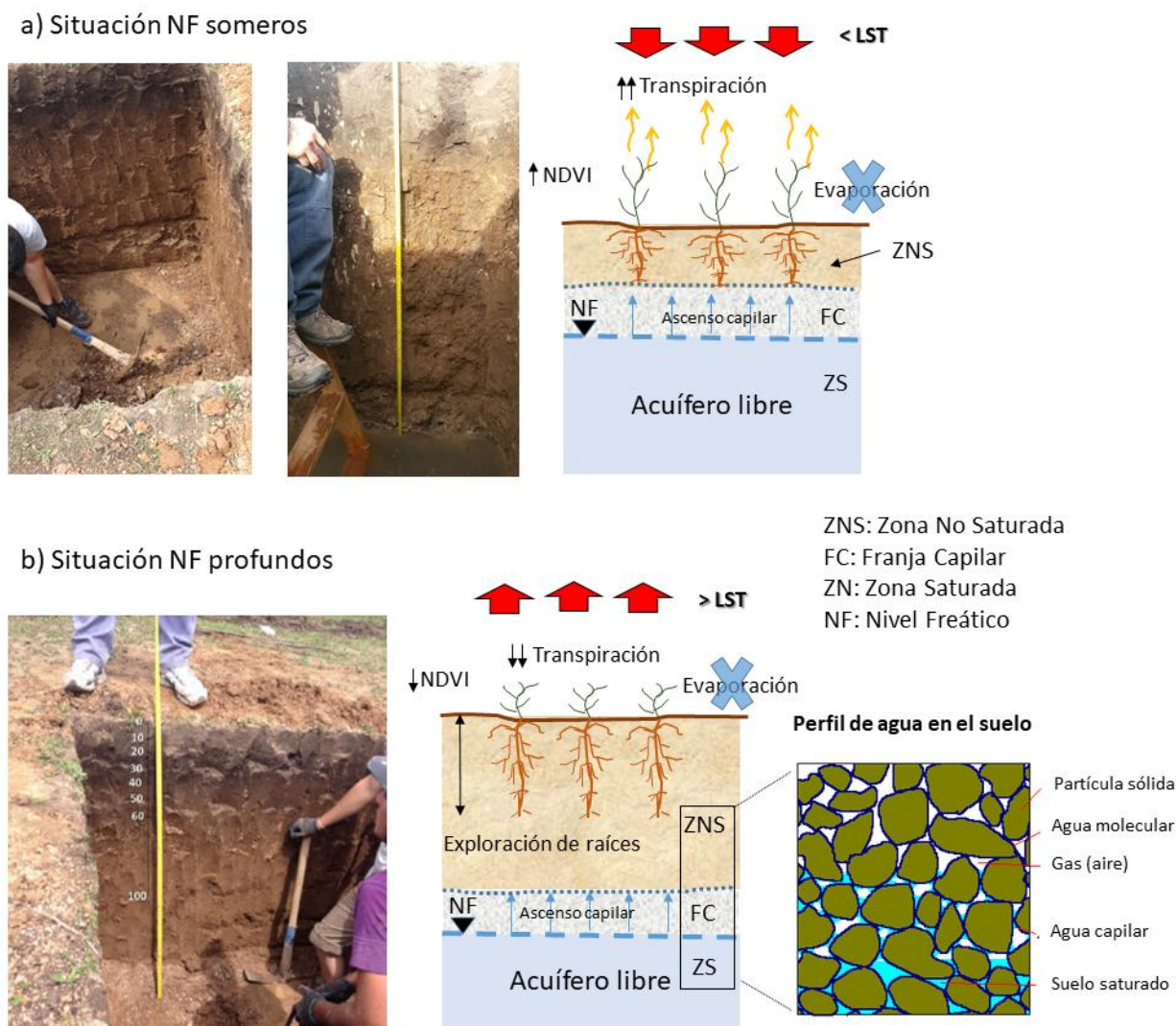


Figura 7. Modelo conceptual de funcionamiento del sistema en la zona de estudio. a) NF someros, b) NF profundos.

Ahora bien, si en nuestro modelo conceptual nos aseguramos que no haya ingresos de agua al sistema por precipitaciones, el proceso que domina es la transpiración y la evaporación tiende a cero (el perfil de suelo se encuentra seco); es aquí donde la franja capilar juega un rol importante ya que puede suministrar agua a las raíces de las plantas. Las relaciones entre el NF, la franja capilar, las raíces y la transpiración de las plantas tienen efectos significativos en la LST. En el contexto de déficit hídrico mencionado anteriormente un NF somero y una franja capilar bien desarrollada favorece la transpiración y el desarrollo foliar significativo de las plantas que se ve reflejado en valores de NDVI altos. La transpiración enfría la superficie terrestre al liberar vapor de agua, que absorbe calor durante el proceso de transpiración (NDVI tienden a valores altos) y reduce la temperatura superficial (Figura 7a). En contraste, un NF más profundo y una franja capilar reducida pueden llevar a una menor disponibilidad de agua para la transpiración, pérdida de desarrollo foliar en la planta (tendencia a disminuir el NDVI) y como consecuencia un aumento de la temperatura de la superficie (Figura 7b).

Este modelo conceptual muestra que la interacción entre el NF, la franja capilar, la LST, y la transpiración son fundamentales para comprender los procesos y cambios de la superficie terrestre. El NF y la textura del suelo influyen significativamente en la franja capilar, lo que a su vez afecta las raíces de las plantas, modulando así la energía disponible en el sistema, para los procesos de transpiración y de transferencia de calor.

#### 4. Materiales y métodos

En este capítulo se presentan las distintas metodologías que se utilizaron para llevar a cabo el objetivo del TFM. La cadena del tratamiento, análisis de los datos de campo y productos satelitales y de reanálisis se han analizado con Matlab, QGIS y Excel de acuerdo a la metodología de trabajo de la Figura 8.

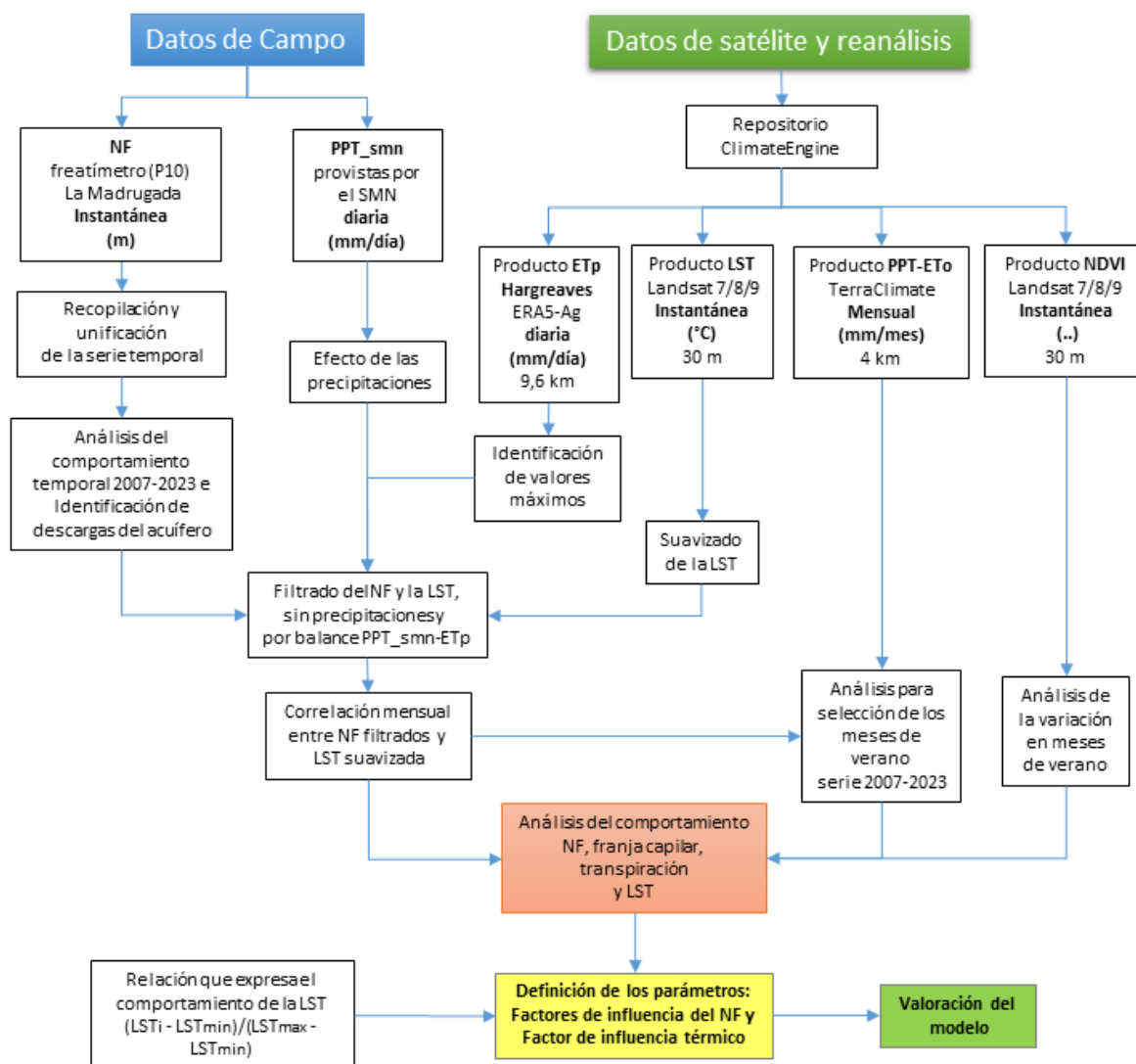


Figura 8. Diagrama de trabajo con diferentes resoluciones temporales: instantánea, diaria y escala mensual.

## 4.1. Datos de campo

### 4.1.1. Nivel freático del P10

Los datos del NF medidos provienen de un freatómetro (P10) realizado por el Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff” en la estancia La Madrugada (IHLLA, 1996). La construcción del freatómetro consiste en una perforación de 3 pulgadas de diámetro (7,6 cm) y de 5 metros de profundidad en la que se introduce un caño de PVC de 2 pulgadas de diámetro (5,1 cm) parcialmente ranurado en su base con un filtro de grava y sellado con bentonita por encima de éste (Anexo, Figura G). El diseño y la profundidad del freatómetro son claves para asegurarse que no existan flujos preferenciales alrededor del caño tras fuertes precipitaciones y para certificar que se está midiendo el NF del acuífero libre. El dato del NF fue registrado en forma discontinuada para la serie temporal 2007-2023, esto se debió a que el freatómetro fue utilizado para distintos objetivos de investigación en el IHLLA. La frecuencia de medición que se dispone es de forma instantánea desde febrero del 2007 a octubre del 2010 y desde mayo 2017 a diciembre del 2022; y medido cada 15 días desde junio 2011 a junio 2016 y desde mayo 2023 a diciembre 2023. Los equipos utilizados para la recolección de datos consistieron en un freatógrafo marca GENICA LF 324 (5 mm de error) para los registros instantáneos y una sonda de nivel (5 mm de error) para las frecuencias quincenales. Algunos faltantes en los datos instantáneos se deben a la degradación de la batería en el instrumental.

### 4.1.2. Precipitación del SMN

Los datos de precipitación se obtuvieron del SMN de Argentina. La información suministrada comprende la serie 2007-2023 con datos diarios (mm por día). La estación meteorológica más próxima se encuentra en la ciudad de Azul (denominada Azul-Aéreo) a 55 km de la ubicación del freatómetro (ver Figura 3).

Tener en cuenta el efecto de las precipitaciones es clave a la hora de analizar la influencia del NF y la franja capilar en la LST. Abundantes lluvias pueden generar que el suelo se humedezca y enmascare el efecto de la franja capilar en el proceso de transpiración. Por este motivo, una de las acciones que se realizó, fue un filtrado de 2 días sin registro de lluvias previo al paso del satélite. Las otras 2 acciones se encuentran descritas en las secciones 4.2.1 y 4.2.3.

Una vez recopilados y reordenados todos los datos del NF y precipitación, se procedió al análisis del comportamiento temporal, identificando los momentos de recarga y descarga del acuífero de acuerdo a períodos prolongados de descenso o ascenso del NF y al análisis del comportamiento de las precipitaciones.

## 4.2. Datos de satélite y reanálisis

Los productos de las imágenes de satélite fueron descargados del repositorio ClimateEngine.org. Climate Engine es una plataforma en línea que reúne datos climáticos y de teledetección que se usa en la investigación de las ciencias. Cuenta con la colaboración de investigadores y científicos multidisciplinarios del Desert Research Institute y la Universidad de California Merced, y además cuenta con la ingeniería de Google ([www.climateengine.org](http://www.climateengine.org)).

El píxel (30 m x 30 m) seleccionado para la descarga de la información se encuentra a 950 m al NE del freatómetro (Figura 9). Debido a que el freatómetro está ubicado dentro de una parcela donde se siembran pasturas estacionales, se eligió esta otra zona dominada por pastizales (pastura natural) y el uso principal ganadero. Las diferencias en el NF debido a este desplazamiento son insignificantes, ya que la pendiente del terreno es menor al 0,1 %. Por lo tanto, las medidas pueden considerarse válidas para el análisis.

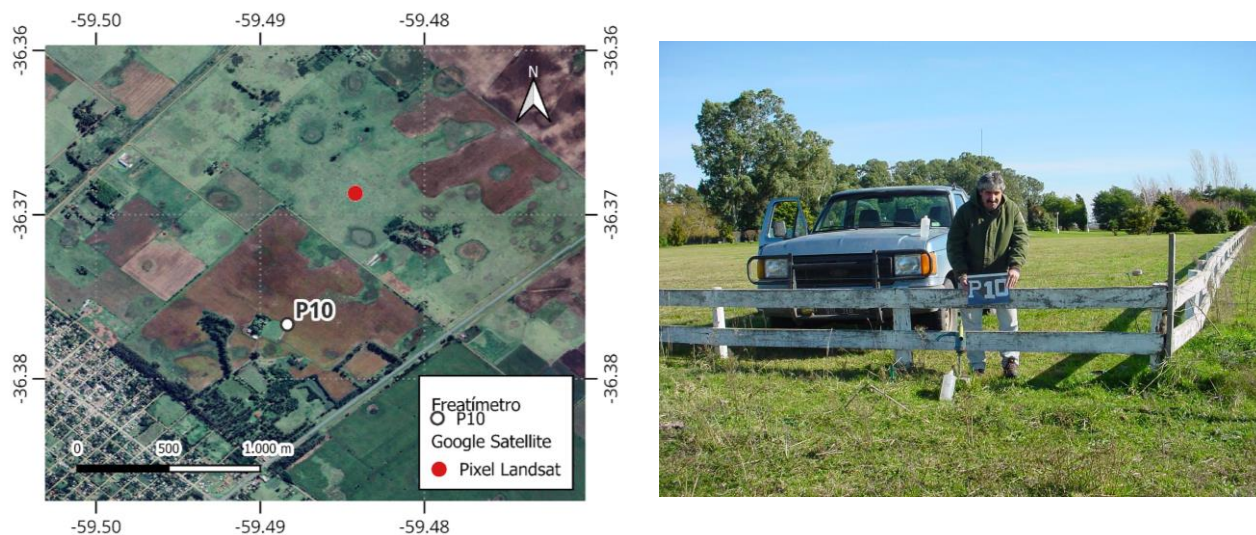


Figura 9. Ubicación del Freatímetro P10 y ubicación del píxel analizado (Izquierda), entorno del freatómetro (derecha).

#### 4.2.1. Producto ETp Hargreaves

La evapotranspiración potencial de Hargreaves utiliza una metodología que solo requiere temperatura y radiación incidente (Hargreaves y Samani, 1982). Este modelo se puede utilizar para estimar la evapotranspiración potencial para una gama amplia de datos incluidos los conjuntos globales ERA5 y ERA5-Ag. Este último, es un grupo de datos meteorológicos de superficie diario diseñado específicamente para estudios agrícolas y agroecológicos, abarcando el período desde 1979 hasta el presente. Está basado en los datos horarios del reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF), y de ERA5-Ag el cual facilita el uso directo de estos datos en aplicaciones agrícolas al procesar y agregar los datos originales. Los datos están ajustados a una topografía más detallada con una resolución espacial de aproximadamente 9,6 km y una resolución temporal diaria (mm por día). La información detallada y el acceso de los datos se encuentra en Copernicus Climate Change Service (2017).

Este producto se utilizó para identificar los valores máximos de consumo de agua en el suelo (diarios/mensuales) y para hacer un balance entre la precipitación provista por el SMN y la ETp. Estas acciones son otras de las importantes mencionadas en la sección 4.1.2., ya que se seleccionaron los días y meses del año donde los efectos de la precipitación no estén enmascarando la influencia de la franja capilar en el proceso de transpiración de la planta.

#### 4.2.2. Producto LST

La LST de ClimateEngine.org es un producto operativo de nivel 2 que se obtiene de los satélites Landsat 7, 8 y 9 a través de un proceso de varios pasos que incluyen la adquisición de datos, corrección atmosférica, estimación de emisividad y cálculo de la LST según los siguientes pasos:

- Adquisición de los datos térmicos: se obtienen de las bandas térmicas de los sensores ETM+ (Landsat 7), TIRS (Landsat 8/9). Las bandas térmicas proporcionan las mediciones de radiancia necesarias para el cálculo de LST.
- Corrección radiométrica: Luego las imágenes se corrigen para convertir las lecturas digitales en valores de radiancia.
- Corrección atmosférica: utiliza como base perfiles atmosféricos obtenidos de modelos de reanálisis National Centers for Environmental Prediction (NCEP) o el modelo Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) de NASA.
- Estimación de la emisividad de superficie: se estima utilizando las bases de datos globales de emisividad ASTER Global Emissivity Database (GED).
- Cálculo de la LST: se utiliza un algoritmo de canal único (Single-Channel Algorithm) basado en la ecuación de transferencia radiativa para convertir la radiancia térmica, inicialmente convertida en temperaturas de brillo, y posteriormente corregida de emisividad y del efecto atmosférico, con variables atmosféricas de canal obtenidas a partir de los perfiles atmosféricos, en la LST. La resolución espacial de remuestreo para los productos de LST es de 30 metros (remuestreo de las bandas térmicas de 60 y 100 m) y una resolución temporal es instantánea de acuerdo a la pasada de los satélites (cada 8 días, al combinar los distintos Landsat), que en este caso es a las 10:10 am. La LST está expresada en grados celsius (°C).

Una descripción más detallada de la metodología usada para este producto se encuentra en Malakar et al. (2018) y Li et al. (2023). Además, en Niclòs et al. (2023) se puede encontrar una validación de este producto obtenido a partir de datos Landsat 9 TIRS sobre una zona vegetada, donde se observa una exactitud para el producto del 1 °K.

Una vez analizada la serie temporal de la LST se procedió al suavizado por promedios móviles mensuales para mejorar la claridad en el análisis de los datos climáticos. Este proceso mejora la comparabilidad de los datos de temperatura de diferentes periodos y minimiza el impacto del “ruido” y las anomalías.

#### 4.2.3. Producto PPT-ETo (Déficit potencial de agua)

El déficit potencial de agua es un índice que relaciona a la precipitación (PPT) y la evapotranspiración de referencia (ETo) dado en mm por mes. Cuando el valor es negativo, indica que la precipitación es insuficiente para garantizar el proceso de la evapotranspiración, lo que puede señalar una posible sequía o estrés hídrico para la vegetación. Estas variables pueden obtenerse del conjunto de datos climáticos y de balance hídrico para superficies terrestres de TerraClimate ([www.climatologylab.org](http://www.climatologylab.org)). Este conjunto de datos combina datos de WorldClim, Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 4.0 (CRU Ts4.0) y Japanese 55-year Reanalysis (JRA55), a una resolución temporal mensual y una resolución espacial de 4 km desde 1958 hasta el presente (Abatzoglou, 2018).

Para un correcto análisis con la LST, este producto se utilizó para identificar los meses del año de la serie donde el déficit de agua sea el mayor. En zonas húmedas y subhúmedas como en el área analizada, los veranos son la época del año donde hay mayor consumo de agua (los procesos de evapotranspiración dominan respecto a la precipitación, más es el momento en que se registran los déficits hídricos). Siguiendo esta línea, los análisis se realizaron en esos momentos, cuando el suelo se está secando y no existe agua almacenada en el perfil del suelo explorado por las raíces, eliminando de esta manera los efectos de “ruido” que generan las precipitaciones en la zona no saturada. Esta es la última acción “importante” que se menciona en la sección 4.1.2. Por lo tanto, el efecto de aporte de agua al sistema que se analizó es el que llega desde abajo por influencia del NF y la franja capilar.

#### 4.2.4. Producto NDVI

Un índice común de imágenes satelitales de la vigorosidad de la vegetación es el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Huete et al., 1985; Jackson y Huete, 1991), que varía de -1 a 1, donde valores ~ 0,5 a 1 representa un alto vigor de la vegetación. Este índice se obtiene a partir de las imágenes satelitales Landsat 7/8/9, a partir de la diferencia entre la reflectividad en el rojo y en el infrarrojo cercano; presenta una resolución espacial de 30 m y una resolución temporal de acuerdo a la pasada del satélite.

Los datos de NDVI se utilizaron para observar el comportamiento de la vegetación en la serie temporal analizada.

#### 4.3. Función de temperaturas

Para comparar el comportamiento de las LST según el modelo conceptual explicado en el capítulo 3 (Figura 7), en el cual mencionamos que cuando la transpiración es máxima, la LST tiende a ser mínima, y cuando la transpiración es mínima, la LST tiende a ser máxima, se propone utilizar un índice entre 0 y 1 mediante la siguiente relación:

$$(LST_i - LST_{\min}) / (LST_{\max} - LST_{\min})$$

donde  $LST_{\max}$  y  $LST_{\min}$  son las temperaturas de superficie terrestre suavizadas máxima y mínima del período analizado, y  $LST_i$  es la temperatura de superficie terrestre instantánea (momento del paso del satélite).

Esta relación se utilizó para evaluar la influencia del efecto del NF en el proceso de transpiración de la planta.

## 5. Resultados

En la vertiente sur del río Salado, donde los procesos de evapotranspiración dominan ampliamente a los procesos de infiltración y escurrimiento, los NF varían de acuerdo a los momentos de recarga y descarga del acuífero. Los momentos de descarga son particularmente importantes para este estudio y son específicos para cada ciclo hidrogeológico en cuestión, los cuales están relacionados con las

precipitaciones antecedentes y la HS en la zona no saturada. En este contexto y siguiendo el orden de la metodología, procederemos a mostrar los resultados.

La Tabla 2 muestra los estadísticos básicos de la serie 2007-2023 analizada de las variables de interés.

Tabla 2. Estadísticos de las variables analizadas para toda la serie 2007-2023: temperatura de superficie terrestre (LST), nivel freático (NF), precipitación del Servicio Meteorológico Nacional (PPT) y evapotranspiración potencial (ETp).

Estadísticos	LST Suavizada [°C]	NF [m]	PPT_smn [mm/día]	ETp [mm/día]
Máximo	44,4	5,36	173,5	7,8
Mínimo	7,0	0,58	0	0,5
Promedio	24,1	2,90	2,5	3,2

La Figura 10 muestra las fluctuaciones del NF y las precipitaciones anuales para la serie temporal analizada. En este gráfico se pueden distinguir 8 ciclos hidrológicos si contamos desde los picos cuando los NF son más someros. Cada ciclo hidrológico está contenido por períodos de descarga (descensos prolongados del NF) y períodos de recarga (ascenso del NF). No ocurre siempre que estos ciclos sean estacionales, por ejemplo, en el 2007 se registró un ciclo de sequía hidrológica que duró de octubre 2007 hasta diciembre 2012. La identificación de los períodos de descarga es fundamental en el análisis de este estudio porque son los momentos en los cuales el aporte de agua proveniente de las precipitaciones, que llega al acuífero, es mínimo.

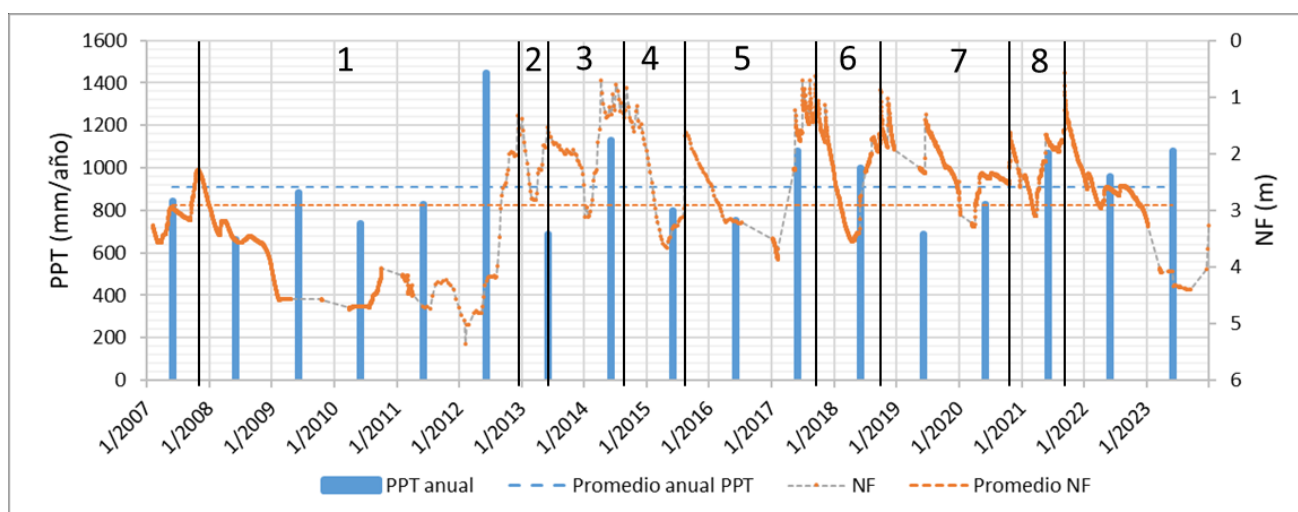


Figura 10. Fluctuaciones del nivel freático (NF) instantáneo, las precipitaciones (PPT) anuales y ciclos hidrogeológicos para la serie 2007-2023.

Por ejemplo, la Figura 11 muestra, mediante el análisis de imágenes satelitales del sensor MODIS, 2 estados distintos del acuífero, en enero del 2010 estaba antecedido por 3 o más años con precipitaciones por debajo del promedio (línea discontinua azul) lo cual generó un descenso en los NF hasta 4,7 m (ver Figura 10) y por consiguiente un déficit hidrológico; en cambio septiembre del 2014 estaba antecedido por un 18 meses donde los NF estaban por arriba de la media (línea discontinua naranja), sumado a un 2014 con precipitaciones abundantes, que generó un ascenso del

NF cercano a la superficie hasta 0,7 m (ver Figura 10) y por consecuencia un anegamiento de la cuenca baja. El anegamiento por exceso hídrico se evidencia en las zonas de color negro de acuerdo a la combinación de bandas RGB143.

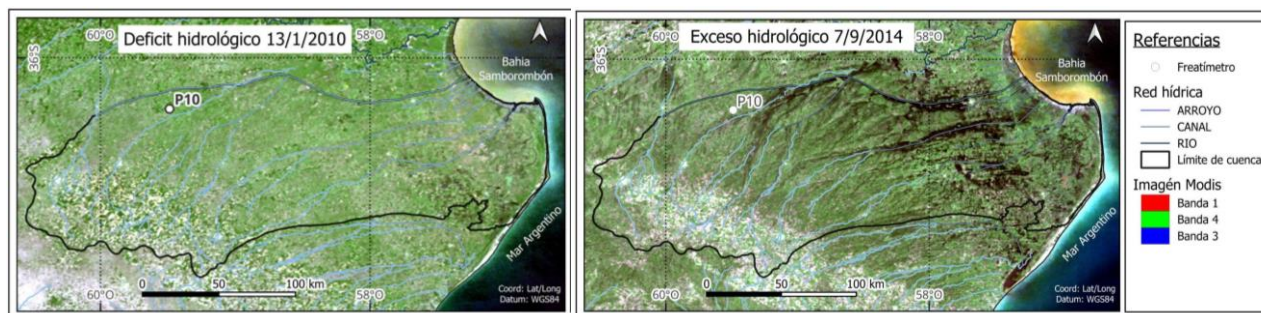


Figura 11. Influencia del nivel freático en dos situaciones hidrológicas distintas, sequía en enero del 2010 con NF profundos (Izquierda) e inundación en septiembre del 2014 con NF someros (Derecha). Satélite EOS-Aqua/Terra sensor MODIS, composición color verdadero (RGB143)

La Figura 12 muestra el proceso de suavizado de la LST descrito en el punto 4.2.2. Al eliminar los efectos de anomalías que provienen de errores de medición o eventos extremos, se suavizan las variables aleatorias y se pueden comparar de manera más eficiente las temperaturas de un mes específico a lo largo de todo el período.

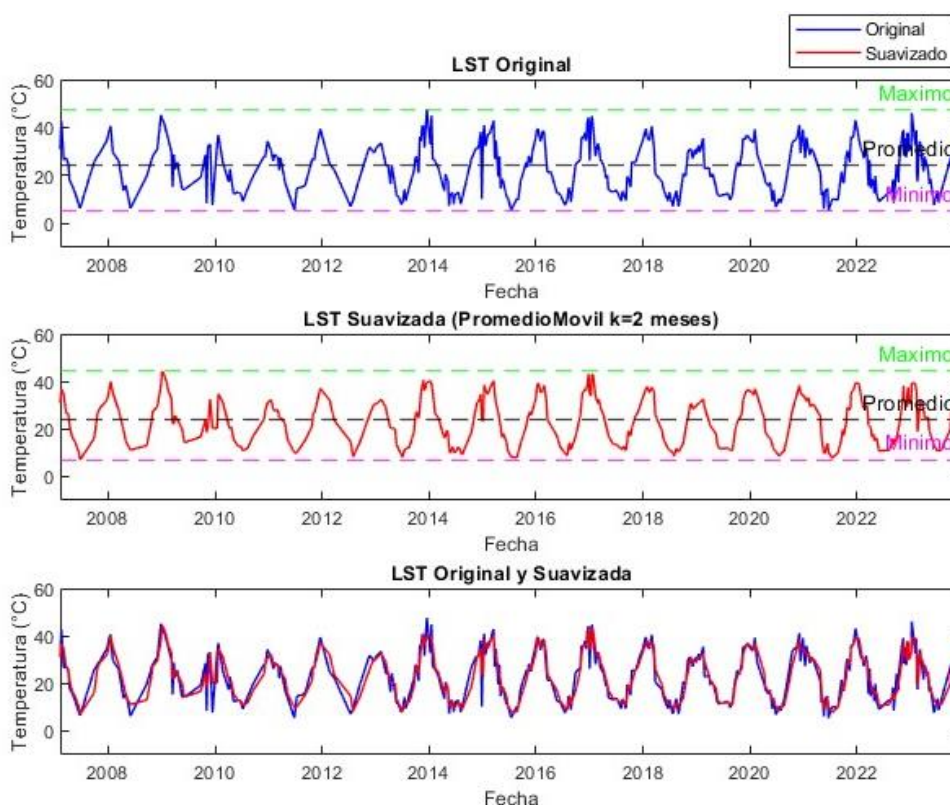


Figura 12. Suavizado de la LST para el período 2007-2023.

Una vez quitado las anomalías en la LST se integró la información con los datos del NF y precipitación para observar cómo responde la LST ante los cambios en el sistema hidrogeológico. Para mejorar la

visualización de los momentos de descarga del acuífero (descensos del NF), se dividieron los datos en intervalos de 3 años. Esto nos permite distinguir con mayor claridad los períodos de descarga, que corresponden a los momentos en que no hay aporte de precipitaciones al acuífero. En el Anexo, Figura I se muestra la serie completa de datos. Por ejemplo, en el rango 2013-2015 se observan 2 períodos de descarga del acuífero, si empezamos contando desde el comienzo de la descarga vemos que el primer período va desde junio 2013 a enero 2014 y el segundo desde septiembre 2014 hasta mayo del 2015 (Figura 13). Siguiendo el análisis de la Figura 13, pero ahora analizando el comportamiento del NF y la LST vemos que cuando el NF desciende, asciende la LST.

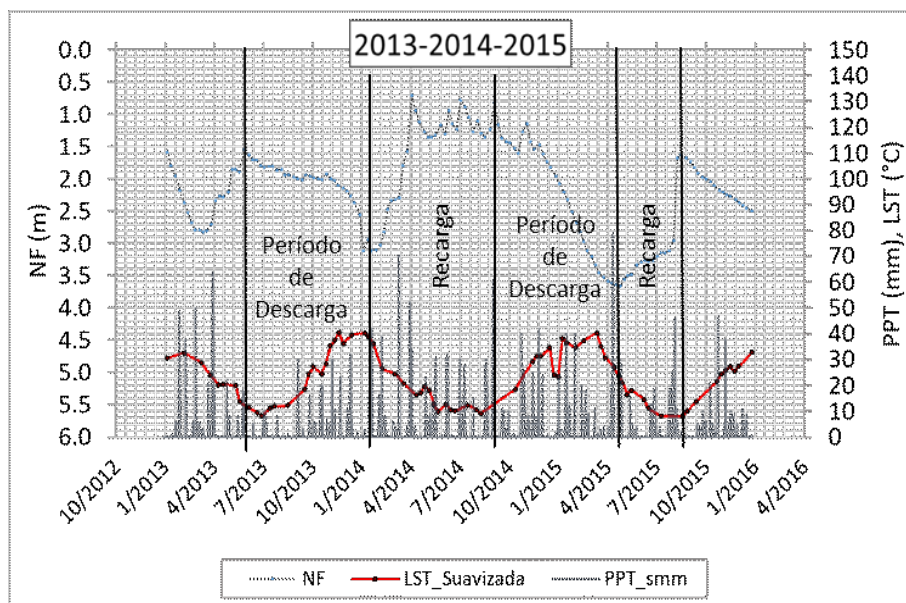
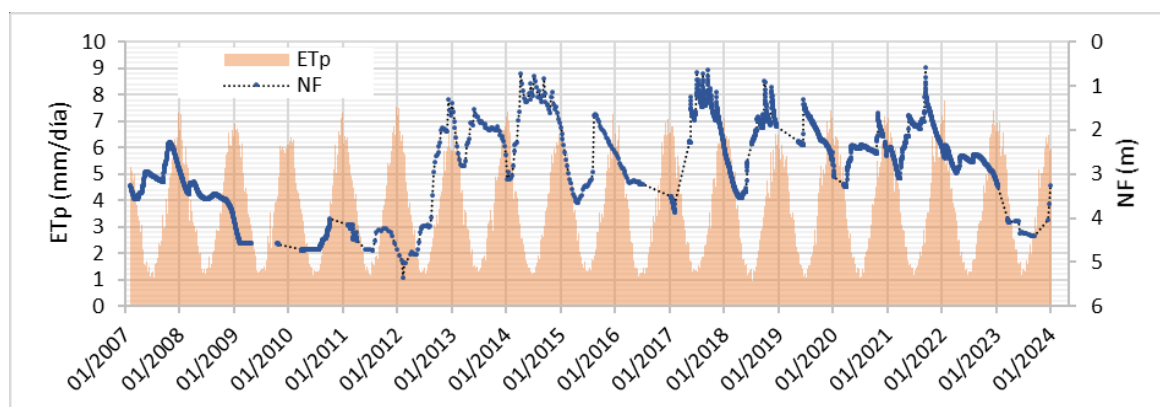


Figura 13. Correspondencia entre el nivel freático (NF) diario, precipitaciones diarias (PPT) y la LST suavizada. Ciclo Hidrológico con períodos de recarga y descarga del acuífero

La Figura 14 muestra los valores de ETp diarios obtenidos del reanálisis de ERA5-Ag en relación al NF instantáneo y las precipitaciones diarias. Los picos de la ETp (en mm/día) corresponden a los máximos de consumo de agua dados en enero. Este mes fue el elegido para hacer el análisis, el cual coincide con los momentos del año usados por los autores Myers y Moore (1972), Heilman y Moore (1982), Hamzeh et al. (2018) y Subzar Malik et al, (2021). El déficit hídrico diario calculado entre la PPT y la ETp para los días filtrados sin precipitación se encuentra entre -4,1 y -6,8 mm/día para los meses de enero. Los estadísticos diarios de los meses de enero se muestran en el Anexo, Figura A.



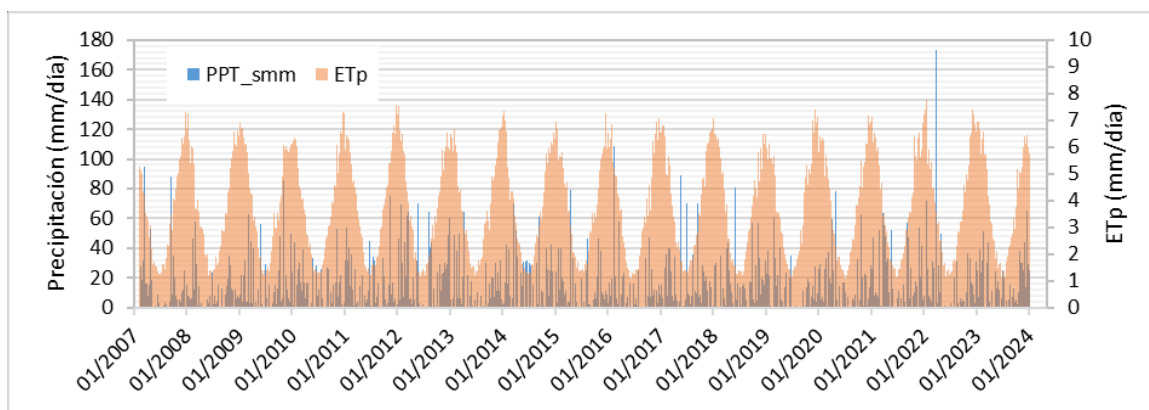


Figura 14. Comportamiento de producto ETp Hargreaves diaria en relación con los datos tomados in situ (P10) del nivel freático (NF) instantáneo (arriba) y la precipitación (PPT) registrada por el SMN - ETp diaria (abajo).

La Figura 15 representa el comportamiento mensual de la LST-NF para el período 2007-2023. Las correlaciones son ascendentes en la mayoría de los meses a excepción de los meses 2 y 3, donde las correlaciones son descendentes. Enero resultó tener la mejor correlación con un  $R^2$  de 0,74 lo que está garantizando que no hay influencia de entrada de agua al sistema desde superficie y que esta influencia sobre la LST es explicada por el nivel freático. La mejor correlación también se da cuando las variaciones del NF y la LST son amplias.

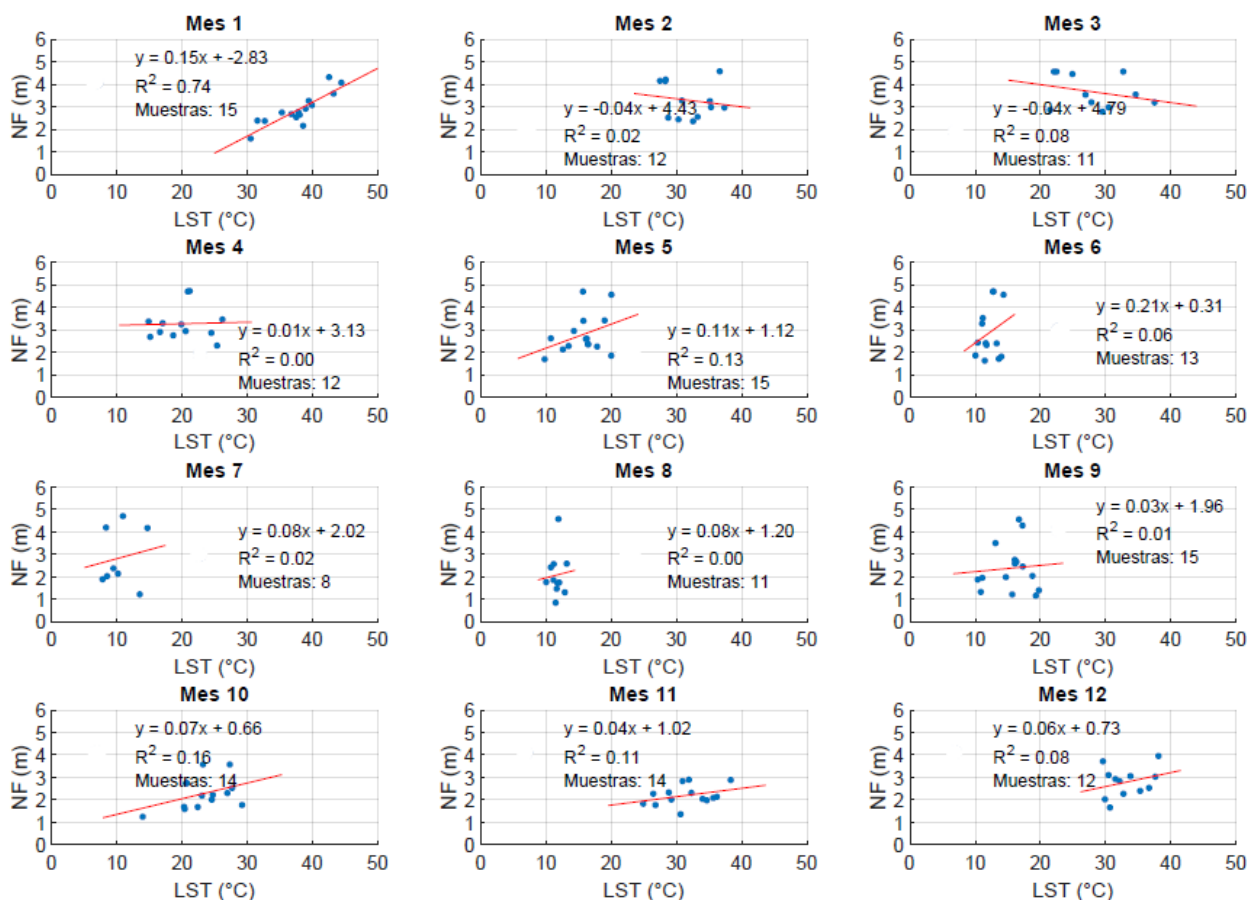


Figura 15. Regresiones lineales intermensuales de la LST (los datos tienen el filtrado del efecto de precipitación).

La Figura 16 presenta los valores del déficit de agua potencial mensual (PPT-ET<sub>o</sub>) de Terraclimate junto con el NF medido in situ. Este índice permitió identificar los meses de enero con mayor déficit de agua, excluyéndose del análisis.

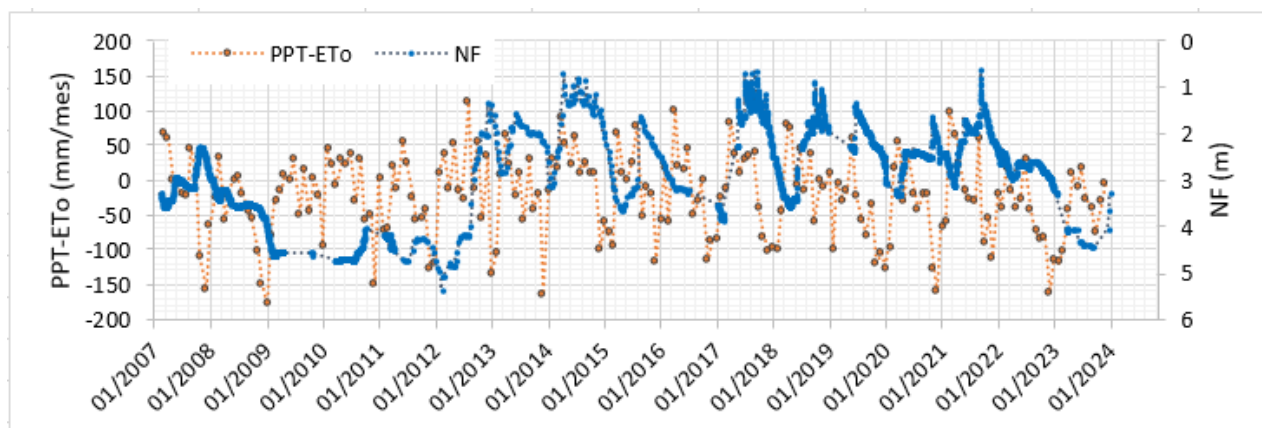


Figura 16. Relación entre el déficit de agua potencial (PPT-ET<sub>o</sub>) mensual y el nivel freático (NF) instantáneo para la serie temporal 2007-2023.

La Tabla 3 muestra el resultado de la diferencia entre PPT y ET<sub>o</sub> mensual de enero para el período de análisis. Los años 2011 y 2019 con exceso de agua fueron excluidos del análisis ya que existiría influencia en la temperatura por la humedad del suelo en la ZNS.

Tabla 3. Disponibilidad de agua (PPT-ET<sub>o</sub>) para los meses de enero.

Año	Mes	PPT-ET <sub>o</sub> [mm]	Año	Mes	PPT-ET <sub>o</sub> [mm]
2008	Ene	-64,4	2016	Ene	-56,6
2009	Ene	-177,3	2017	Ene	-83,4
2010	Ene	-92,4	2018	Ene	-94,4
<b>2011</b>	<b>Ene</b>	<b>2,7</b>	<b>2019</b>	<b>Ene</b>	<b>11,7</b>
2012	Ene	-119,0	2020	Ene	-124,6
2013	Ene	-136,0	2021	Ene	-64,8
2014	Ene	-13,6	2022	Ene	-17,0
2015	Ene	-60,1	2023	Ene	-113,9

La Figura 17 muestra el estado de la vegetación para los meses de enero considerados de acuerdo al comportamiento de la LST. El rango de valores de NDVI está entre un mínimo de 0,27 y un máximo de 0,74; mientras que los valores de la LST presentan un máximo de 44,41 °C y un mínimo de 30,49 °C. Los estadísticos se muestran en el Anexo, Tabla A.

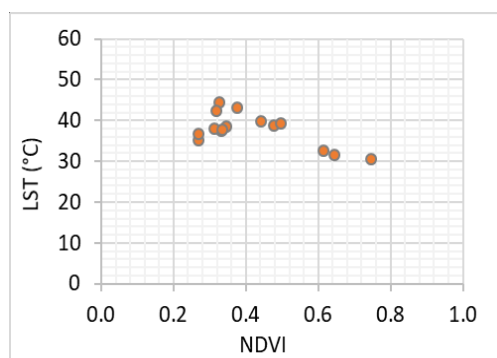


Figura 17. Variaciones del índice de vegetación normalizada (NDVI) respecto a la LST en los meses de enero seleccionados.

En este momento de la redacción cabe volver a mencionar que la acción del filtrado por precipitación y la selección de los meses de enero con mayor déficit hídrico son condiciones excluyentes para asegurarse que la zona superficial del suelo está seca. De esta manera se minimiza el proceso de evaporación del suelo y nos centramos en el proceso de transpiración de la planta debido a la influencia del acuífero. Encontrar estas situaciones excepcionales no es del todo sencilla, pero es fundamental para que el modelo conceptual del sistema sea válido.

Una vez identificados los momentos de descarga del acuífero, quitado los efectos de “ruido” en la LST, filtrado de los días previos sin precipitación y seleccionado los años con déficit de agua potencial, se elaboró una dispersión entre la  $(LST_i - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min})$  y el NF con la finalidad de ajustar una función que explique el funcionamiento del sistema acuífero - atmósfera. La Figura 18 muestra la dispersión obtenida y la función exponencial ajustada definida (en el Anexo, Figura A se encuentran los valores de  $LST_{max}$  y  $LST_{min}$  utilizados). La ecuación de la curva indica que cuando la relación  $(LST_i - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min})$  tiende a cero, el NF es mínimo siendo máxima la influencia del acuífero en el proceso de transpiración y en esta situación la  $LST_i$  tiende a acercarse al valor de  $LST_{min}$ .

La decisión de ajustar una función exponencial se basa en que los descensos del nivel freático suelen seguir este tipo de función, debido a la naturaleza del flujo de agua en los acuíferos y las propiedades hidráulicas del medio poroso por el cual se desplaza el agua. A medida que desciende el NF en los acuíferos, la diferencia de presión hidráulica disminuye con el tiempo y la distancia al punto de descarga, lo que da lugar a un comportamiento de flujo que puede describirse con funciones exponenciales.

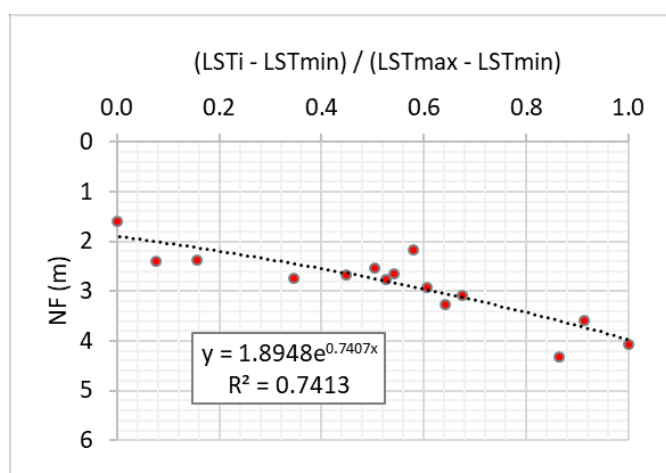


Figura 18. Dispersión de datos lograda para el conjunto de meses de enero considerados, función exponencial ajustada y coeficiente de determinación.

La Figura 19 muestra la interpretación de esta correlación. Cuando la relación  $(LST_i - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min})$  tiende a cero, la curva interseca eje Y resultando ser la posición del NF más somera que puede alcanzar el acuífero para garantiza la provisión al agua al proceso de transpiración; de esta manera las raíces pueden obtener agua directamente de la franja capilar lo que da lugar a un máximo desarrollo foliar (valores de NDVI que tienden a máximos). Al liberar vapor de agua, el proceso de transpiración absorbe calor del sistema y enfría el entorno de la superficie terrestre reduciendo la  $LST_i$ . De esta manera, el factor de influencia del NF sobre la planta será el máximo (Figura 19). Por el

contrario, si la relación de temperaturas tiende a 1 los efectos del factor de influencia del NF sobre las raíces de la planta son nulos, por lo tanto, la planta transpira menos lo cual se ve reflejado en una mayor LST. Esta interpretación responde al modelo conceptual explicado en el capítulo 3 (Figura 7).

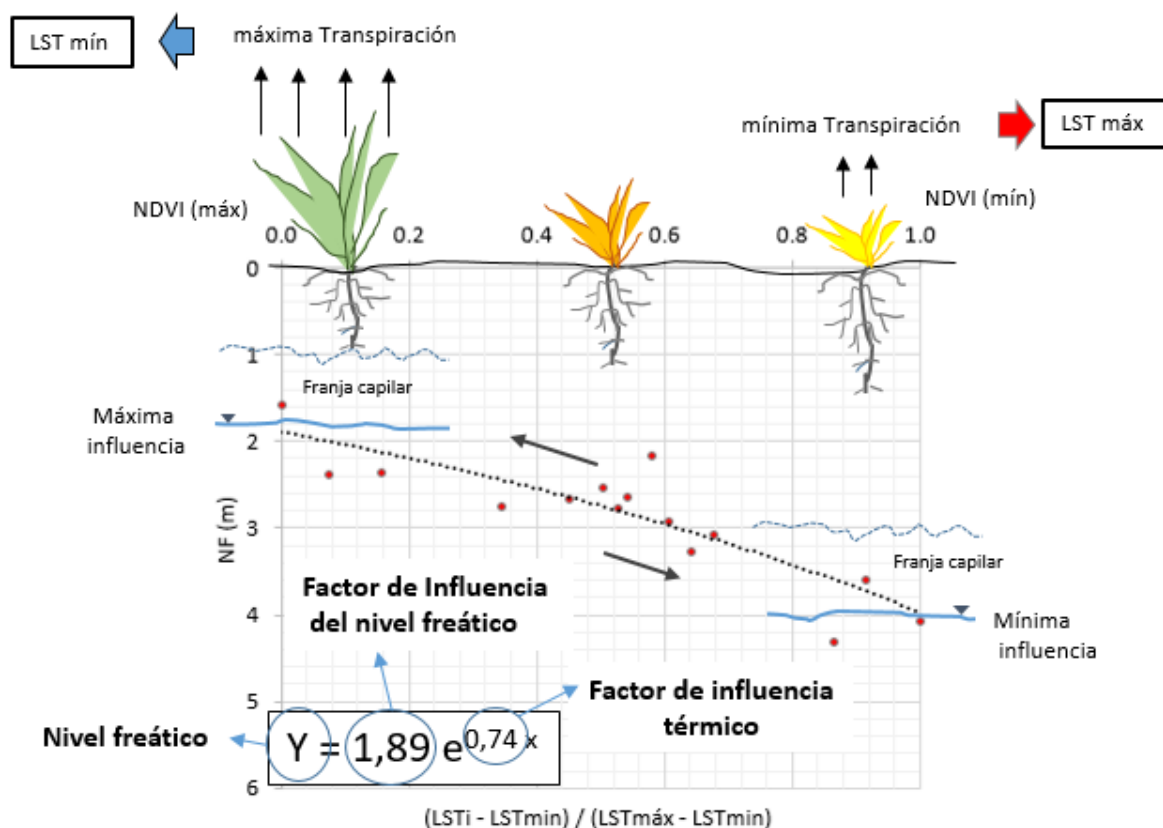


Figura 19. Comportamiento del factor de influencia del nivel freático sobre la transpiración, el NDVI y la LST.

## 6. Valoración del modelo

Para la valoración del método se usaron los freáticos de la red de monitoreo que construyó el IHLLA en la cuenca del arroyo del Azul (IHLLA, 1996). Es importante indicar que estos freáticos se miden estacionalmente (otoño, invierno, primavera y verano), no siempre se mide el NF en el mes de enero, sino que la medida de verano puede ser cualquier mes. En nuestro análisis se seleccionaron 7 freáticos de la cuenca media-baja (Figura 4) con mediciones del NF in situ correspondientes a enero del 2018. Se hicieron las comparaciones entre el NF medido y el modelado aplicando la función exponencial desarrollada. La litología de las perforaciones donde se construyeron los freáticos es variada y se encuentra descrita en las Figuras A hasta H del Anexo. Sin embargo, es válida la comparación dado que se conoce que la oscilación del NF del acuífero en los pozos tiene un comportamiento espacial similar.

Para obtener el NF modelado se usó la función exponencial utilizando los parámetros establecidos en el ajuste de la Figura 18:

$$NF = 1,89 \cdot e^{0,74 \cdot (LSTi - 30,49) / (44,41 - 30,49)}$$

Los datos utilizados y los estadísticos se incluyen en la Tabla 4. Las diferencias más significativas se observan en el P20 y el P06 posiblemente debido a una variación específica en la litología del perfil del suelo respecto al perfil litológico donde se desarrolló el modelo o alguna interferencia local por la ubicación del pozo (cuneta de la calle que hace que exista una mayor recarga o árboles cercanos que generen un descenso mayor) y en el resto de los freáticos las diferencias son poco significativas.

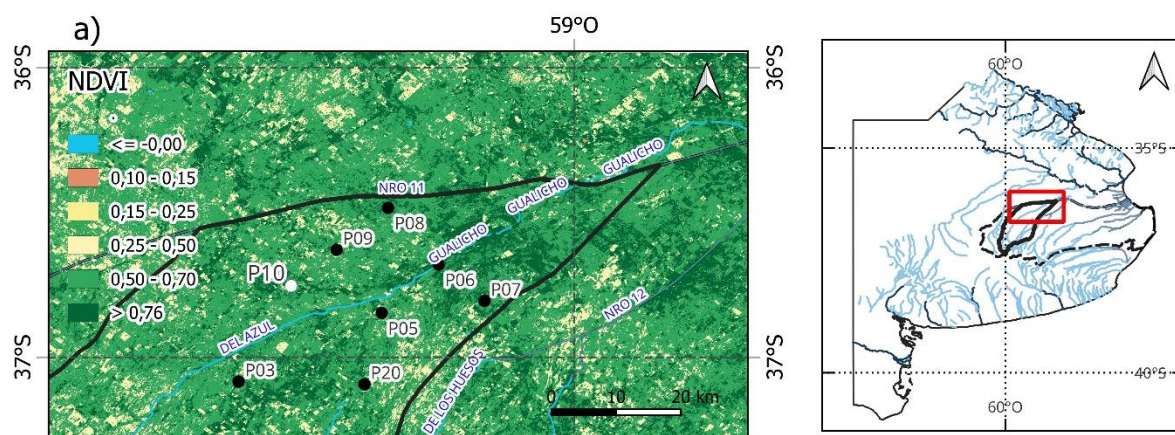
Tabla 4. Valores medidos y estimados, diferencia y Estadísticos (BIAS, DS y RMSD) para la valoración del modelo propuesto. Desviación estándar (SD) de las diferencias, root-mean-square difference (RMSD; la suma cuadrática de bias y SD)

Freatímetro	NF medido (m)	NF modelo (m)	NF medido - NF modelo (m)
P03	1.87	2.18	-0.31
P05	2.24	2.37	-0.13
P06	2.47	1.92	0.55
P07	1.61	2.07	-0.46
P08	2.36	2.16	0.20
P09	2.16	2.53	-0.37
P20	2.03	2.67	-0.64

BIAS (m)	DS (m)	RMSD (m)
-0.17	0.41	0.44

La Figura 20a se presenta el mapa del comportamiento del NDVI con valores mayoritarios entre 0,50 y 0,70 que denotan un aporte diferencial en el espacio del acuífero en el proceso de transpiración. En la Figura 20b se presenta el mapa del sector de la cuenca baja del arroyo del Azul con los resultados de la modelación de la influencia del NF y las diferencias obtenidas en cada freático usado. Se observa una distribución homogénea de los valores del NF en el centro sur y oeste que se va profundizando hacia al NO.



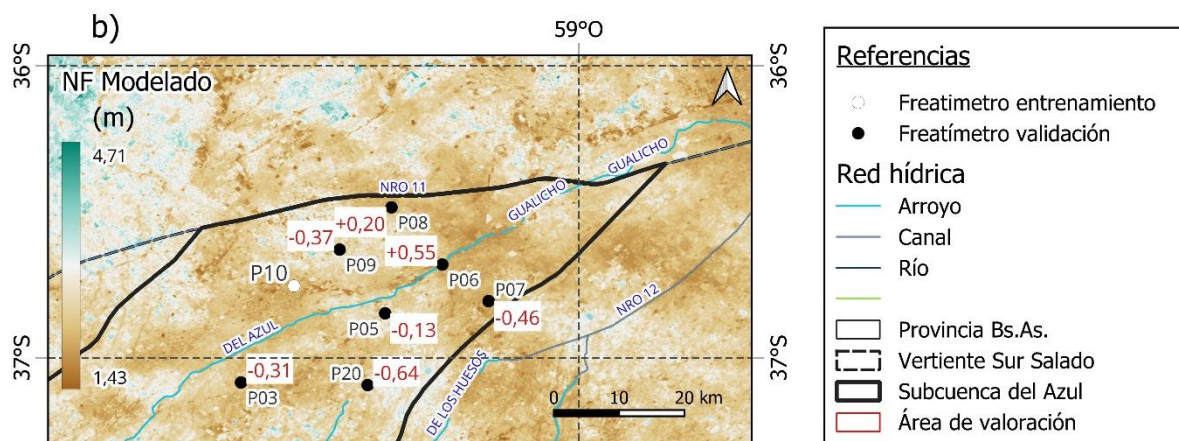


Figura 20. a) Mapa del NDV, b) Mapa de la influencia del NF modelado sobre el área de valoración del método (diferencias entre valores medidos y modelados en rectángulo blanco). Todos los mapas corresponden a la fecha 28/01/2018.

## 7. Conclusiones

En este TFM se ha llevado a cabo un análisis detallado de un acuífero somero y su relación con el sistema-suelo-planta-atmósfera proponiendo un modelo capaz de determinar el efecto del NF sobre el proceso de transpiración de las plantas. Para el análisis se utilizaron datos del acuífero pampeano ubicado en la cuenca baja de la vertiente sur del río Salado, y datos de satélite y reanálisis.

Los principales hallazgos indican que el uso de la LST estimada desde satélite ha permitido identificar como la influencia del NF y la franja capilar actúa sobre la transpiración de la planta y sus efectos se ven reflejados en el comportamiento de la LST. Para lograr comprobar la conexión acuífero atmósfera, que responde a una función exponencial, es importante que el contenido de humedad del suelo en la ZNS tienda a un mínimo, lo cual garantiza que la LST resulte un estimador de las condiciones del subsuelo. Por lo tanto, para caracterizar el acuífero es necesario estimar los parámetros de la función exponencial (factor de influencia del NF y factor térmico) y que se cumplan las siguientes condiciones:

1. No debe haber entrada de agua al sistema por precipitaciones lo que asegura que el acuífero se encuentra en una condición de descarga.
2. El balance de agua diario debe ser deficitario garantizando la no disponibilidad de agua en la zona no saturada que pueda ser usada en el proceso de transpiración por las plantas (la evaporación desde el suelo debe ser nula).
3. El balance de agua mensual debe de ser significativamente deficitario (cuanto mayor es el déficit mayor es la seguridad de la no disponibilidad de agua en el perfil del suelo)

Es preciso que se cumplan las restricciones 1 a 3 para asegurar que la información que se derive sea propia del acuífero. Estando en estas condiciones se puede determinar el nivel máximo y mínimo de afectación del NF a partir de datos de LST medidos desde satélite.

El análisis muestra que para un período de 16 años de los meses enero sobre el acuífero somero el valor del factor de influencia del NF es de 1,89 m y el factor térmico es de 0,74. Calculados los

parámetros de la función se evaluó la respuesta con medidas de NF realizadas en 7 frentímetros de enero del 2018. Los resultados de la comparación arrojaron un BIAS de -0,17 m y un RMSD de 0,44 m indicando una buena aptitud del método como estimador indirecto de las condiciones hidrogeológicas del acuífero.

Este TFM es un avance respecto al de otros autores que en condiciones hidroambientales diferentes han utilizado la LST como indicadora, porque se excluyó el proceso de evaporación en el análisis del sistema introduciendo un enfoque metodológico distintivo al usar una función exponencial que representa mejor los descensos del NF en el comportamiento hidrogeológico del acuífero y su influencia con la planta y la LST.

Las implicaciones prácticas de este estudio son significativas para la gestión de recursos hídricos en regiones donde las prácticas agropecuarias son importantes y donde exista falta de mediciones en terreno. Los métodos desarrollados pueden ser utilizados en otros acuíferos si se cumplen las restricciones establecidas. En un contexto de alta variabilidad climática (donde los eventos extremos son más frecuentes) esta metodología puede ser relevante para el monitoreo de acuíferos.

Por último, podemos afirmar que disponiendo de una serie prolongada de medidas del NF y datos de satélite e información derivada de la combinación de datos de satélite y de terreno (reanálisis) se puede aplicar en otros lugares el método propuesto.

## 8. Bibliografía

- Abatzoglou, J.T., S.Z. Dobrowski, S.A. Parks, K.C. Hegewisch, (2018). Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015, *Scientific Data* 5:170191, doi: 10.1038/sdata.2017.191.
- Alkhaier, F., Flerchinger, G. N., and Su, Z.: Shallow (2012a) groundwater effect on land surface temperature and surface energy balance under bare soil conditions: modeling and description, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1817–1831, doi:10.5194/hess-16-1817-2012.
- Alkhaier, F., Su, Z., and Flerchinger, G. N. (2012b). Reconnoitering the effect of shallow groundwater on land surface temperature and surface energy balance using MODIS and SEBS, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1833–1844, doi:10.5194/hess-16-1833-2012.
- Chase, M. E. (1969). Airborne remote sensing for groundwater studies in prairie environment, *Can. J. Earth Sci.*, 6, 737–741.
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017). ERA5 Ag: Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), (date of access), <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-agrometeorological-indicators?tab=overview>
- Dingman, S. L (2002). *Physical Hydrology*, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Fidalgo, F., R. Pascual y F. De Francesco. (1975). Geología superficial de la llanura bonaerense (Argentina). *Actas del VI Congreso Geológico Argentino*, pp. 103-138.

- Hamzeh, S., Mehrabi, M., Alavipanah, S. K. and Moghadam, M. K. (2018). Investigating the Relationship Between Shallow Groundwater, Soil Moisture and Land Surface Temperature Using Remotely Sensed Data. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, Spain, 2018, pp. 7789-7792, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8518165.
- Hargreaves, GH y Samani, ZA (1982). Estimación de la evapotranspiración potencial. *Revista de la División de Riego y Drenaje*, 108 (3), 225-230.
- Heilman, J. L. and Moore, D. G. (1982). Evaluating depth to shallow groundwater using heat capacity mapping mission (HCMM) data, *Photogramm. Eng. Rem. S.*, 48, 1903–1906.
- Huete, A. R., Jackson, R. D., and Post, D. F. (1985), Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds, *Remote Sens. Environ.* 17:37-53.
- IHLLA, 1996. Red de monitoreo de las aguas subterráneas en la cuenca del arroyo del Azul. Informe Final. Biblioteca del IHLLA (Inédito).
- Jackson, R. D., and Huete, A. R. (1991), Interpreting vegetation indices, *J. Preventative Vet. Med.* 11:185-200.
- Kappelmeyer, O. (1957): The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depths, *Geophys. Prospect.*, 5, 239–258.
- Lexow C. y Bonorino A.G, (2003). Definición de la franja capilar en un acuífero freático loésico somero. III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea. (1): 179-187.
- Li, Z. L., Wu, H., Duan, S. B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., and Zhou, C. (2023). Satellite remote sensing of global land surface temperature: Definition, methods, products, and applications. *Reviews of Geophysics*, 61(1), e2022RG000777.
- Malakar N. K., Hulley G. C., Hook S. J., Laraby K., Cook M., and Schott J. R., (2018). "An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 10, pp. 5717-5735. doi: 10.1109/TGRS.2018.2824828.
- Myers, V. I. and Moore, D. G. (1972). Remote sensing for defining aquifers in glacial drift, *Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1, University of Michigan, 715–728.
- Niclòs R., Perelló M., Puchades J., Coll C., Valor E. (2023). Evaluating Landsat-9 TIRS-2 calibrations and land surface temperature retrievals against ground measurements using multi-instrument spatial and temporal sampling along transects, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 125, 103576, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103576>.
- Nosetto M.D., Jobbágy E.G., Jackson R.B., Sznajder G.A. (2009). Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas, *Field Crops Research*, Volume

113, Issue 2, 2009, Pages 138-148, ISSN 0378-4290, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.016>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429009001075>)

Nosetto, M. D., E. G. Jobbágy, A. B. Brizuela & R. B. Jackson. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agr Ecosyst Environ.* 154, 2-11.

Pablos, M., Martínez-Fernández, J., Piles, M., Sánchez, N., Vall-llossera, M., & Camps, A. (2016). Multi-temporal evaluation of soil moisture and land surface temperature dynamics using in situ and satellite observations. *Remote Sensing*, 8(7), 587.

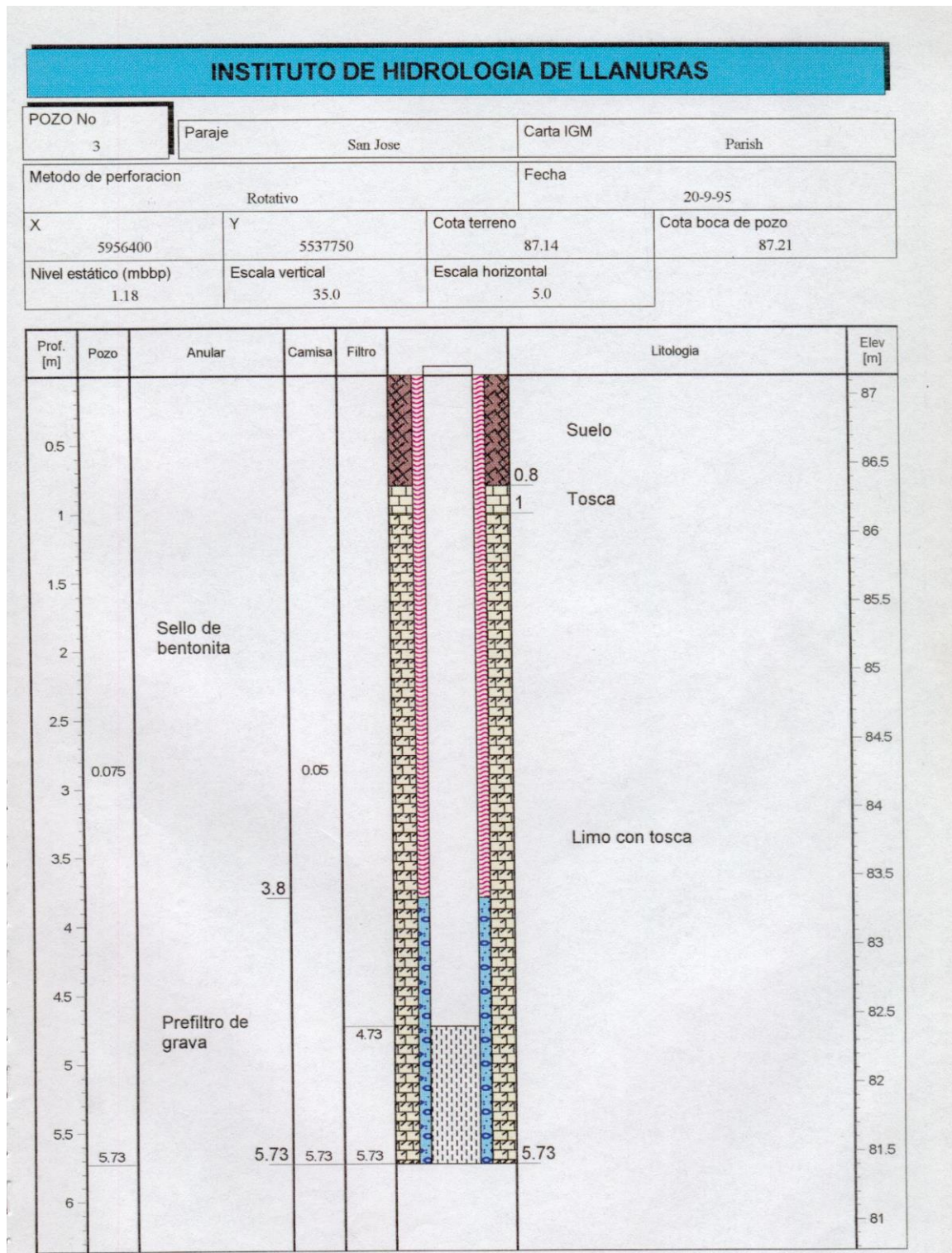
Sakalauskas, K. M., J. L. Costa, P. Laterra, L. Hidalgo & L. Aguirrezabal. (2001). Effects of burning on soil-water content and water use in a *Paspalum quadrifarium* grassland. *Agr Ecosyst Environ.* 50(2), 97-108.

Subzar Malik, M., Shukla, J. P., Mishra, S. (2021). Effect of Groundwater Level on Soil Moisture, Soil Temperature and Surface Temperature. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* (September 2021) 49(9):2143–2161. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01379-6>

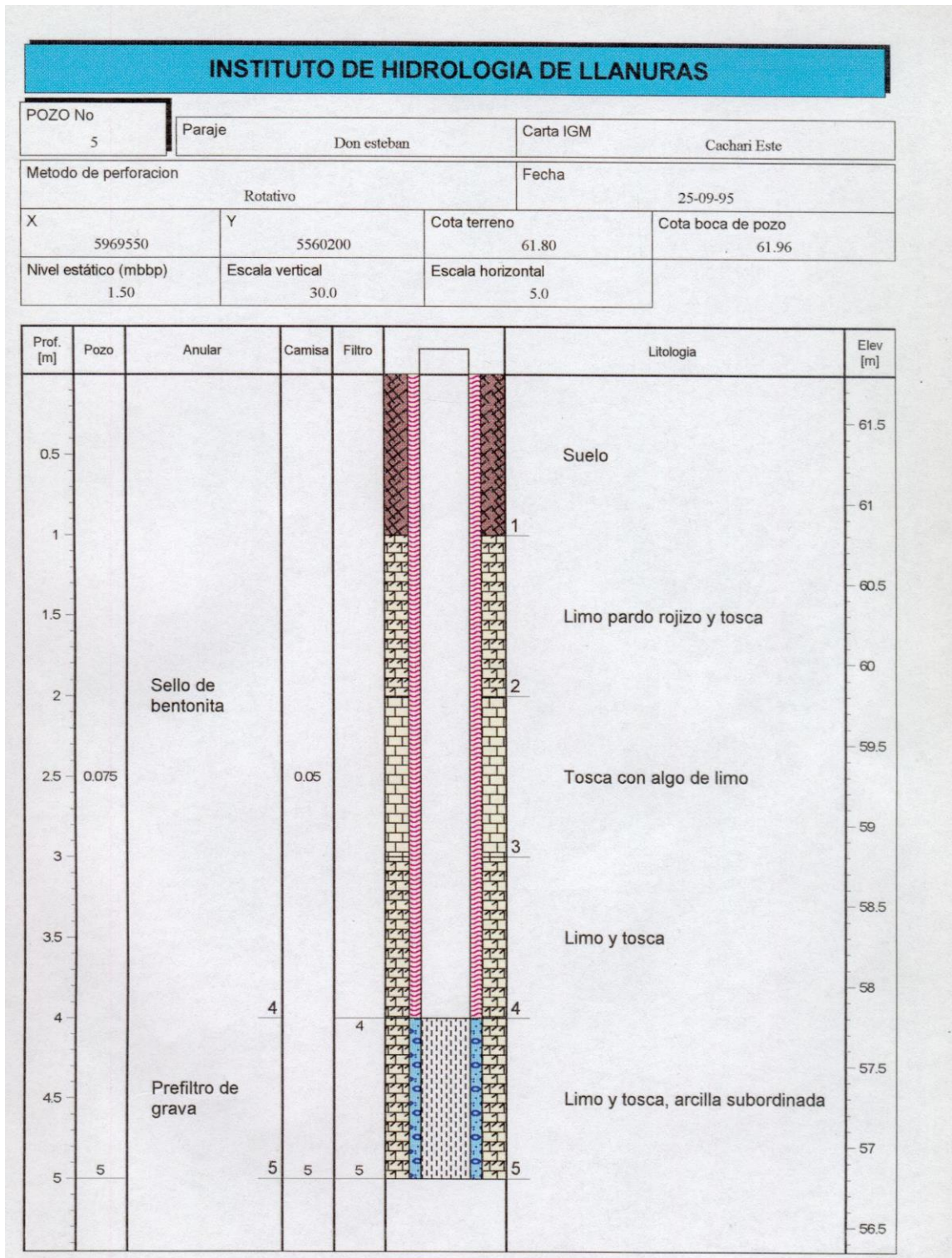
Usunoff, E., Varni, M., Rivas, R. y Weinzettel, P. (2000). Aspectos hidrogeológicos de relevancia de la llanura pampeana en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. 1 st Joint World Congress on Groundwater.

Weinzettel P. y Usunoff E. (2001). Cálculo de la recarga mediante aplicación de la ecuación de Darcy en la zona no saturada. En: A. Medina, J. Carrera y L. Vives (Ed.). *Las caras del agua subterránea, serie hidrogeológica y aguas subterráneas*, Tomo I, 225-232.

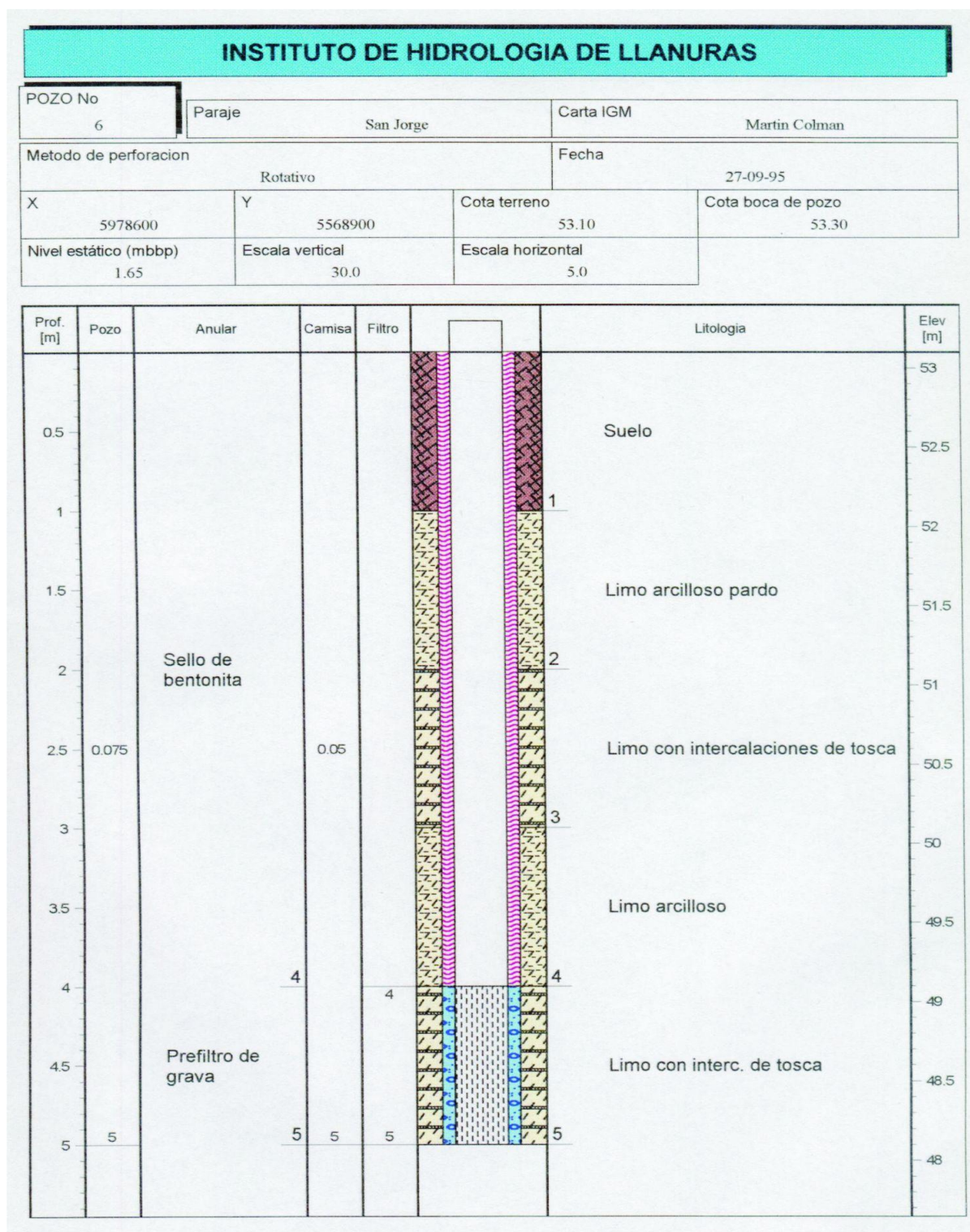
## 9. Anexos



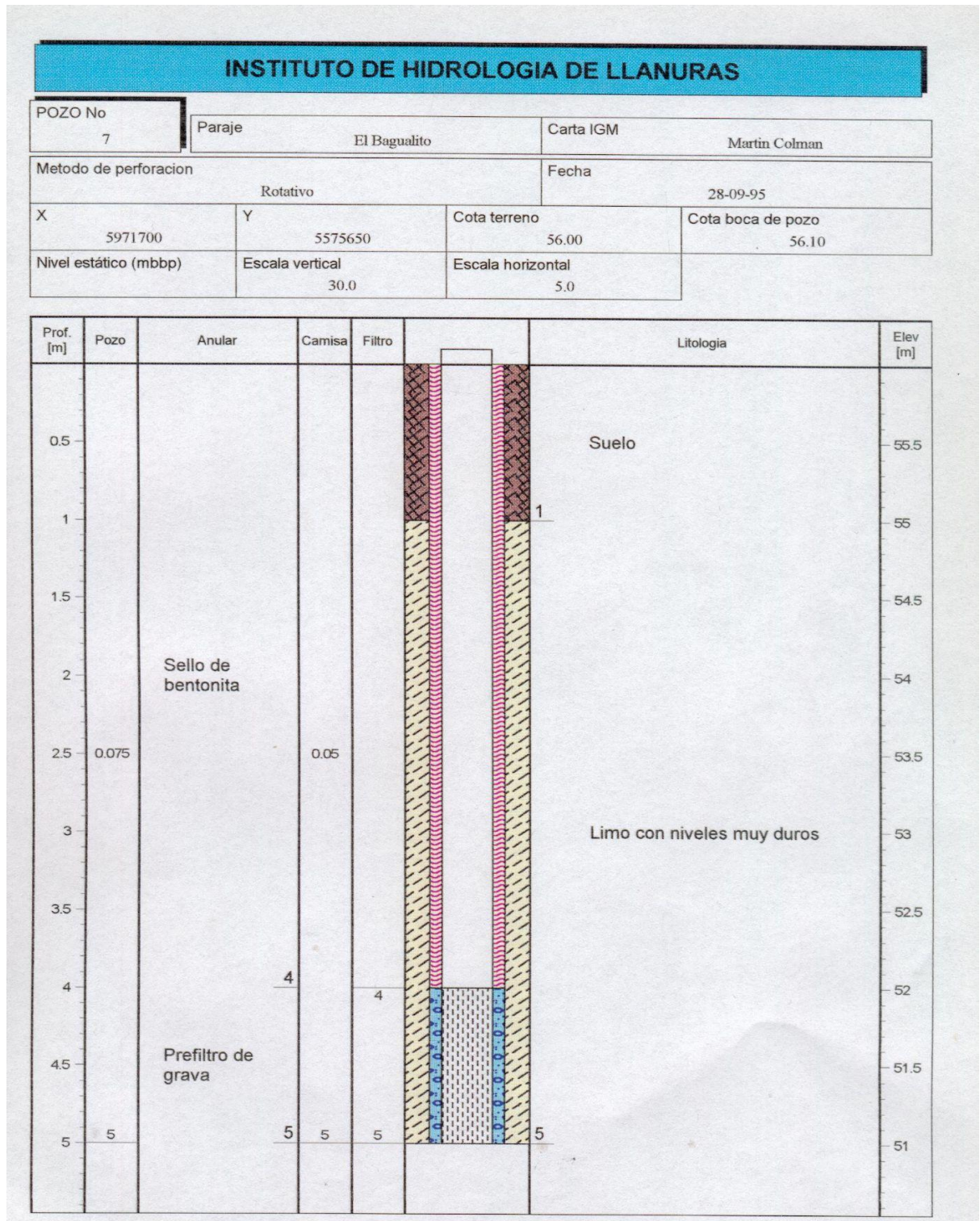
Anexo, Figura A. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P03 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996.



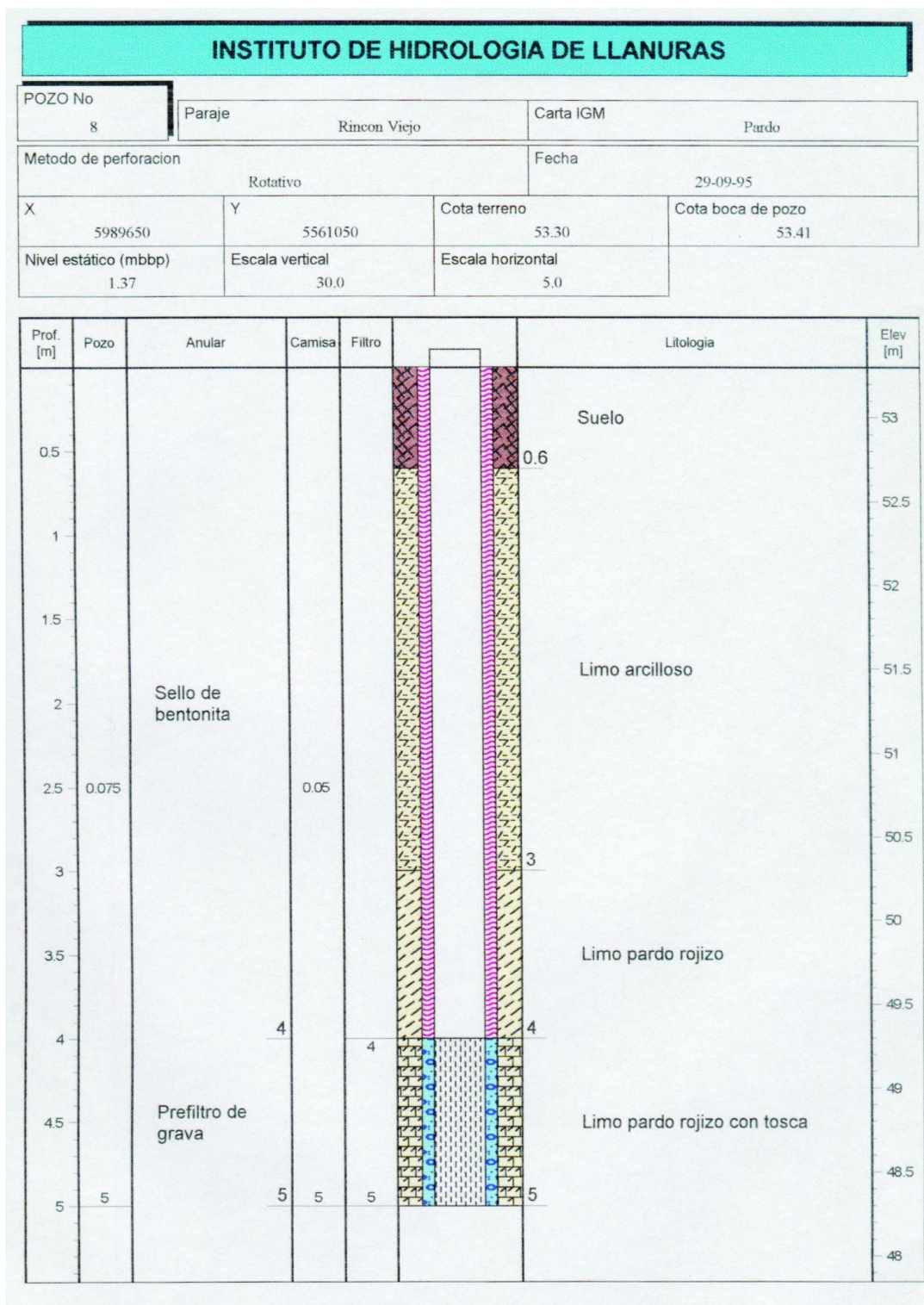
Anexo, Figura B. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P05 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLA, 1996.



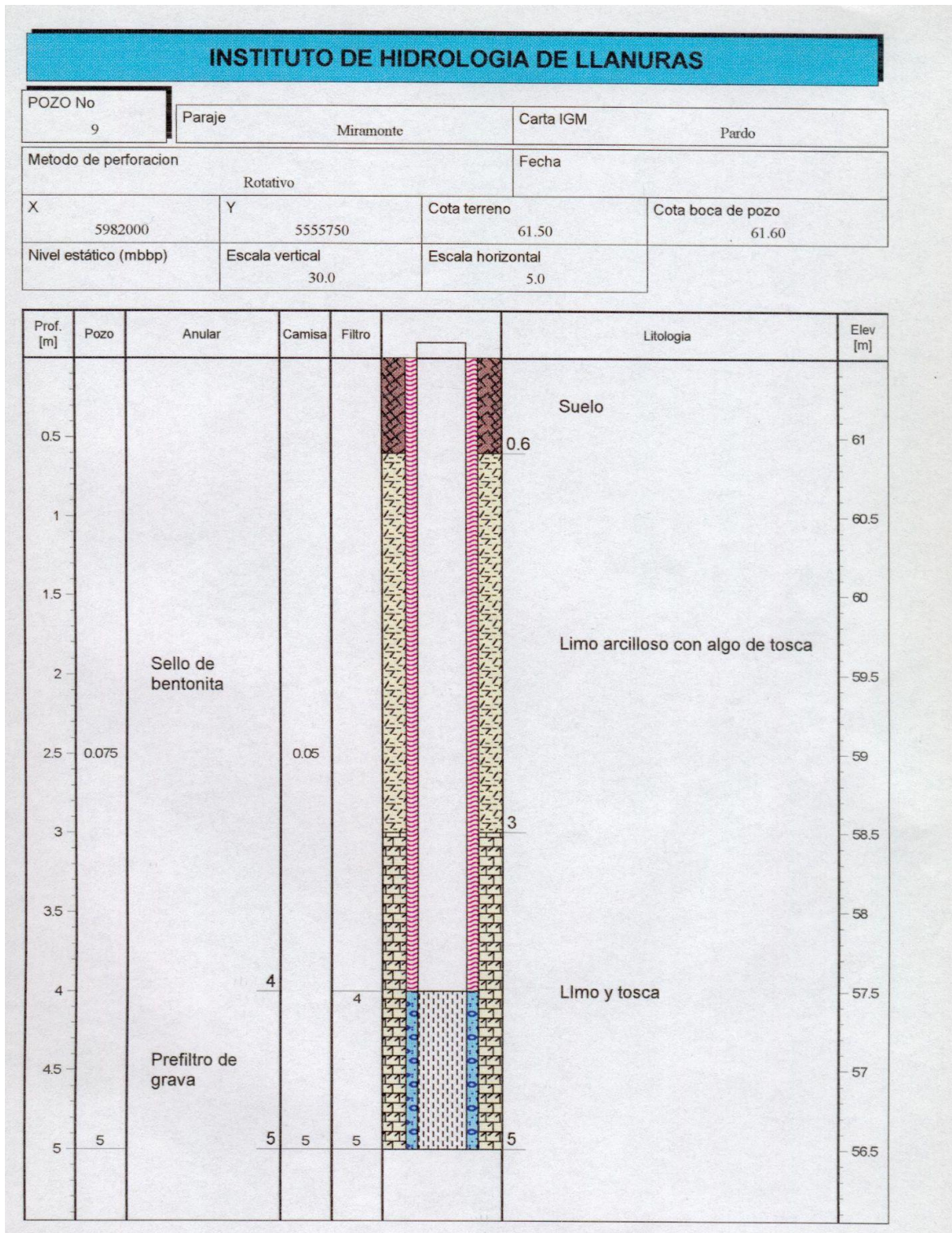
Anexo, Figura C. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P06 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996.



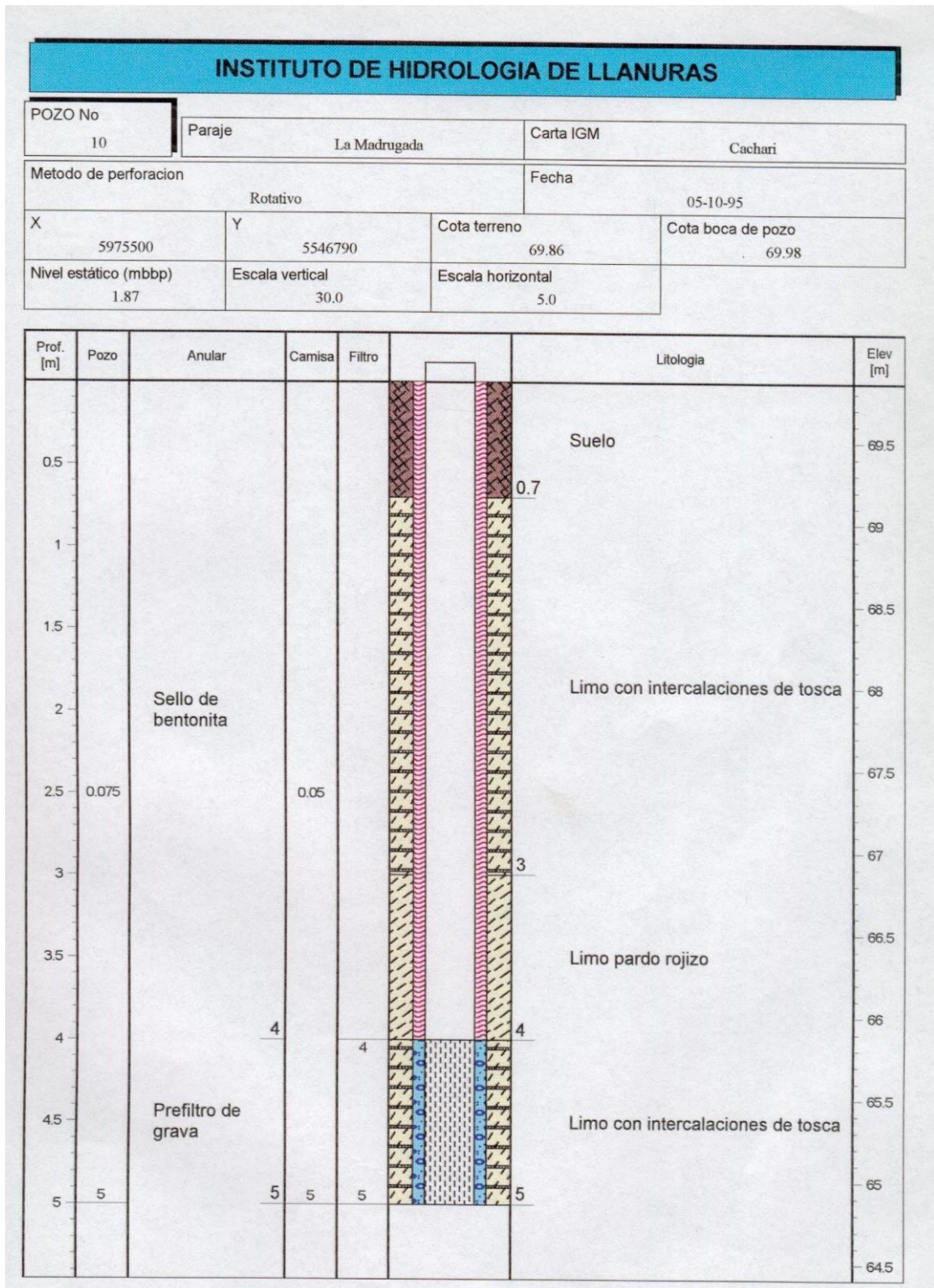
Anexo, Figura D. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P07 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996.



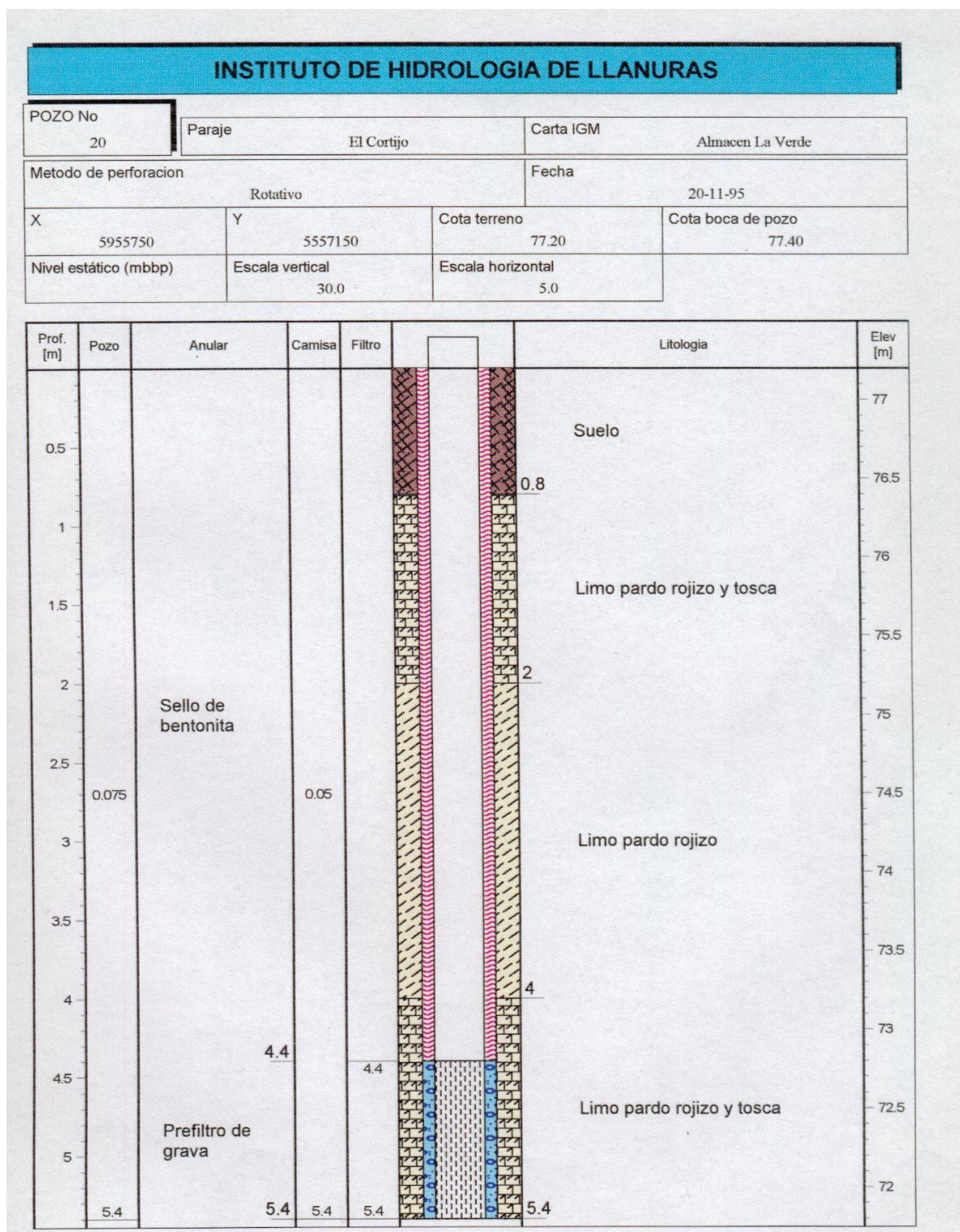
Anexo, Figura E. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P08 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996.



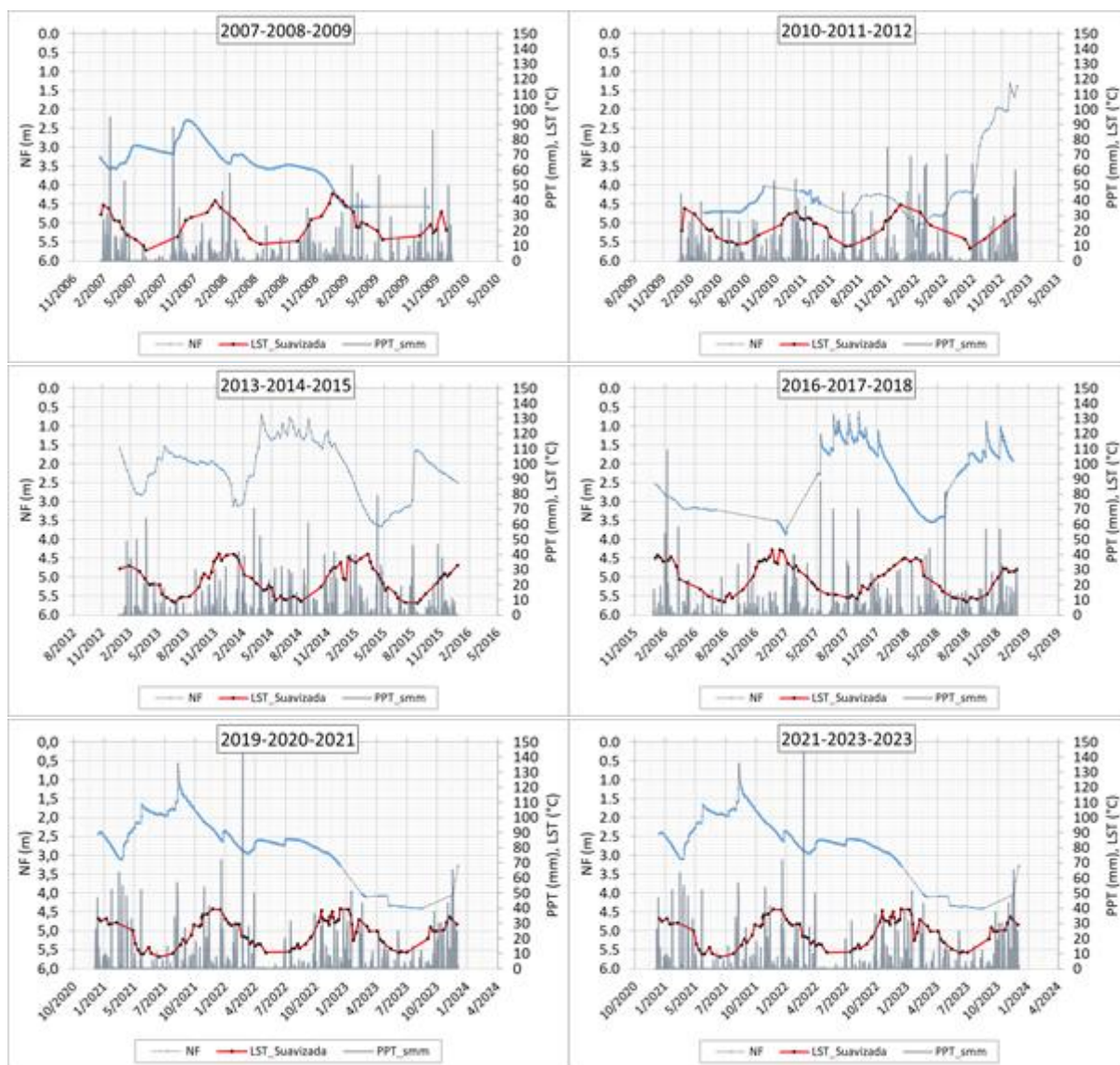
Anexo, Figura F. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P09 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996.



Anexo, Figura G. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P10 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996.



Anexo, Figura H. Diseño y descripción textural in situ del freatómetro P20 utilizado para la medición del nivel freático. Tomado de IHLLA, 1996.



Anexo, Figura I. Comportamiento del nivel freático y la LST suavizada en la serie temporal analizada 2007-2023

Anexo, Tabla A. Valores de las variables físicas utilizadas en los meses de enero para el análisis.

Fecha	LST original [°C]	LST suavizada [°C]	$(LST_i - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min})$ [..]	NF [mm]	ETp [mm]	PPT_smn-ETp [mm]	NDVI [..]
17/1/2008	40,62	39,89	0,68	3,08	5,34	-5,34	0,44
3/1/2009	43,69	44,41	1,00	4,08	6,27	-6,27	0,33
19/1/2009	41,34	42,51	0,86	4,32	6,01	-6,01	0,32
6/1/2013	31,56	30,49	0,00	1,59	6,47	-6,47	0,74
17/1/2014	44,92	38,91	0,60	2,92	6,61	-6,61	0,48
12/1/2015	40,96	38,53	0,58	2,16	6,66	-6,66	0,35
7/1/2016	39,13	37,49	0,50	2,54	6,00	-6,00	0,33
23/1/2016	36,45	38,01	0,54	2,65	4,57	-4,57	0,31
31/1/2016	34,11	35,28	0,34	2,75	4,50	-4,50	0,27
17/1/2017	44,80	43,21	0,91	3,59	6,80	-6,80	0,38
20/1/2018	39,53	36,73	0,45	2,68	6,10	-6,10	0,27
28/1/2018	36,06	37,80	0,52	2,77	5,75	-5,75	0,34
20/1/2021	35,87	31,53	0,07	2,39	6,28	-6,28	0,64
31/1/2022	30,30	32,66	0,16	2,37	4,14	-4,14	0,61
10/1/2023	46,03	39,40	0,64	3,27	6,48	-6,48	0,50
Máximo	<b>46,03</b>	<b>44,41</b>	<b>0,00</b>	<b>4,32</b>	<b>6,80</b>	<b>-4,14</b>	<b>0,74</b>
Mínimo	<b>30,30</b>	<b>30,49</b>	<b>1,00</b>	<b>1,59</b>	<b>4,14</b>	<b>-6,80</b>	<b>0,27</b>
Promedio	<b>39,02</b>	<b>37,79</b>	<b>0,52</b>	<b>2,88</b>	<b>5,86</b>	<b>-5,86</b>	<b>0,42</b>