

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para abordar los problemas planteados se consideraron las características hidrológicas regionales, y a partir de éstas se investigaron casos particulares para efectuar un análisis local y detallado de los factores básicos e influyentes que conduzcan a un manejo sostenible de los recursos hídricos.

Las actividades desarrolladas incluyeron tareas de campo, gabinete y laboratorio.

2.1. Recopilación bibliográfica

Para el desarrollo de temas tales como la geología, geomorfología e hidrogeología regional, se han consultado numerosas y variadas fuentes de información, las cuales han sido utilizadas como base y serán citadas al realizarse la referencia en el texto. La información geológica que data desde el siglo pasado fue relevada y consultada como así también los autores contemporáneos.

Por otra parte, la bibliografía internacional sobre la temática de acuíferos costeros, interfase agua dulce-agua salada, intrusión salina, métodos de explotación en acuíferos freáticos de poco espesor, recarga, antropización, entre otros, ha sido considerada como referencia siendo mencionada en el desarrollo la tesis.

Específicamente en el aspecto hidrogeológico para el área de estudio, se han considerado los trabajos realizados por Sala et al., (1979), CFI (1989a, 1989b, 1990a, 1990b), Girardi (1994), y la Dirección de Geología, Minería y Aguas Subterráneas del Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires (DIGMAS, 1985) los cuales han servido de punto de partida y comparación con el estado actual.

2.2. Cartografía e imágenes satelitales

Para un primer reconocimiento regional, se utilizó cartografía del IGM correspondiente a las Hojas topográficas San Clemente del Tuyú 3757-10-2 y 4-4 y, General Lavalle 3757-10-1 y 4-3 a escala 1:50000 (Figura 2.1), y carta imagen 3757-10 y 4 a escala 1:100000 correspondientes a Santa Teresita.

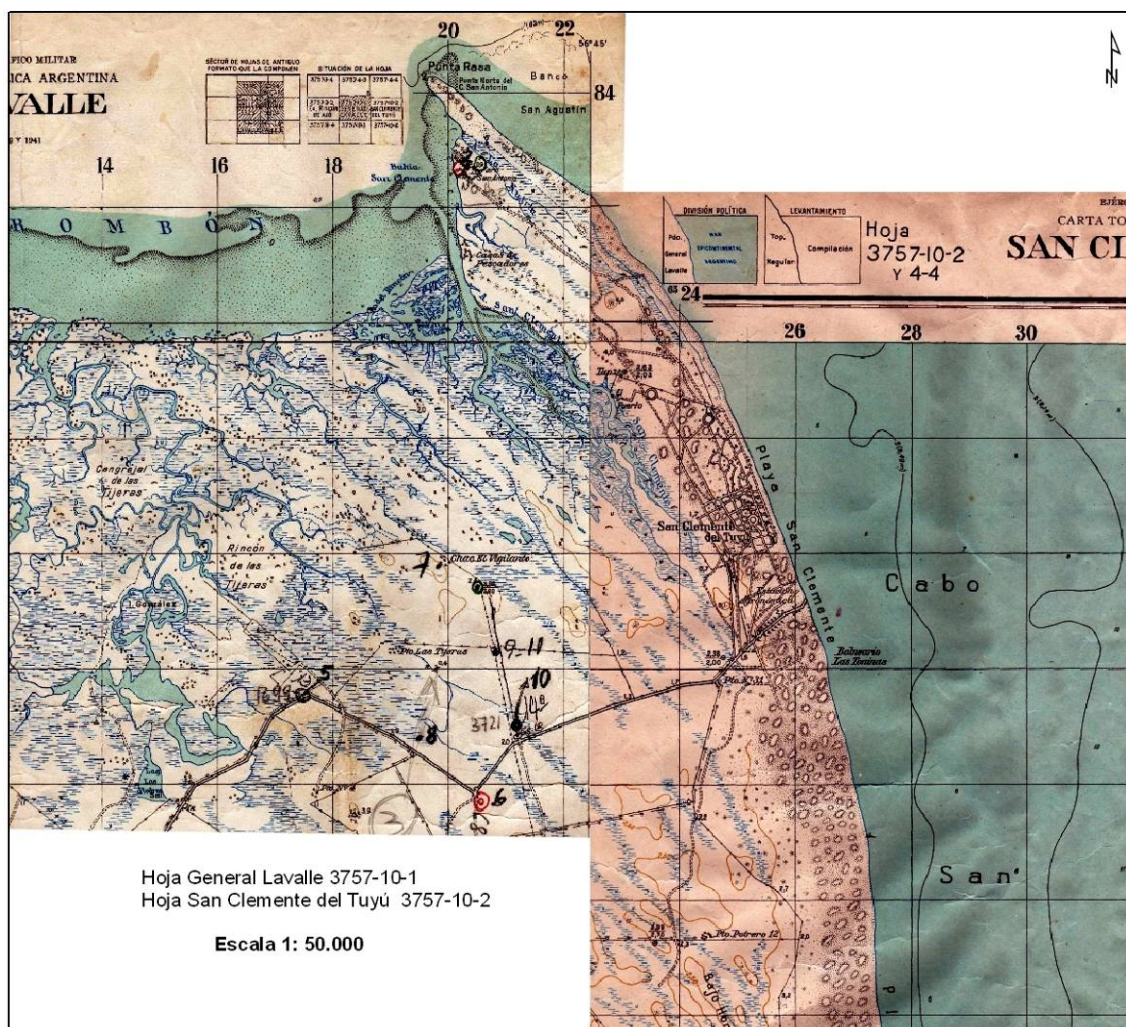


Figura 2.1. Cartas topográficas utilizadas para el reconocimiento del área de estudio

A una escala de mayor detalle, se analizaron fotografías aéreas del año 1958 del Servicio de Hidrografía Naval (Figura 2.2), y 1984 del Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires (Figura 2.3) junto a una imagen satelital de 2005, perteneciente a Digital Globe, Google Earth (Figura 2.4). Las cartas, fotos e imágenes fueron georeferenciadas utilizando un Sistema de Información Geográfica.

Debido a la ausencia de cartografía preexistente a una escala apropiada se planteó la necesidad de la construcción de un mapa base, para cuya ejecución se tomó la imagen de 2005 y se digitalizó el plano de la ciudad (Figura 2.5). La hoja topográfica disponible no representaba la distribución actual de la localidad, ni el detalle de las curvas de nivel necesarios para plantear una geomorfología a nivel local, por esa razón se debió elaborar un mapa topográfico a una escala adecuada para el desarrollo del trabajo.

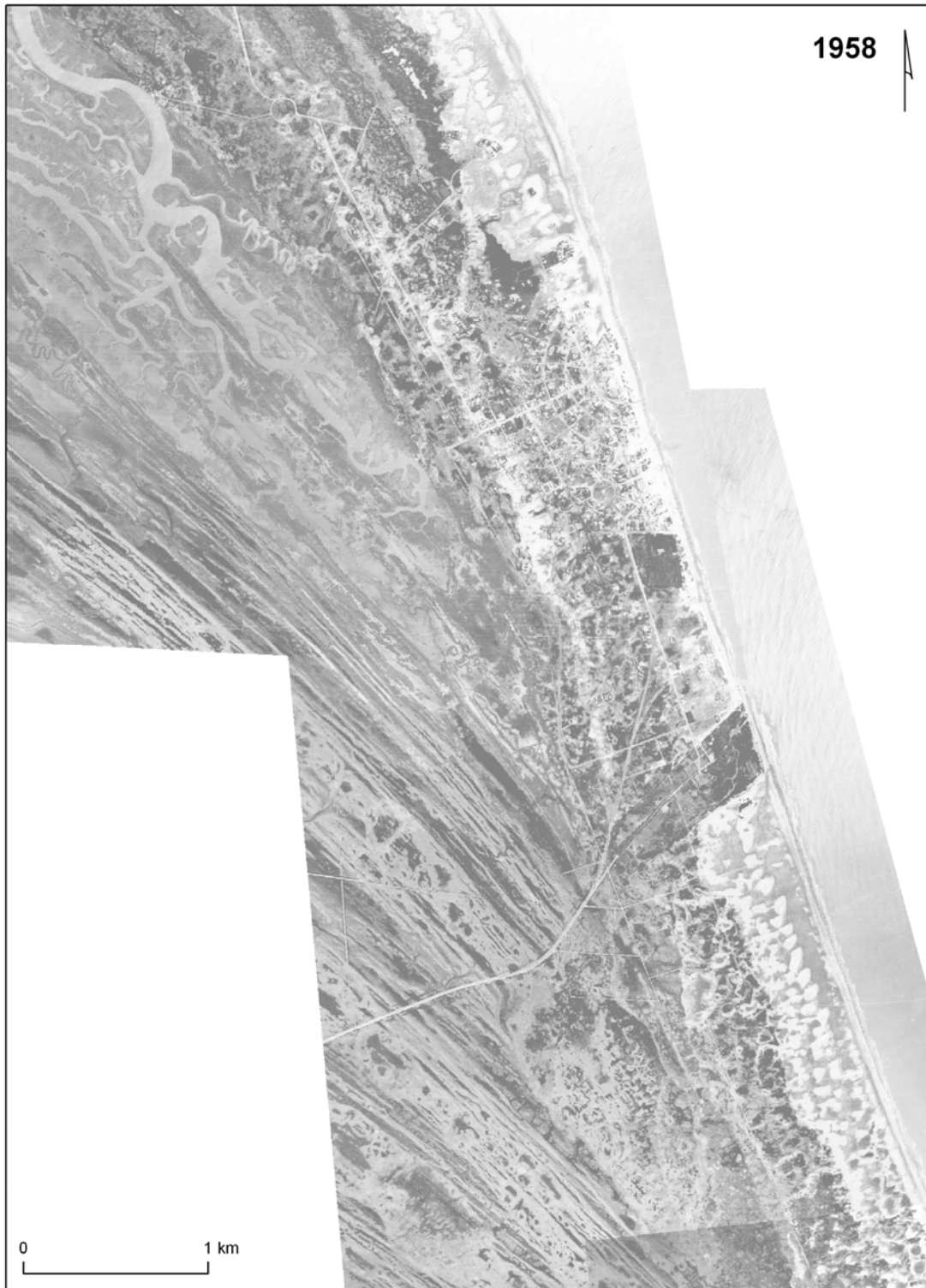


Figura 2.2. Fotografía aérea para el año 1958



Figura 2.3. Fotografía aérea para el año 1984



Figura 2.4. Imagen satelital para el año 2005

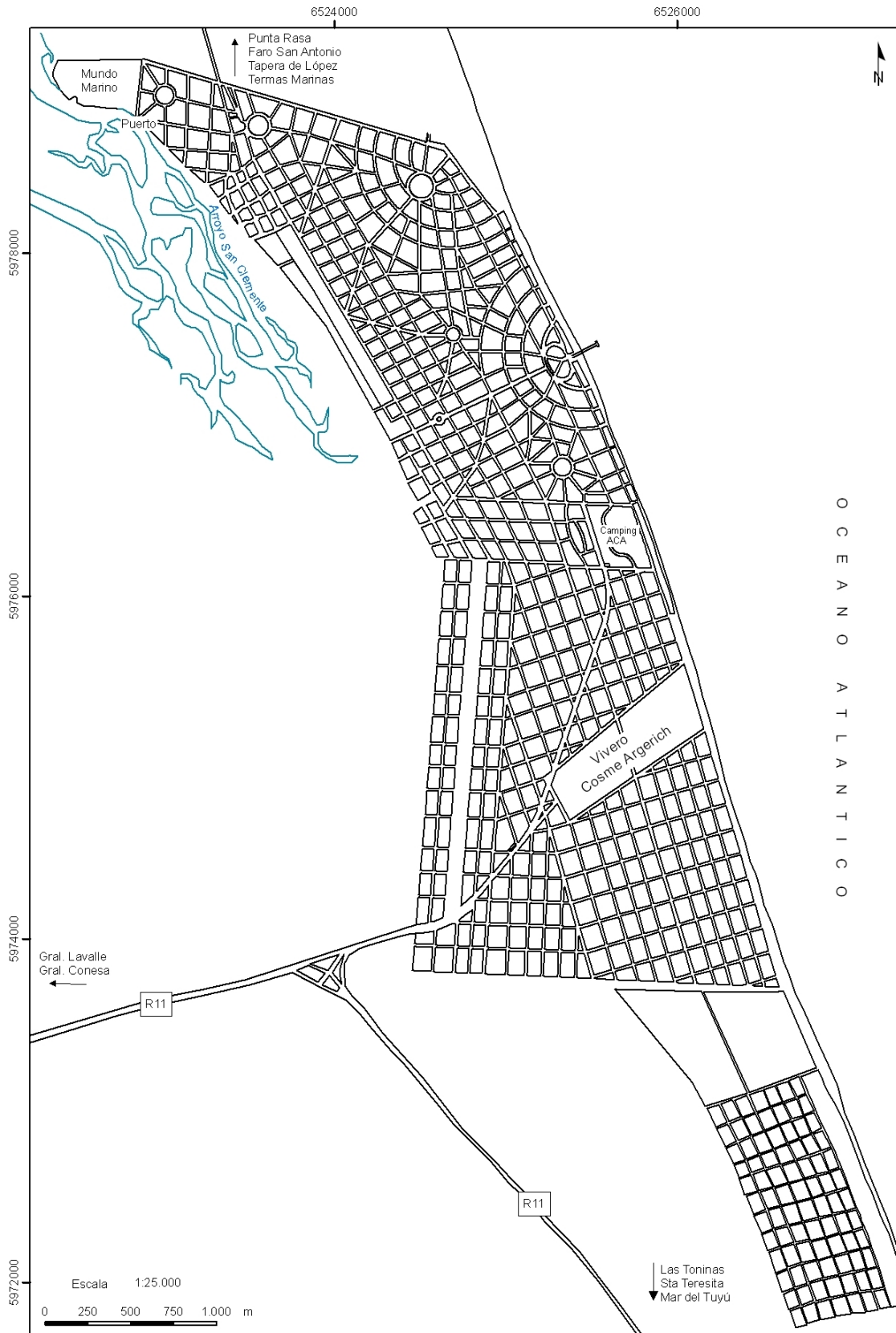


Figura 2.5. Mapa base

2.3. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Se postula que el manejo de la información obtenida con la tecnología de un Sistema de Información Geográfica (S.I.G) constituye una herramienta valiosa para la evaluación de datos, lo cual favorece la resolución de problemas relacionados a los distintos usos que puede destinarse el agua disponible en el área. Se debe señalar que un SIG se caracteriza por incluir un conjunto de herramientas diseñadas para reunir, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales para satisfacer un conjunto específico de objetivos. Los datos se convierten a información digital con el fin de obtener un producto cartográfico, realizar un análisis espacial y ayudar a la toma de decisiones (Peña Llopis, 2005).

En este trabajo, la confección de un solo mapa base no era suficiente, ya que se contaba con información histórica antecedente confiable, y se pretendía realizar un análisis comparativo espacio-temporal. Por lo tanto se elaboró un mapa para cada año en función de las fotografías aéreas de 1958, 1984 e imagen satelital de 2005. Cada set de imágenes fue georeferenciada, y se volcaron los puntos correspondientes a cada relevamiento con sus coordenadas geográficas junto a las tablas de base de datos asociadas, previamente confeccionadas.

La interpolación de datos hidrodinámicos e hidroquímicos para obtener mapas de curvas de igual valor se realizó mediante la operación del SIG a partir de la metodología de tipo vecino próximo, por tratarse de la que mejor representa el comportamiento de las variables en la región. Posteriormente, los mapas se han corregido manualmente y realizado ajustes de acuerdo a interpretación propia y conocimiento del sistema. Según el objetivo planteado se llevó a cabo una reclasificación de acuerdo a las necesidades de cada análisis, obteniéndose mapas isofreáticos y de isotenores químicos. Con otras herramientas de análisis espacial se han realizado operaciones entre mapas resultando mapas de isovariaciones de niveles freáticos para distintas fechas. Se procedió de igual manera con los valores de química.

Se ha realizado un análisis de la distribución territorial, para lo cual se han digitalizado diferentes zonas de acuerdo a las características observadas en las fotos, imágenes y trabajo de campo.

Para el estudio de la evolución geomorfológica de los médanos y del avance de la urbanización, se han establecido áreas digitalizadas sobre las fotos de los mapas base en los diversos años estudiados.

2.4. Usos del suelo

A partir de relevamientos de campo y del análisis visual de las fotografías aéreas e imágenes satelitales, se plantearon tres casos de distribución de uso del suelo, con un sector constituido por suelo arenoso con escasa urbanización y presencia de espacios verdes (Zona 1), otro por suelo arenoso con escasa vegetación (Zona 2), y un tercero en las zonas densamente urbanizadas y con calles asfaltadas (Zona 3), reconociéndose la evolución que han manifestado a través del tiempo y su relación con el ciclo hidrológico. En algunas interpretaciones también se utilizó un mapa de distribución territorial para 1976 perteneciente al trabajo de Sala et al., (1979).

Se ha empleado la herramienta SIG digitalizando cada zona previamente identificada mediante la observación visual. Se han calculado las áreas que ocupaba cada sector manifestando un cambio en la distribución del uso del suelo.

2.5. Análisis de variables meteorológicas

Se analizaron datos de precipitaciones diarias de San Clemente del Tuyú (2002–2009) pertenecientes a un pluviómetro de la Cooperativa de Obras Sanitarias de San Clemente (COS) localizado en el sector sur de la localidad y de la estación del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) Santa Teresita (1989–2007), verificándose la similitud y consistencia, mediante un análisis de doble masa. La mayor extensión de la serie de precipitaciones del SMN en la última localidad ha llevado a seleccionar estos datos para la elaboración de los balances hídricos. La estación Santa Teresita quedó fuera de servicio a partir de 2007 y para el análisis de los balances, a partir de ese año, se tomaron los de COS. Debido a que el periodo de datos de Santa Teresita es insuficiente para reconocer la tendencia regional de las precipitaciones, se han seleccionado las estaciones más cercanas con registros históricos adecuados, que son Dolores y Punta Indio (1925-2008), con condiciones climáticas similares a la estudiada, para dicho análisis.

En noviembre de 2007 se han puesto en funcionamiento dos estaciones meteorológicas en la localidad. Una perteneciente a la Cooperativa de Obras Sanitarias de San Clemente y colocada en su sede de calle III y 15, denominada SC-2 Sede. La otra se ubica en la Planta 2 cita en Av. III entre 73 y 74, pertenece a la

Cátedra de Hidrología General de la FCNyM y se identifica como SC-1 Planta2 (Figura 2.6). Cada estación automática es un equipo que contiene instrumentos y sensores para medir distintas variables meteorológicas: lluvia, temperatura, presión, humedad y viento en la estación ubicada en la Sede y lluvia, temperatura, humedad y profundidad de nivel freático en la Planta 2 (Figura 2.7). Se han analizado las variables en común de las dos estaciones para verificar cambios a nivel local, ya que se encuentran ubicadas a 3 km de distancia, una en la zona urbanizada y la otra en un sector descampado. Además se ha estudiado el comportamiento del nivel freático en relación con las precipitaciones, temperatura, humedad y presión. Cabe destacar que el registro es de paso horario con lo que se contó con un volumen importante de datos, seleccionándose en algunos casos, las medias diarias.

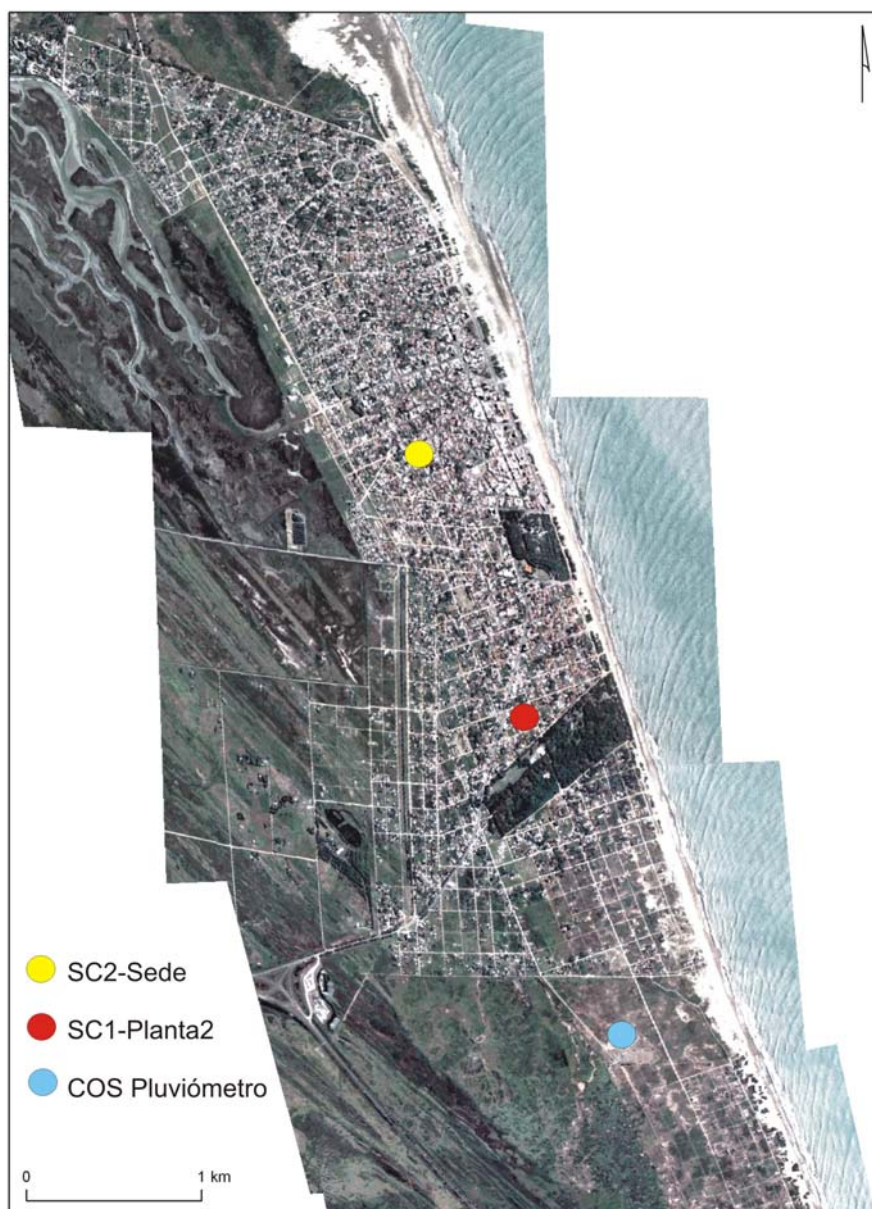


Figura 2.6. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas



Figura 2.7. Estación meteorológica Planta 2. Detalle del sensor de medición de la columna de agua.

2.6. Red de monitoreo, censos de perforaciones y muestreos

En octubre de 2006 se realizó un censo en perforaciones domiciliarias existentes incluyéndose las mediciones de los niveles freáticos, muestreos y descripción de las características fundamentales de las obras de captación (Anexo 1). Las muestras fueron tomadas, luego de su purga, en pozos con bombas manuales (la mayoría fuera de uso) en domicilios particulares, donde las perforaciones oscilan entre 4 y 5 metros de profundidad (Figura 2.8).



Figura 2.8. Campaña 2006 en perforaciones domiciliarias

Se planteó la necesidad de instalación de una red de monitoreo propia debido a la inexistencia de puntos de medición en los sectores menos urbanizados y que representaban puntos de particular interés para el estudio hidrogeológico. Además, la propuesta de una frecuencia de medición de carácter mensual, hacía que la realización de los censos en propiedades privadas representara un factor que influiría negativamente en la operatividad de los mismos. Debido a lo expuesto, se instaló una red con 43 pozos que fuera construida durante 2007 representando una densidad de 3 pozos por km² (Figura 2.9).

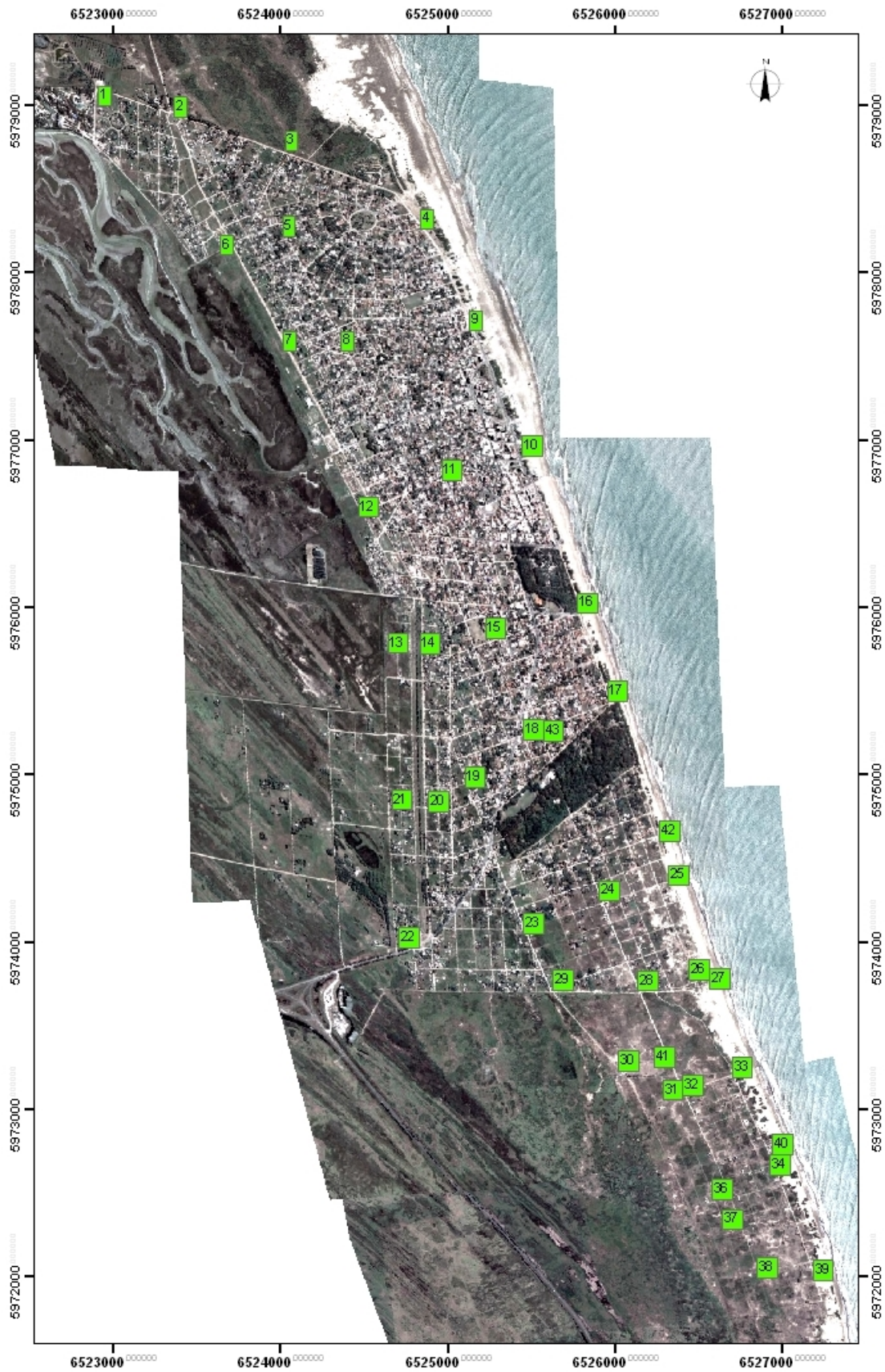


Figura 2.9. Distribución de los pozos en la red de monitoreo

Los pozos son de 3 metros de profundidad con filtros ranurados de 2" de diámetro y se encuentran distribuidos de manera equidistante a lo largo de la zona de estudio (Figura 2.10)



Figura 2.10. Colocación de los freáticos.

Una vez finalizada la ejecución de las perforaciones, se llevó a cabo la nivelación de las bocas de pozos utilizando puntos fijos altimétricos del Instituto Geográfico Militar (IGM). Se realizó una nivelación de tipo geométrica con una distancia de apreciación entre puntos de 50 m. Se utilizaron miras de madera y un nivel Pentax Automático Modelo AL-240, el cual tiene una precisión de $\pm 2,0$ mm.

A partir de la instalación de la red se efectuaron mediciones de nivel freático con periodicidad mensual (Anexo 2).

Se han recolectado muestras para análisis químicos de cationes y aniones, en julio de 2008, tomándose además mediciones de pH y conductividad de campo (Figura 2.11). En fechas posteriores se repitieron algunos muestreos para evaluar objetivos específicos. La obtención del agua subterránea fue mediante un muestreador bailer, previa purga de los pozos, la cual se llevó a cabo extrayendo el volumen de agua equivalente a 3 o 5 veces el almacenado en el pozo y tomando la muestra al día siguiente, luego de la recuperación del nivel freático (U.S. Geological Survey, 2006). El agua fue recolectada en botellas de plástico de 2 litros, tapadas y rotuladas. Las determinaciones fueron realizadas por el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS) de la UNLP. En marzo y septiembre de 2010 se midió conductividad de campo para verificar los resultados luego de una sudestada.



Figura 2.11. Mediciones de campo y toma de muestras

2.7. Balances hídricos y análisis de los niveles freáticos

Para la determinación de los excesos de agua se efectuaron balances hídricos diarios de acuerdo a los datos de precipitación disponibles y los valores de ET₀ (evapotranspiración de referencia) media diaria estimadas según el método de Penman-Monteith (FAO, 1990) utilizando el programa AGROAGUA v.5.0 (Forte Lay et al., 1995) con el que se obtuvieron E_{vp}, E_{tr}, excesos y déficit a nivel diario. El sistema requiere la configuración de ciertos parámetros para la realización de los cálculos.

De acuerdo a las características litológicas y granulométricas, para la capacidad de campo del material esencialmente arenoso se adoptó un valor medio de 160 mm por metro de profundidad, adjudicándose una profundidad efectiva para el balance de agua de 0,25 m ya que no puede alcanzar mayor profundidad el efecto de la evapotranspiración y por lo tanto una CC (capacidad de campo) de 40 mm.

Uno de los valores a considerar para la estimación de la evapotranspiración en la fórmula FAO-Penman-Monteith fue el K_c (coeficiente de cultivo o de la cobertura), para aplicar la fórmula que define a $ET_c = ET_0 * K_c$, en la cual ET_c es la evapotranspiración máxima de la cobertura.

Según FAO (1990) para el caso de suelo con escasa o nula vegetación su valor depende de varios factores como el intervalo entre eventos de humedecimiento (riegos o lluvias), el poder evaporante de la atmósfera (ET₀) y la magnitud del evento de mojado o humedecimiento.

Para el primer factor, en un suelo frecuentemente humedecido la superficie húmeda permite un valor de evaporación muy alto que incluso en algunos momentos puede superar el valor 1 (el valor de la ET_c, en este caso evaporación solamente ya que no existe la transpiración, puede superar algo al de ET₀), de manera opuesta cuando la superficie se seca el valor del K_c decrece rápidamente y por lo tanto ET_c será mucho menor que ET₀.

En cuanto al poder evaporante de la atmósfera (ET₀), cuando es mayor más rápido se seca la superficie entre eventos de humedecimiento y en consecuencia el K_c promedio del período se verá disminuido. Por último, en el caso de la magnitud del evento de mojado o humedecimiento, para lluvias más abundantes, el K_c aumenta pues es mayor el tiempo en que la superficie está mojada. Por lo tanto en este caso se hizo variar al K_c de manera que fuera más alto en invierno (ET₀ más baja) y más bajo en verano (ET₀ más alta).

A partir de FAO (1998) en un gráfico que muestra la relación entre ET_0 y K_c para distintos intervalos de mojado se dedujeron los valores de K_c mensual a lo largo del año, eligiendo como intervalo de mojado el de 4 días que se aproxima a una frecuencia de 7-8 lluvias por mes, valor que responde a las condiciones climáticas de la región. Los valores de K_c aplicados para suelo medanoso con escasa vegetación se han representado en la Figura 2.12.

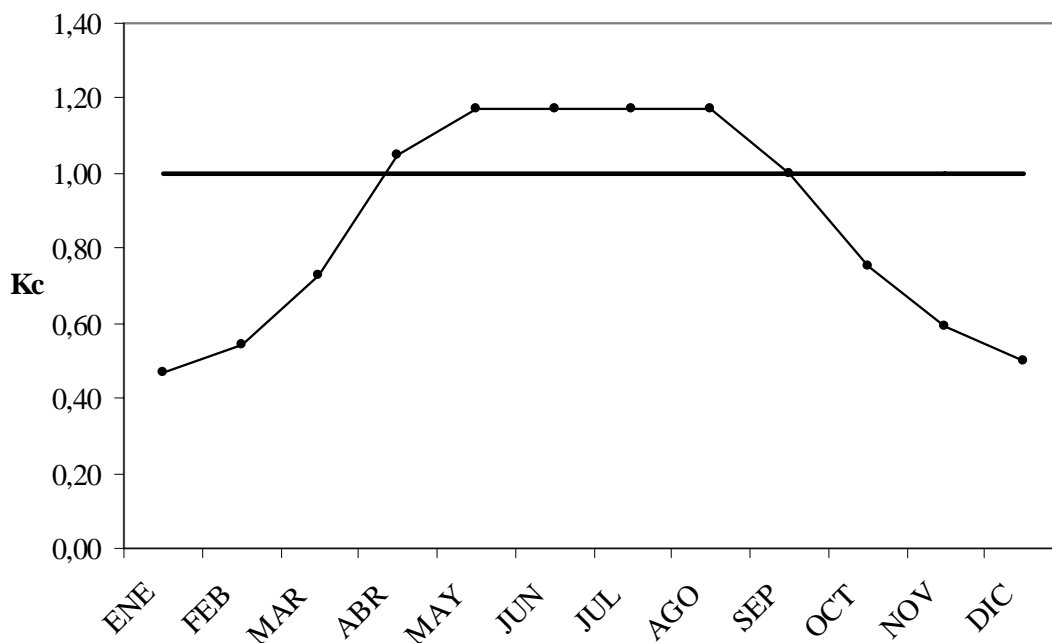


Figura 2.12. Valores de K_c para un suelo medanoso a lo largo del año

Se han elaborado balances hídricos diarios para los períodos relacionados con los relevamientos de aguas subterráneas realizados por Sala et al., (1976) en 1976 y CFI (1990b) en 1987. Posteriormente se han evaluado los efectos de las modificaciones antrópicas sobre la recarga del acuífero freático.

En general se han realizado análisis de años hidrológicos y eventos particulares siguiendo la siguiente metodología: a partir de los relevamientos de campo, que incluyen las mediciones de los niveles freáticos, se construyen mapas isofreáticos a partir de los cuales se digitaliza el área entre las curvas y se determina el volumen de agua para ese momento tomando como referencia el 0 m s.n.m. y los parámetros hidráulicos. Depende el objetivo, se consideran las áreas de uso del suelo. Se comparan los resultados de los excesos del balance hídrico con el agua disponible según el cálculo previo.

Se consideraron las variaciones de niveles freáticos 2008-2009, elaborándose balances hídricos para períodos de profundización y ascenso. Se estimaron los caudales de flujo subterráneo y de extracción para agua de consumo. Se construyeron

mapas isofreáticos mensuales para estudiar e interpretar en el espacio las fluctuaciones de los niveles de aguas subterráneas, utilizándolos como una herramienta para el seguimiento detallado de la evolución hidrodinámica del acuífero.

2.8. Hidroquímica

Se construyeron mapas de isotenores en base a los datos de los muestreos realizados en 2006 y 2008 (39 muestras) y con datos históricos de censos de perforaciones de la UNLP en enero de 1976 (Sala et al., 1976) (30 muestras) y CFI en agosto de 1987 (CFI, 1990b) (28 muestras) La distribución de los pozos censados se presenta en la Figura 2.13, donde en color celeste se ven los que han sido utilizados para el muestreo. Como puede observarse en todos los casos la distribución y la densidad de pozos es comparable.

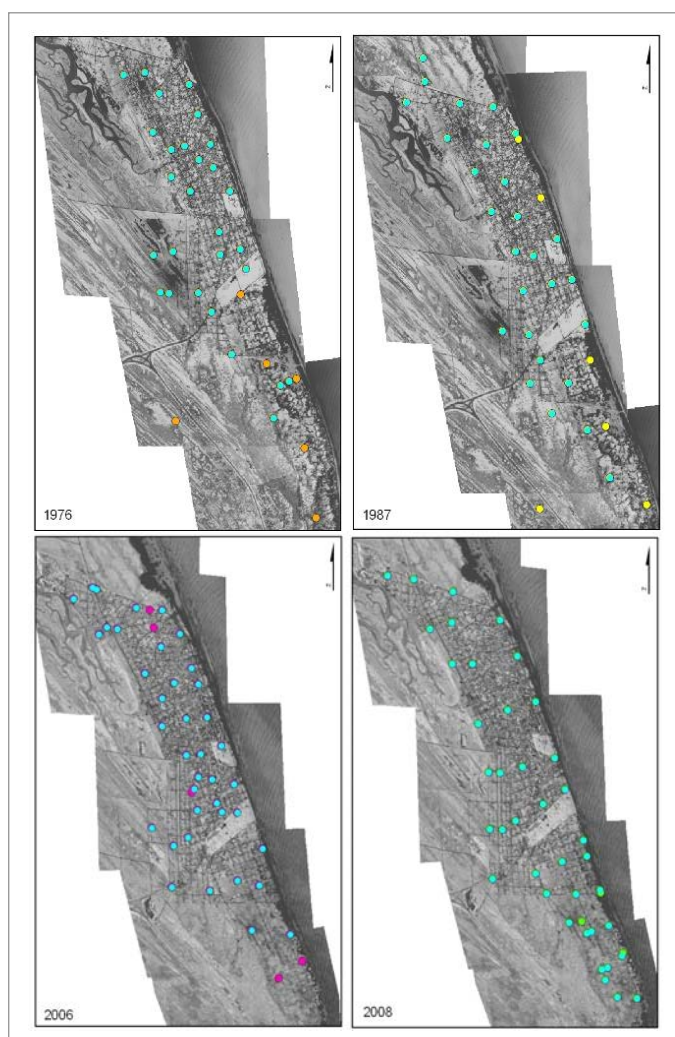


Figura 2.13. Distribución de los pozos muestreados

A partir de la utilización de un sistema SIG, se construyeron mapas de isocontenidos de los elementos disponibles: nitratos, sulfatos, hierro, cloruros, residuo seco o total de sólidos disueltos (TSD), dureza total, pH y conductividad, para cada año censado. Los datos de nitratos fueron evaluados sólo para los años 1987, 2006 y 2008, mientras que flúor, nitritos, amonio, arsénico, pertenecen a los muestreos de 2006 y 2008. Las técnicas analíticas empleadas por el LIS pueden observarse en la Tabla 2.1 y los protocolos en el Anexo 3.

Determinación	Técnica	Método
pH	Potenciométrico	SM-4500-H+
Cloruros	Argentométrico. Método Mohr	SM-4500-Cl
Dureza	EDTA Titrimétrico	SM-2340 C
Conductividad	Conductivímetro	SM-2510 B
Sulfatos	Nefelométrico	SM-4500-SO4-E
Fluoruros	Electrodo selectivo	SM-4500 F C
Amonio	Electrodo selectivo	SM-4500- NH3-D
Nitratos	Electrodo selectivo	SM-4500-NO3-D
Nitritos	Llosva von llosva	Adaptación SM-4500 NO2-
Arsénico	Dietilditiocarbamato de plata	SM-3500-As B
TSD	Gravimétrico	SM-2540 B
Hierro	Colorimétrico de la fenantrolina	SM-3500-Fe B
Manganeso	Método del Persulfato	SM-3500 M y B

Tabla 2.1. Técnicas analíticas empleadas por el LIS

Se realizó una caracterización hidroquímica de los ambientes geomorfológicos de acuerdo a los resultados de los muestreos 2006 y 2008 por ser los que presentan una mayor cantidad de parámetros químicos analizados. También se graficaron diagramas de Piper, Schoeller-Berkaloff y radiales para confirmar la relación entre la química y la geomorfología. Se evaluó el comportamiento de los elementos comunes

en muestreos disponibles para reconocer la variación de concentración a través del tiempo y su calidad para uso.

2. 9. Isotopía

En la zona de estudio, se han seleccionado 16 pozos de la red de monitoreo para la recolección de muestras (campaña julio 2009 y abril de 2010) y realización de análisis isotópicos de oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}\text{‰}$) y deuterio ($\delta^2\text{H}\text{‰}$) que fueron analizadas por el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) en donde se miden las relaciones isotópicas del hidrógeno ($^2\text{H}/^1\text{H}$) y oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) por medio de un espectrómetro de masas de triple colector, sistema de introducción múltiple, Finnigan MAT Delta S. Los resultados obtenidos se expresan como δ (‰) (Anexo 4). A su vez, se han separado las muestras de acuerdo a su ubicación en la morfología del médano. Los resultados de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ se han representado en un gráfico junto a la Línea Meteorica Local y también se ha dibujado un gráfico $\delta^2\text{H}\text{‰}$ vs cloruros para analizar la existencia o no de intrusión salina.

2.10. Geomorfología

A partir de las fotos aéreas e imagen satelital disponibles se delimitó la zona medianosa del ambiente de llanura deprimida. Posteriormente, se realizó un análisis de la evolución del médano, estableciéndose áreas y sectores en donde el cambio en la morfología del terreno es evidente, estudiándose la relación entre efectos naturales y avance de la urbanización en la zona costera.

Debido a la falta de una cartografía de detalle que abarcara la localidad de estudio a una escala de detalle, se construyó un mapa topográfico en base a los puntos acotados correspondientes a los 43 pozos de la red de monitoreo utilizándose, además, puntos auxiliares del 2006 que sirvieron para cerrar las curvas y a la interpretación geomorfológica.

2.11. Campo de bombeo

Se contó con datos de producción diaria de la planta de bombeo de la COS desde fines de 2002 hasta el presente. Se calcularon medias mensuales, anuales, caudales totales de extracción y los destinados a abastecimiento.

Se analizó el comportamiento de los niveles freáticos en ese periodo ya que la Cooperativa mantiene un registro de mediciones dentro del predio, así como la relación entre los niveles, los excesos del balance y las precipitaciones.

En la temporada veraniega 2009-2010 se instaló un registrador continuo de nivel freático (*diver*) con el propósito de analizar el comportamiento de las aguas subterráneas frente a la extracción intensiva que se realiza en esos meses. El dispositivo de marca Solinst Levelogger Gold Series, mide las variaciones de los niveles, temperatura y realiza una compensación barométrica lo cual incrementa el rendimiento y estabilidad del aparato. Presenta una resolución del 0,05%.

2.12. Evolución de la población

Se analizó la evolución territorial de la localidad de San Clemente a lo largo del tiempo, en base a la zonificación establecida y sus correspondientes áreas. Para completar el análisis se incluyeron los valores de cantidad de población del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas del INDEC correspondientes a los años 1960, 1970, 1980, 1991 y 2001. Se relacionaron los datos de producción diaria de la planta potabilizadora de agua, los cuales fueron aportados por la empresa de servicios de la localidad. A partir de los datos de la media mensual de la producción diaria para el año 2006, acompañado de la tasa de consumo por habitante y teniendo en cuenta el aporte turístico, se calculó el porcentaje de población abastecida por el campo de bombeo.

2.13. Geoeléctrica

En diciembre de 2009 se llevó a cabo una campaña de prospección geoeléctrica (Figura 2.14) con la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata quienes efectuaron las mediciones de campo, los cálculos y análisis

matemáticos correspondientes. La interpretación de los resultados fue hecha de manera conjunta.



Figura 2.14. Perfilaje en la playa

Se midieron quince (15) Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en la modalidad Schlumberger, con espaciado del circuito de emisión (AB) máximo de 200 metros. También se volvieron a procesar los datos de la campaña de prospección geoelectrica de CFI (1989b), donde se efectuaron doce (12) SEV en la misma modalidad y formando dos perfiles E-O.

En este tipo de técnicas se materializa en el terreno un dispositivo tetrapolar, lineal y simétrico respecto de un origen. El trabajo de campo consiste en obtener una curva de resistividad aparente haciendo circular una corriente I (conmutada) por el circuito de emisión (AB) y medir la diferencia de potencial V que se genera entre los electrodos de recepción (MN). Las medidas se realizan aumentando la distancia entre los electrodos A y B (Figura 2.15).

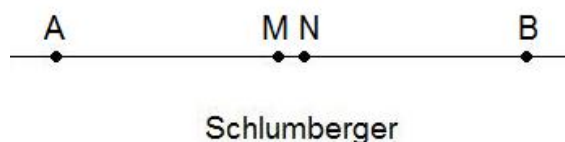


Figura 2.15 Ubicación de los electrodos en el terreno

En base a esto, se obtiene cada valor de resistividad aparente (en $\Omega.m$). El dato de campo (curva de resistividades aparentes) debe ser invertido para obtener una distribución de resistividades en profundidad que satisfaga matemáticamente la curva de respuesta observada (a menos de una banda de error experimental). Para obtener esa distribución de resistividades en profundidad (objetivo del método) se utilizan variadas técnicas matemáticas.

El instrumental de medida utilizado fue un RESPC01 (Figura 2.16) Este instrumento tiene un sistema de lectura automática y los resultados de cada lectura son promediados en forma automática.



Figura 2.16 Instrumental utilizado

Se utilizaron además carretes de 200 m. de cable, electrodos de acero inoxidable para emisión de corriente y electrodos impolarizables de $Cu-SO_4Cu$ para medir ΔV (Figura 2.17)



Figura 2.17. Electrodo de acero inoxidable para emisión de corriente

Los sondeos se realizaron en dirección paralela a la costa (N-S) y alineados en tres perfiles denominados A, B y C, de modo de poder estimar la variación en los espesores de las capas interpretadas en la dirección E-O. El procesamiento de las curvas se hizo utilizando el programa PRINTERSEV.