



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

MODELADO Y ANÁLISIS DE LA MAREA
INDUCIDA EN ACUÍFEROS COSTEROS DEL RÍO
DE LA PLATA

Autor: Julián E. Cuello
Director: Dr. Luis Guarracino

Tesis presentada para optar por el grado académico de
Doctor en Geofísica

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata

LA PLATA, ARGENTINA
- ABRIL DE 2020 -

MODELADO Y ANÁLISIS DE LA MAREA
INDUCIDA EN ACUÍFEROS COSTEROS DEL RÍO
DE LA PLATA

Autor: Julián E. Cuello

Director: Dr. Luis Guarracino

Miembros del jurado:

Dr. Danilo Velis

Dra. Leticia Rodríguez

Dr. Jerónimo Ainchil

Agradecimientos

A la Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas y a la Universidad Nacional de La Plata.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

A Luis, por acompañarme todos estos años. Gracias por la paciencia y la generosidad.

Al Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Jorge Usunoff”. Particularmente agradezco al Dr. Luis Vives y a la Dra. Sandra Martínez.

Gracias a mis compañeros de la Facu, por bancarme en las buenas y en las malas, y a todos los que hicieron más llevadera esta experiencia.

A mi familia. A mi Papá y mi Mamá por brindarme todas las herramientas para desarrollarme personal y profesionalmente. A mi hermano y su familia por estar orgullosos de mi.

A la familia que elegí formar. Moli y Joaco son mi motor. Gracias por acompañarme todo este tiempo.

Resumen

El presente trabajo de Tesis se centra en el estudio de la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas con el objetivo de caracterizar hidráulicamente acuíferos costeros empleando una novedosa técnica hidrogeofísica basada en el fenómeno de marea inducida. Tradicionalmente, la estimación de parámetros hidráulicos se realiza mediante ensayos de bombeo, que consisten en la extracción de agua en un pozo y la medición de los descensos de niveles que se producen en pozos de monitoreo cercanos. Una de las desventajas de esta técnica es el enorme volumen de agua que debe ser extraído, lo que limita severamente su aplicación en acuíferos contaminados o afectados por intrusión salina. Como alternativa a los ensayos de bombeo en zonas costeras, se propone la utilización de la señal natural generada por la marea oceánica o de río para caracterizar el acuífero. El análisis de la relación existente entre la señal de marea y las fluctuaciones inducidas en el acuífero da origen al método de marea inducida. Las fluctuaciones en el acuífero presentan una disminución en amplitud y un desfase temporal respecto a la señal que las origina. El modelado de este fenómeno permite estimar los parámetros hidráulicos del acuífero de manera no invasiva, es decir sin perturbar el flujo de agua en el subsuelo. Para estudiar la interacción entre el Río de La Plata y el sistema acuífero de la zona (Paraná, Puelches y Postpampeano) se ha adquirido una gran cantidad de datos en el marco de los proyectos de investigación “Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo” (ACUMAR-CIC) y “Dinámica del Acuífero Puelche en la Planicie Costera del Río de La Plata” (PIO YPF-CONICET). El análisis de los datos se realiza mediante soluciones analíticas clásicas. Generalmente, se considera que la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas es hidráulica. Sin embargo, cuando el acuífero está confinado y se prolonga por debajo del río/océano, la interacción es de tipo mecánica. En estos casos, la marea produce una diferencia de presión que comprime y descomprime al acuífero produciendo una señal inducida de origen mecánico que posee la misma frecuencia que la marea. Los resultados del trabajo de Tesis realizan aportes en dos campos diferentes del conocimiento. Por un lado, en el campo de las ciencias aplicadas, se realiza una caracterización hidráulica de los acuíferos costeros del Río de La Plata utilizando una metodología que no presenta las desventajas asociadas a los ensayos de bombeo. El análisis de los datos permite estimar los parámetros hidráulicos y definir un modelo conceptual del sistema acuífero costero. Este modelo permite establecer el tipo de interacción (hidráulica o mecánica) existente entre los distintos acuíferos y el Río de La Plata. Por otro lado, en el campo de las ciencias básicas, se desarrollan nuevas soluciones analíticas para describir el fenómeno de marea inducida en acuíferos de espesor variable. En base a estas soluciones se definen criterios que permiten inferir eventuales variaciones en el espesor del acuífero así como diseñar estrategias para evaluar correctamente los parámetros hidráulicos de acuíferos costeros.

Índice general

Resumen	v
1. Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Marea oceánica	3
1.3. Marea inducida	5
1.4. Breve descripción de las zonas de estudio	8
1.4.1. Cuenca Matanza-Riachuelo	10
1.4.2. Región costera del Gran La Plata	13
1.5. Aportes de este trabajo de Tesis	15
1.6. Contenidos del trabajo de Tesis	17
2. Modelos Analíticos Clásicos	19
2.1. Modelo con conexión hidráulica	19
2.2. Modelo con conexión mecánica	23
2.3. Estimación de los parámetros hidráulicos	24
3. Medición de Marea Inducida	29
3.1. Cuenca Matanza-Riachuelo	29
3.1.1. Datos mareográficos	29
3.1.2. Datos piezométricos	35
3.1.3. Interacción de los acuíferos con el río	42
3.2. Región costera del Gran La Plata	43
3.2.1. Datos mareográficos	43
3.2.2. Datos piezométricos	43
3.2.3. Interacción de los acuíferos con el río	49
3.3. Conclusiones	50
4. Marea Inducida: Aplicaciones	51
4.1. Cuenca Matanza-Riachuelo	52

4.1.1. Locación Viñedos	52
4.1.2. Locación Club Regatas Avellaneda	58
4.1.3. Locación Puente La Noria	62
4.2. Región costera del Gran La Plata	66
4.2.1. Locación Parque Industrial Berisso	67
4.2.2. Locación Astillero	69
4.2.3. Locación ATULP	72
4.3. Variante del método de marea inducida	75
4.4. Integración de resultados	78
4.5. Conclusiones	80
5. Nuevas Soluciones Analíticas	83
5.1. Acuñaamiento tierra adentro	85
5.1.1. Solución analítica	86
5.1.2. Análisis de la solución	88
5.2. Solución general para acuíferos acuñaados	91
5.2.1. Solución analítica	92
5.2.2. Análisis de la solución	94
5.3. Análisis de los factores de heterogeneidad calculados en el Capítulo 4	98
5.4. Conclusiones	100
6. Conclusiones	101
Bibliografía	105

Índice de figuras

1.1.	Perfil geológico de las principales formaciones para la cuenca hidrográfica del Gran La Plata. <i>Extraído de Auge (2005)</i>	9
1.2.	Perfil geológico-geomorfológico de la planicie costera del Gran La Plata. <i>Extraído de Fucks et al. (2017)</i>	10
1.3.	Límite hidrográfico (azul) y límite antrópico (verde) de la cuenca Matanza-Riachuelo. En la figura se ilustran los municipios que atraviesa la cuenca y los principales cursos superficiales. El curso más importante que desemboca en el Río de La Plata es el Matanza-Riachuelo. <i>Extraído de www.acumar.gob.ar</i>	11
1.4.	Imagen satelital (<i>extraída de Google Earth</i>) con la ubicación de las locaciones de monitoreo dentro de los límites o en las cercanías de la cuenca Matanza-Riachuelo (Puente La Noria, Club Regatas Avellaneda y Viñedos). Se incluyen además las ubicaciones de los mareógrafos San Fernando y Buenos Aires.	12
1.5.	Límite hidrográfico de las cuencas del Gran La Plata. <i>Extraído de Kruse et al. (2016)</i>	14
1.6.	Imagen satelital (<i>extraída de Google Earth</i>) con la ubicación de las locaciones de monitoreo ubicadas en la planicie costera de la región del Gran La Plata (ATULP, Parque Industrial Berisso y Astillero). Se incluye además la ubicación del mareógrafo del Puerto La Plata.	15
2.1.	Representación esquemática de un acuífero costero semi-infinito 1D.	20
2.2.	Coefficiente de amplitud c y desfase temporal τ generados por una marea semi-diurna de componente M2	21
2.3.	Coefficiente de amplitud c y desfase temporal τ generados por una marea compuesta de componente M4 en función de la distancia a la línea de costa para un acuífero homogéneo considerando 3 valores diferentes de conductividad hidráulica.	22

2.4. Coeficiente de amplitud c y desfase temporal τ generados por una marea diurna de componente O1 en función de la distancia a la línea de costa para un acuífero homogéneo considerando 3 valores diferentes de conductividad hidráulica.	22
2.5. Representación esquemática de un acuífero costero confinado que se prolonga por debajo del río/mar. Para completar la imagen se ilustra un acuífero costero con conexión hidráulica.	23
3.1. Serie de datos mareográficos de la estación Puerto de Buenos Aires.	31
3.2. (a) Bajante del Río de La Plata ocurrida el 7 de julio de 2014 y (b) Fenómeno de Sudestada que tuvo lugar a finales de enero de 2015.	31
3.3. Espectro de amplitud de la señal mareográfica correspondiente a la estación Puerto de Buenos Aires.	32
3.4. Serie de datos mareográficos de la estación San Fernando.	32
3.5. Crossplot y ajuste lineal considerando un desfase temporal de 1 hora entre ambas estaciones mareográficas.	33
3.6. Serie mareográfica correspondiente a la locación Puente La Noria.	34
3.7. Crossplot y ajuste lineal entre la estación mareográfica Puente La Noria y la señal mareográfica extrapolada a Dock Sud.	34
3.8. Datos de altura hidráulica del pozo 37F que perfora los sedimentos Postpampeanos en la locación Puente La Noria.	36
3.9. Datos de altura piezométrica del pozo 37P que perfora el acuífero Puelche en la locación Puente La Noria.	37
3.10. Datos de altura hidráulica del pozo 33F que perfora los sedimentos Postpampeanos en la locación Club Regatas Avellaneda.	37
3.11. Datos de altura piezométrica del pozo 33P que perfora el acuífero Puelche en la locación Club Regatas Avellaneda.	38
3.12. Efectos de la bajante ocurrida el 7 de julio de 2014 en el Río de La Plata en la locación Club Regatas Avellaneda.	38
3.13. Efectos de una Sudestada ocurrida en enero de 2015. El registro de datos corresponde al período 26 de enero - 3 de febrero de 2015. Se incluye la serie mareográfica correspondiente.	39
3.14. Efectos de una Sudestada ocurrida a fines de octubre y principios de noviembre de 2014. El registro de datos corresponde al período 27 de octubre - 10 de noviembre de 2014. Se incluye la serie mareográfica correspondiente.	39

3.15. Esquema representativo de los pozos en la locación Viñedos incluyendo las distancias a la costa y las profundidades de las perforaciones.	40
3.16. Señal mareográfica extrapolada a la locación Viñedos y series de datos correspondientes a los 4 pozos ubicados en la locación Viñedos. El pozo 8A perfora el acuífero Paraná, el pozo 8B al acuífero Puelche y los pozos 8C y 8D a los sedimentos Postpampeanos. .	41
3.17. Serie de datos mareográficos de la estación Puerto La Plata. . .	43
3.18. Señal mareográfica medida en la estación Puerto La Plata y series de datos piezométricos correspondiente a los pozos ATULP-P y ATULP-F.	45
3.19. Señal mareográfica medida en la estación Puerto La Plata y series de datos piezométricos correspondiente a los pozos AS-P y AS-F.	46
3.20. Señal mareográfica medida en la estación Puerto La Plata y series de datos piezométricos correspondiente a los pozos PIB-P y PIB-F.	48
3.21. Ubicación de la locación PIB y de la Av. Río de La Plata. La locación se encuentra a aproximadamente 440 m de la avenida y a 3.5 Km del río.	49
4.1. Señal mareográfica extrapolada a la locación Viñedos y su espectro de amplitud.	53
4.2. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo 8A (acuífero Paraná) y su espectro de amplitud.	54
4.3. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo 8B (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.	54
4.4. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo 8C (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.	54
4.5. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo 8D (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.	55
4.6. Señal mareográfica extrapolada al Club Regatas Avellaneda y su espectro de amplitud.	59
4.7. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo 33P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.	59
4.8. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo 33F (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.	60
4.9. Señal mareográfica correspondiente a la locación Puente La Noria y su espectro de amplitud.	63

4.10. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo 37P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.	63
4.11. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo 37F (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.	64
4.12. Señal mareográfica correspondiente a la estación Puerto La Plata y su espectro de amplitud.	66
4.13. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo PIB-P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.	67
4.14. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo PIB-F (acuífero superficial) y su espectro de amplitud.	67
4.15. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo AS-P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.	70
4.16. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo AS-F (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.	70
4.17. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo ATULP-P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.	72
4.18. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo ATULP-F (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.	73
4.19. Representación esquemática de un acuífero libre con dos perforaciones y sus niveles freáticos.	75
4.20. Registro de Sudestada que comienza el día 31 de marzo de 2016 y ajuste realizado para una difusividad hidráulica de 2056 m ² /d.	77
5.1. Perfil esquemático de un acuífero costero acuñado y de un acuífero de espesor constante.	85
5.2. Marea inducida estimada para tres distancias a la línea de costa. La marea se incluye en los gráficos.	89
5.3. (a) Amplitud y (b) Desfasaje temporal de la marea inducida para 6 longitudes distintas de acuífero.	90
5.4. Factor de heterogeneidad en función de la distancia a la costa para 6 longitudes de acuífero distintas. La solución de Jacob está representada por la línea roja.	90
5.5. Perfil esquemático de dos acuíferos costeros acuñados. El acuífero izquierdo posee un acuñamiento positivo ($\alpha > 0$) y el acuífero derecho posee un acuñamiento negativo ($\alpha < 0$).	92
5.6. Variación temporal de la marea inducida calculada para tres valores de α a tres distancias de la costa, $x=100, 50$ y 90 m. La marea se incluye en los gráficos.	95

5.7. (a) Amplitudes máximas y (b) Desfasajes temporales en función de la distancia a la línea de costa para los valores de acuñaamiento definidos.	95
5.8. Difusividades hidráulicas obtenidas mediante atenuación y desfase temporal y difusividad hidráulica real.	96
5.9. Factor de heterogeneidad en función de la distancia a la costa para acuíferos con acuñaamiento positivo y negativo. Se incluye el <i>FH</i> correspondiente al acuífero de espesor constante ($\alpha=0$). . .	97
5.10. (a) Atenuación, (b) Desfasaje temporal y (c) Factor de heterogeneidad en función de la distancia a la costa para distintas longitudes de acuífero $L=100$ m, $L=150$ m y $L=200$ m.	98

Índice de tablas

1.1. Componentes de marea características observadas en el Río de La Plata.	4
1.2. Información relativa a los datos piezométricos adquiridos en la cuenca Matanza-Riachuelo.	13
1.3. Información relativa a los datos piezométricos adquiridos en la planicie costera del Gran La Plata.	15
2.1. Parámetros elásticos de los acuíferos costeros de la región.	27
3.1. Serie de datos mareográficos correspondientes a las estaciones Puerto de Buenos Aires y San Fernando.	30
3.2. Estimación del desfasaje temporal de la marea en distintas locaciones de la cuenca Matanza-Riachuelo.	33
3.3. Información relativa a los datos piezométricos adquiridos en la cuenca Matanza-Riachuelo.	35
3.4. Información relativa a los datos piezométricos adquiridos en la planicie costera del Gran La Plata.	44
4.1. Amplitud y fase de las componentes M2, N2, S2, O1, K1 y M4 de la marea en la locación Viñedos.	53
4.2. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos 8A y 8B.	56
4.3. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfasaje para los acuíferos Paraná (pozo 8A) y Puelche (pozo 8B) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.	56
4.4. Estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Paraná (8A) y Puelche (8B) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad.	57

4.5. Amplitud y fase de las componentes M2, S2, O1, K1, M4 y S2 de la marea en la locación Club Regatas Avellaneda.	59
4.6. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos 33P y 33F.	60
4.7. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo 33P) y superficial (pozo 33F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.	61
4.8. Conductividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo 33P) y freático (pozo 33F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.	62
4.9. Amplitud y fase de las componentes M2 y O1 de la marea en la locación Puente La Noria.	63
4.10. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos 37P y 37F.	64
4.11. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo 37P) y superficial (pozo 37F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.	64
4.12. Estimaciones de conductividad hidráulica para la locación Puente La Noria.	65
4.13. Amplitud y fase de las componentes M2, N2, K1, O1, M4 y S2 de la marea en Puerto La Plata.	66
4.14. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos PIB-P y PIB-F.	68
4.15. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo PIB-P) y superficial (pozo PIB-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.	69
4.16. Estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Puelche (pozo PIB-P) y superficial (pozo PIB-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.	69
4.17. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos AS-P y AS-F.	71

4.18. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo AS-P) y Postpampeano (pozo AS-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.	71
4.19. Estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Puelche (pozo AS-P) y Postpampeano (pozo AS-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad ya presentado.	72
4.20. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos ATULP-P y ATULP-F.	73
4.21. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo ATULP-P) y superficial (pozo ATULP-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.	74
4.22. Estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Puelche (pozo ATULP-P) y superficial (pozo ATULP-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad ya presentado.	74
4.23. Estimaciones de conductividad hidráulica promedio para el acuífero superficial en la planicie costera del Gran La Plata.	78
4.24. Estimaciones de conductividad hidráulica promedio para el acuífero superficial en la cuenca Matanza-Riachuelo.	78
4.25. Estimaciones de conductividad hidráulica promedio para el acuífero Puelche en ambas regiones de estudio.	79

Capítulo 1

Introducción

1.1. Generalidades

El estudio de las reservas de agua subterránea resulta clave para el bienestar humano y la supervivencia de las especies que habitan la Tierra (ONU, 2003; Reiter *et al.*, 2004; Mooney *et al.*, 2005; Ferguson y Gleeson, 2012) ya que esta fuente de abastecimiento representa más del 95 % del agua dulce potencialmente explotable del planeta (Bear *et al.*, 1999). Si bien los hielos polares y los glaciares comprenden la mayor reserva de agua dulce, no constituyen una fuente asequible. Históricamente, las reservas superficiales han sido las más utilizadas para el consumo de agua dulce debido a su accesibilidad, pero el aumento en la densidad poblacional ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes (Bear *et al.*, 1999). Las predicciones actuales indican que tanto el crecimiento demográfico como el cambio climático producirán un importante impacto en las reservas mundiales de agua dulce (Milly *et al.*, 2005; Vorosmarty *et al.*, 2000). De esta forma, resulta muy importante la preservación del recurso de agua subterránea y la profundización del estudio de los sistemas acuíferos regionales. En el estudio de los acuíferos convergen numerosas disciplinas como la geología, ingeniería, física y química, entre otras, que utilizan distintos enfoques con el objetivo de brindar soluciones a la problemática de la sobreexplotación y contaminación del agua subterránea (Ewing, 1997).

En términos generales un acuífero se puede definir como una formación geológica porosa que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad. En contraposición, un acuicludo es una formación que puede contener agua pero no permite su circulación en cantidades significativas. Un acuitardo es una formación geológica semi-permeable que es capaz de transmitir agua muy lentamente en comparación con un acuífero. Los acuíferos pueden clasificarse tanto por su granulometría como por las propiedades hidráu-

licas de las formaciones que lo limitan. Si en la formación predominan gravas o arenas gruesas será considerado un buen acuífero. A medida que aumenta el porcentaje de limos o arcillas y el grado de compactación de las mismas, se empobrece la calidad del acuífero hasta llegar a una formación prácticamente impermeable (acuitardo o acuícludo). Los acuíferos pueden ser libres, semiconfinados o confinados, según las características del material que lo limita. En general los acuíferos de una determinada región suelen interactuar entre sí y con el entorno, dando lugar a una dinámica particular del sistema acuífero de la región.

Los acuíferos costeros presentan particularidades que los diferencia del resto de los acuíferos debido a que están en contacto con un cuerpo de agua superficial (océano, río, lago). Esta conexión entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales es de común ocurrencia y se observa por ejemplo en la Provincia de Buenos Aires. En la región de la Costa Atlántica, los acuíferos interactúan con el mar. En épocas de mayor demanda de agua potable en las ciudades costeras, la sobreexplotación de agua subterránea produce la ingesión de agua salobre en pozos (Martínez y Bocanegra, 2002; Martínez *et al.*, 2005), rompiéndose así el equilibrio existente entre agua dulce y agua salada. En la región noreste de la provincia, los acuíferos interactúan con el Río de La Plata. Un afluente emblemático del Río de la Plata es el Río Matanza-Riachuelo, llamado coloquialmente Riachuelo, que constituye el límite sur de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. El Riachuelo tiene la particularidad de sufrir altos niveles de contaminación. Según el último informe elaborado por las organizaciones ambientalistas Green Cross International y el Blacksmith Institute, la cuenca Matanza-Riachuelo se encuentra entre los diez lugares más contaminados del planeta (Blacksmith, 2013). Con el objeto de prevenir la contaminación del agua subterránea, resulta de vital importancia el estudio de los acuíferos costeros y su interacción con las aguas superficiales. Por otra parte, el Plan de Acción Argentina Innovadora 2020 considera la caracterización hidráulica de los acuíferos como tema prioritario para gestionar y desarrollar en forma sostenible los recursos hídricos.

La técnica más empleada para el estudio y la determinación de los parámetros hidráulicos de acuíferos son los ensayos de bombeo (Yeh y Huang, 2009; Trabucchi *et al.*, 2018). Esta técnica implica la extracción de grandes volúmenes de agua y la medición de los descensos en pozos de monitoreo cercanos. De esta forma pueden estimarse la transmisividad y el almacenamiento de acuíferos confinados o la conductividad hidráulica y el rendimiento específico de acuíferos libres (Barlow y Moench, 1999). Su principal desventaja es que requiere el bom-

beo de un importante caudal a lo largo de varios días, resultando desaconsejable su aplicación en regiones donde existe contaminación o peligro de intrusión salina (Jha *et al.*, 2003; Chattopadhyay *et al.*, 2015). Utilizar una señal natural para el estudio de los parámetros hidráulicos de los acuíferos costeros resulta indispensable en estos casos.

1.2. Marea oceánica

Los niveles de los cuerpos de agua superficial suelen estar afectados por variaciones periódicas denominadas “marea”. La marea, que en inglés se denomina “tide”, es una palabra de origen Germano cuya etimología remite a la palabra tiempo (tid en el antiguo Sajón). La similitud entre los términos del alemán moderno “Gezeiten” y “Zeiten”, que significan marea y tiempo respectivamente, fortalece la conexión entre ambos conceptos (Pugh, 1987). El origen de la palabra marea hace referencia entonces a la periodicidad con la que los cuerpos de agua superficial varían con el tiempo. Este fenómeno ha sido observado a lo largo de la historia por incontables civilizaciones (Pugh, 1987). Formalmente, la marea es el efecto gravitatorio que la Luna y el Sol producen sobre el potencial terrestre sumado al efecto de aceleración orbital debido al movimiento de la Tierra en torno al baricentro del respectivo sistema de dos cuerpos: Tierra-Luna y Tierra-Sol (Torge, 2001). Estos cuerpos celestes son los más influyentes desde el punto de vista gravitatorio por su cercanía (Luna) y su masa (Sol). En un análisis más detallado del potencial de mareas puede incluirse a Júpiter pero, debido a que su influencia es varios órdenes de magnitud menor a la de la Luna, suele considerarse únicamente el efecto lunisolar. Una consecuencia directa de la modificación en el potencial terrestre debido a la atracción gravitatoria lunisolar (o marea astronómica) es la variación en los niveles de los océanos y grandes ríos que tienen una periodicidad definida y un patrón regional (Pugh, 1987). El potencial de marea, que puede expresarse matemáticamente de manera completa (Torge, 2001), afecta los niveles de agua superficial en función de las características costeras de cada región. Es por eso que hay zonas en donde las variaciones de marea oceánica pueden ser del orden de decenas de metros y otras en donde son de unos pocos metros o incluso menores a un metro. En el Río de La Plata, las componentes de marea oceánica más relevantes son M2, S2, N2, M4, K1 y O1 (D’Onofrio *et al.*, 2012). En la Tabla (1.1) se listan dichas componentes con sus respectivos períodos y su descripción.

Componente	Período [hs]	Descripción
M2	12.42	Lunar principal - Semi-diurna
N2	12.66	Lunar elíptica - Semi-diurna
S2	12	Solar principal - Semi-diurna
M4	6.21	Compuesta
K1	23.93	Lunisolar - Diurna
O1	25.82	Lunar principal - Diurna

Tabla 1.1. Componentes de marea características observadas en el Río de La Plata.

Hay que considerar que existen efectos meteorológicos que también producen variaciones en los niveles de agua superficial, como ocurre por ejemplo con las Sudestadas en el Río de la Plata. Estos efectos, denominados marea meteorológica, se producen por fuerzas atmosféricas, y se definen como la diferencia entre la elevación observada en el cuerpo de agua superficial y la predicha por el efecto de marea astronómica antes mencionado (Santoro *et al.*, 2013). La señal de marea oceánica, que llamaremos marea de aquí en adelante, puede ser utilizada como fuente natural para el estudio de los acuíferos, ya que se propaga tierra adentro y puede ser detectada y medida en pozos cercanos a la costa. La señal que se mide en estos pozos se denomina marea inducida. El fenómeno de marea inducida refleja el nivel de interacción existente entre cuerpos de agua superficial y el agua subterránea. La señal observada en pozos de monitoreo presenta una atenuación en su amplitud y un desfase temporal respecto a la señal de marea. El método de marea inducida se basa en este fenómeno y consiste en la caracterización hidráulica de acuíferos costeros mediante el análisis de la marea inducida. Esto puede realizarse debido a que las señales observadas en pozos están afectadas por los parámetros hidráulicos del acuífero. Por lo tanto, mediante la construcción de un modelo conceptual de interacción entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales, se pueden comparar las señales de marea y de marea inducida con el objetivo de estimar los parámetros hidráulicos del acuífero. La principal ventaja de este método es el aprovechamiento de una señal natural como fuente, permitiendo así evitar la gran extracción de agua requerido para un ensayo de bombeo que, como se mencionó anteriormente, sería complejo y peligroso de realizar en una zona contaminada o sensible a intrusiones de agua salada. En estas circunstancias el método de marea inducida constituye una alternativa muy importante para la caracterización hidráulica de acuíferos. Otra ventaja del método de marea inducida es que provee estimaciones que son más representativas de todo el acuífero ya que la marea afecta una amplia región, mientras que con los ensayos de bombeo se obtienen estimaciones puntuales o

locales. La principal desventaja del método de marea inducida es que sólo puede utilizarse en regiones cercanas a la costa. De todas formas, esta limitación puede salvarse mediante la utilización de ensayos oscilatorios, en los cuales se genera una señal oscilatoria en un pozo y se observa cómo se propaga en pozos cercanos.

En el marco de esta Tesis se ha trabajado en los proyectos de investigación “Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo”, llevado a cabo por la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) y la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), y “Dinámica del Acuífero Puelche en la Planicie Costera de Río de La Plata”, financiado por el CONICET y la fundación YPF. La participación en estos proyectos de investigación permitió adquirir una gran cantidad de datos que serán utilizados para evaluar la interacción entre el Río de La Plata y los acuíferos de la región y poder estudiar sus propiedades hidráulicas.

1.3. Marea inducida

El fenómeno de marea inducida en acuíferos comenzó a estudiarse a mediados del siglo XX. Jacob (1950) y Ferris (1951) fueron los primeros investigadores en derivar una solución analítica para describir el fenómeno de marea inducida considerando un acuífero homogéneo e infinito. Esta solución es de simple aplicación y ha sido profusamente utilizada para la estimación de los parámetros hidráulicos en acuíferos costeros (Carr y van der Kamp, 1969; Rotzoll *et al.*, 2008, 2013; Zhou *et al.*, 2015). Como se ha mencionado anteriormente, la interacción entre los acuíferos costeros y el río/océano puede ser hidráulica o mecánica. En el caso de interacción hidráulica se distingue una región de conexión directa entre el acuífero y el cuerpo de agua superficial. En el caso de que el acuífero esté confinado o semiconfinado y se prolongue por debajo del cuerpo de agua superficial, la interacción entre aguas subterráneas y superficiales puede tener una componente mecánica. En este caso la marea genera un diferencial de presión sobre las formaciones subyacentes que deforma el medio poroso y produce un desplazamiento del agua que se encuentra en los poros. Esa variación de presión induce entonces una señal de origen mecánico que se propaga tierra adentro y puede ser detectada en pozos cercanos a la costa. Este tipo particular de interacción entre agua superficial y subterránea ha sido poco estudiada. El análisis de la marea inducida de tipo mecánico brinda información sobre la estructura del sistema acuífero. Por ejemplo, nos permite inferir de forma sencilla si el acuífero se extiende o no por debajo del río/océano.

Los parámetros hidráulicos involucrados en este fenómeno son la conductividad hidráulica K_s [L/T] y el almacenamiento específico S_s [L⁻¹]. El cociente entre ambas magnitudes se denomina “difusividad hidráulica” [L²T⁻¹] y se expresa como $D_h = K_s/S_s$. Este coeficiente regula la capacidad de una formación geológica para transmitir, almacenar y ceder agua y caracteriza por completo el flujo de agua en un medio saturado. La porosidad del material es importante pero no determinante a la hora de evaluar el comportamiento hidrodinámico. Por ejemplo, las arcillas poseen una porosidad alta, pero los poros son de tamaño muy pequeño por lo que el fluido no los atraviesa con facilidad. Por otro lado, las arenas y gravas poseen porosidades menores, sin embargo el fluido atraviesa con mayor facilidad sus poros. La conductividad hidráulica representa la facilidad con la que un fluido atraviesa un medio poroso y está definida a partir de un experimento que realizó el ingeniero hidráulico Henry Darcy a mediados del siglo XIX (Darcy, 1856), donde comprobó empíricamente que el caudal Q de agua que atraviesa un filtro de sección A es proporcional al gradiente hidráulico $\Delta h/\Delta l$, donde Δh es la diferencia de altura piezométrica entre los extremos del filtro y Δl su largo. Esa constante de proporcionalidad es precisamente la conductividad hidráulica K_s . El almacenamiento específico, a su vez, representa el volumen de agua que libera/capta un acuífero por unidad de volumen y por unidad de descenso/ascenso de altura piezométrica.

La ecuación que describe el flujo de agua en un acuífero unidimensional, confinado y homogéneo se construye a partir de la ecuación de balance de masa y de la Ley de Darcy. La ecuación de balance de masa o ecuación de continuidad del flujo de agua en un medio poroso completamente saturado es la siguiente (Bear, 1972):

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x}, \quad (1.1)$$

donde q [L/T] es el caudal por unidad de área o flujo, h [L] la altura piezométrica y x [L] la distancia. El flujo de agua está dado por la Ley de Darcy (Darcy, 1856):

$$q = -K_s \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (1.2)$$

Las ecuaciones anteriores pueden escribirse en forma acoplada, obteniéndose así la ecuación de flujo en un medio saturado unidimensional:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S_s}{K_s} \frac{\partial h}{\partial t} \quad x \in [0, \infty). \quad (1.3)$$

Esta ecuación de flujo es válida para acuíferos confinados. Sin embargo, si la variación de altura hidráulica en un acuífero libre es mucho menor al espesor

del mismo, el flujo puede aproximarse mediante la Ec. (1.3) (Bear, 1988). Para terminar de definir el modelo y completar el problema diferencial que describe el flujo inducido se requiere imponer condiciones de borde. En el caso de conexión hidráulica se utiliza como condición de borde en la interfase río/acuífero:

$$h(0, t) = m(t), \quad (1.4)$$

donde $m(t)$ es la señal de marea que varía con el tiempo. Por otro lado, en el extremo del acuífero alejado de la costa se suele imponer una condición flujo nulo:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\partial h}{\partial x} = 0. \quad (1.5)$$

En caso de que el acuífero esté confinado y se prolongue por debajo del río/océano, existiendo así una interacción de tipo mecánica entre agua superficial y subterránea, se define otro sistema de ecuaciones. Es necesario en este caso considerar una ecuación para la región donde el acuífero se prolonga por debajo del río/océano ($-\infty < x < 0$) y otra ecuación para la porción de acuífero que se extiende tierra adentro ($0 \leq x < \infty$). El sistema de ecuaciones para describir la interacción mecánica es el siguiente (van der Kamp, 1972):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S_s}{K_s} \frac{\partial h}{\partial t}, \quad x \in [0, \infty) \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{S_s L_e}{K_s} \frac{dm}{dt} = \frac{S_s}{K_s} \frac{\partial h}{\partial t}, \quad x \in (-\infty, 0) \quad (1.7)$$

donde L_e es un parámetro denominado eficiencia de carga que depende de los parámetros elásticos del acuífero. Notar que, en la Ec. (1.7) la eficiencia de carga multiplica a la razón de cambio de la marea (dm/dt). Este factor representa entonces la presión que ejerce la marea sobre el material subyacente. Las condiciones de contorno en este caso son las siguientes:

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad (1.8)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} h(x, t) = \lim_{x \rightarrow 0^-} h(x, t), \quad (1.9)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\partial h}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (1.10)$$

La Ec. (1.8) representa la condición de flujo nulo en $\pm\infty$, mientras que las Ecs. (1.9) y (1.10) representan continuidad de altura piezométrica y continuidad de flujo en $x = 0$ respectivamente, es decir que tienen como objetivo acoplar las Ecs. (1.6) y (1.7).

1.4. Breve descripción de las zonas de estudio

Las zonas de estudio se encuentran en el noreste de la Provincia de Buenos Aires, más precisamente en la cuenca Matanza-Riachuelo y en la planicie costera del Río de la Plata en la región del Gran La Plata. Los acuíferos costeros que se encuentran en esta región ven afectados sus niveles por la señal de marea del Río de La Plata. En líneas generales, la geología de la región de estudio comprende las siguientes formaciones (Auge, 2005):

1. Postpampeano: Los sedimentos Postpampeanos están constituidos por arcillas, limos arcillosos y arenosos con cordones de conchilla de origen marino, fluvial y lacustre. Su espesor varía de escasos centímetros en la Llanura Alta hasta los 25 metros en la ribera del Río de La Plata. En cuanto a su comportamiento hidrogeológico, responde principalmente como un acuitardo aunque los cordones de conchilla constituyen un acuífero de baja permeabilidad (Auge, 2005). En la región de estudio los sedimentos Postpameanos constituyen el acuífero libre (superficial) o freático. En la planicie costera del Gran La Plata los sedimentos Postpampeanos presentan una granulometría limoarenosa y de arenas finas en cercanías de la costa, pasando a arenas gravosas algo más alejado de la costa y a sedimentos fangosos a partir de los 4/5 Km de la costa, mientras que en la cuenca Matanza-Riachuelo predominan los limos arcillosos y las arcillas. Esta es la razón por la que la conductividad hidráulica de los sedimentos Postpampeanos presenta valores muy disímiles. En la región de la cuenca Matanza-Riachuelo se tienen conductividades propias de limos arcillosos que van desde de 0,08 m/d a 0,38 m/d (Auge, 2004), mientras que en la región costera del Gran La Plata, en presencia de arenas finas limosas y arenas gravosas, la conductividad hidráulica puede presentar valores mucho mayores.
2. Pampeano: Los sedimentos Pampeanos se emplazan por debajo del Postpampeano. Están conformados por un limo arenoso de origen eólico y fluvial. Su espesor disminuye al acercarse al río, llegando a ser casi nulo. Su base está formada por un limo arcilloso de unos 6 metros de espesor medio otorgándole al acuífero Puelche un comportamiento de acuífero semiconfinado. La conductividad hidráulica de los sedimentos Pampeanos se encuentra en el rango 1-10 m/d (Auge, 2005).
3. Puelche: Las arenas Puelches constituyen una secuencia de arenas cuarzosas sueltas, medianas y finas algo arcillosas. Poseen estratificación gradada

y representan el acuífero más importante de la región por su calidad y productividad. El acuífero Puelche es de origen fluvial. Ocupa en forma continua aproximadamente 92.000 Km² en el subsuelo del noreste de la Provincia de Buenos Aires. Se encuentra a profundidades de entre 20 y 50 metros y tiene espesores de entre 20 y 30 metros (Auge, 2005). Se han obtenido valores de conductividad hidráulica para el Puelche de entre 9 y 57 m/d (Auge, 2001).

4. Paraná: La formación Paraná está constituida por arcillas y arenas de origen marino. La sección inferior de la formación constituye el acuífero Paraná, que está separada del acuífero Puelche por una formación impermeable comprendida en la sección superior de la formación Paraná (Auge *et al.*, 2002). El acuífero Paraná ha sido poco estudiado, presenta escasos estudios hidrogeológicos y con datos inéditos.

A modo de ejemplo, en la Fig. (1.1) se muestra la disposición de las formaciones descritas anteriormente para la región del Gran La Plata (Auge, 2005), mientras que en la Fig. (1.2) extraída de Fucks *et al.* (2017) se ilustra la varia-

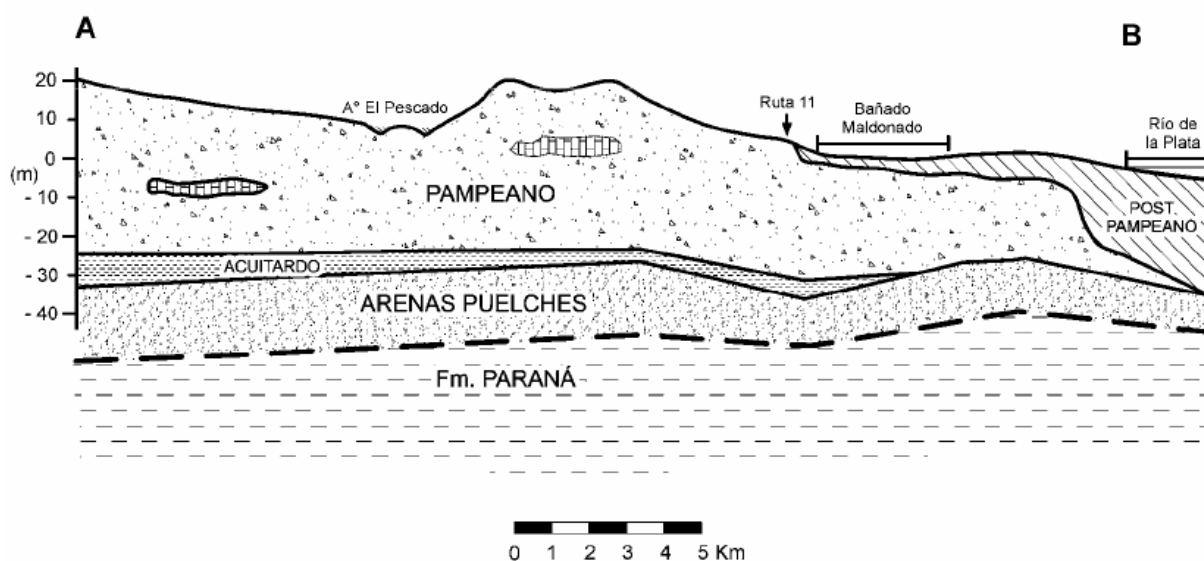


Figura 1.1. Perfil geológico de las principales formaciones para la cuenca hidrográfica del Gran La Plata. *Extraído de Auge (2005).*

bilidad granulométrica los sedimentos Postpampeanos en la planicie costera del Río de La Plata en la zona de Ensenada-Berisso.

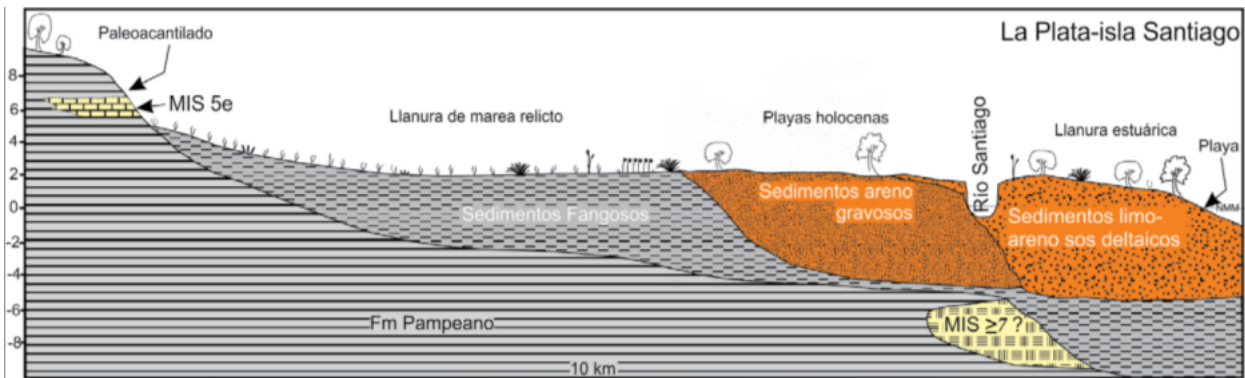


Figura 1.2. Perfil geológico-geomorfológico de la planicie costera del Gran La Plata. *Extraído de Fucks et al. (2017).*

Comparando las señales piezométricas inducidas y las señales de marea puede inferirse el grado de interacción entre el río y el acuífero. Como se mencionó anteriormente, la interacción entre aguas superficiales y subterráneas puede ser hidráulica o mecánica. Por ejemplo, en la Provincia de Buenos Aires, el acuífero Puelche se prolonga debajo del Río de la Plata hasta alcanzar la margen de la República Oriental del Uruguay (Rinaldi *et al.*, 2006; Parker, 1990) y está separado del río por una capa de arcilla de baja permeabilidad, por lo que las señales de marea inducida que pudieran observarse en pozos cercanos a la costa tendrían un origen mecánico.

En las secciones siguientes se describen las zonas de estudio seleccionadas para este trabajo de Tesis.

1.4.1. Cuenca Matanza-Riachuelo

La cuenca hidrográfica Matanza-Riachuelo está ubicada al noreste de la Provincia de Buenos Aires y tiene una superficie aproximada de 2000 Km². Abarca catorce municipios de la Provincia y atraviesa 9 comunas de la Ciudad de Buenos Aires. Dentro de los límites de la cuenca viven más de 4,5 millones de personas, representando así una de las zonas más densamente pobladas de la Argentina (www.acumar.gob.ar). Los límites de la cuenca Matanza-Riachuelo se muestran en la Fig. (1.3).

En el marco del Proyecto “Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo” (ACUMAR-CIC) se instalaron sensores piezométricos en distintos pozos ubicados en 3 locaciones con el objetivo de estudiar los acuíferos de la región y su interacción con el Río de La Plata y el Riachuelo. Las locaciones se denominaron “Puente La Noria”, “Club Regatas Avellaneda” y “Viñedos”. También se utilizaron datos mareográficos correspondientes a dos estaciones mareográficas

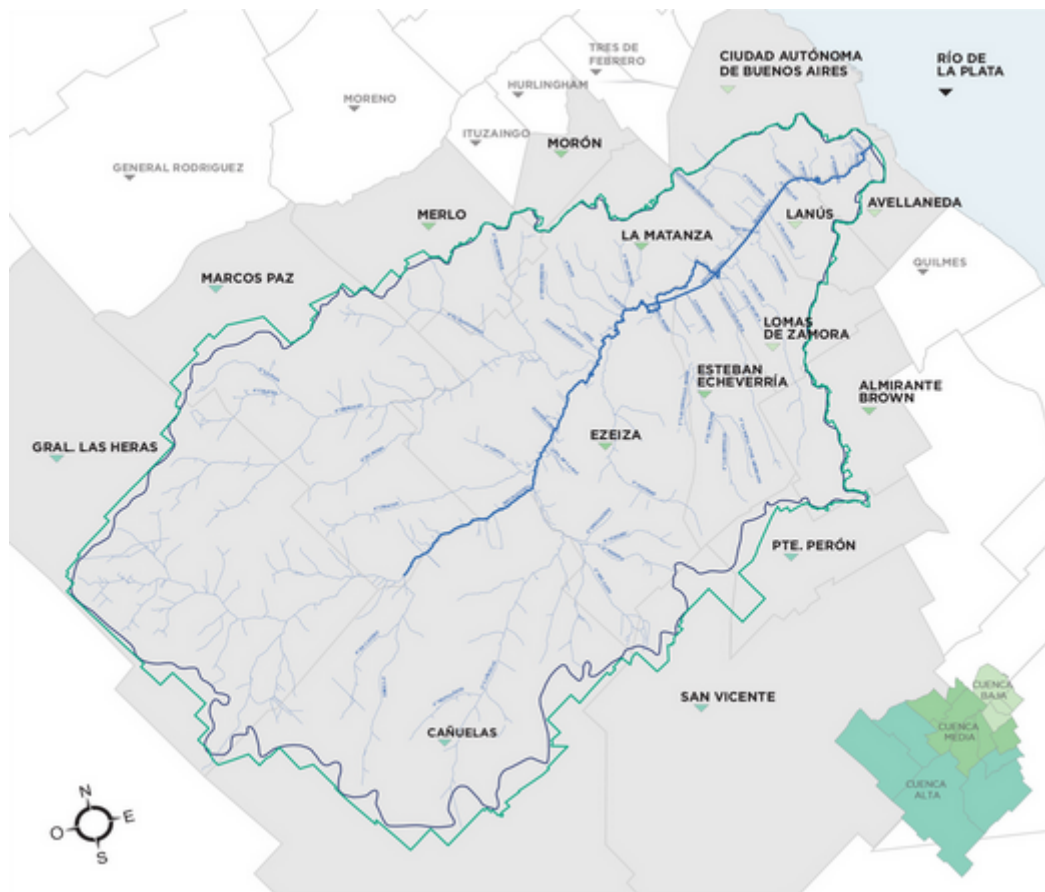


Figura 1.3. Límite hidrológico (azul) y límite antropico (verde) de la cuenca Matanza-Riachuelo. En la figura se ilustran los municipios que atraviesa la cuenca y los principales cursos superficiales. El curso más importante que desemboca en el Río de La Plata es el Matanza-Riachuelo. *Extraído de www.acumar.gob.ar.*

cercanas a la zona de estudio. Las señales mareográficas fueron provistas por el Servicio de Hidrografía Naval del Ministerio de Defensa de la Nación. En la Fig. (1.4) podemos ver la ubicación de las distintas locaciones en donde se encuentran los pozos y la ubicación de las estaciones mareográficas utilizadas. El mareógrafo San Fernando se encuentra en el Espigón del Yatch Club Argentino, en el Río Luján, dentro de la ciudad de San Fernando. Sus coordenadas son $34^{\circ}26'3''$ S de latitud y $58^{\circ}32'24''$ O de longitud. El mareógrafo Puerto de Buenos Aires se encuentra en el Muelle Club de Pescadores, frente al Aeroparque J. Newbery en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Sus coordenadas son $34^{\circ}33'39''$ S de latitud y $58^{\circ}23'56''$ O de longitud.

La locación Puente la Noria es la más alejada de la desembocadura del río Matanza-Riachuelo. Sus coordenadas son $34^{\circ}42'16''$ S de latitud y $58^{\circ}27'41''$ O de longitud. En esta locación se tienen datos de un pozo que perfora el acuífero Puelche (37P) y de un pozo que perfora los sedimentos Postpampeanos que con-

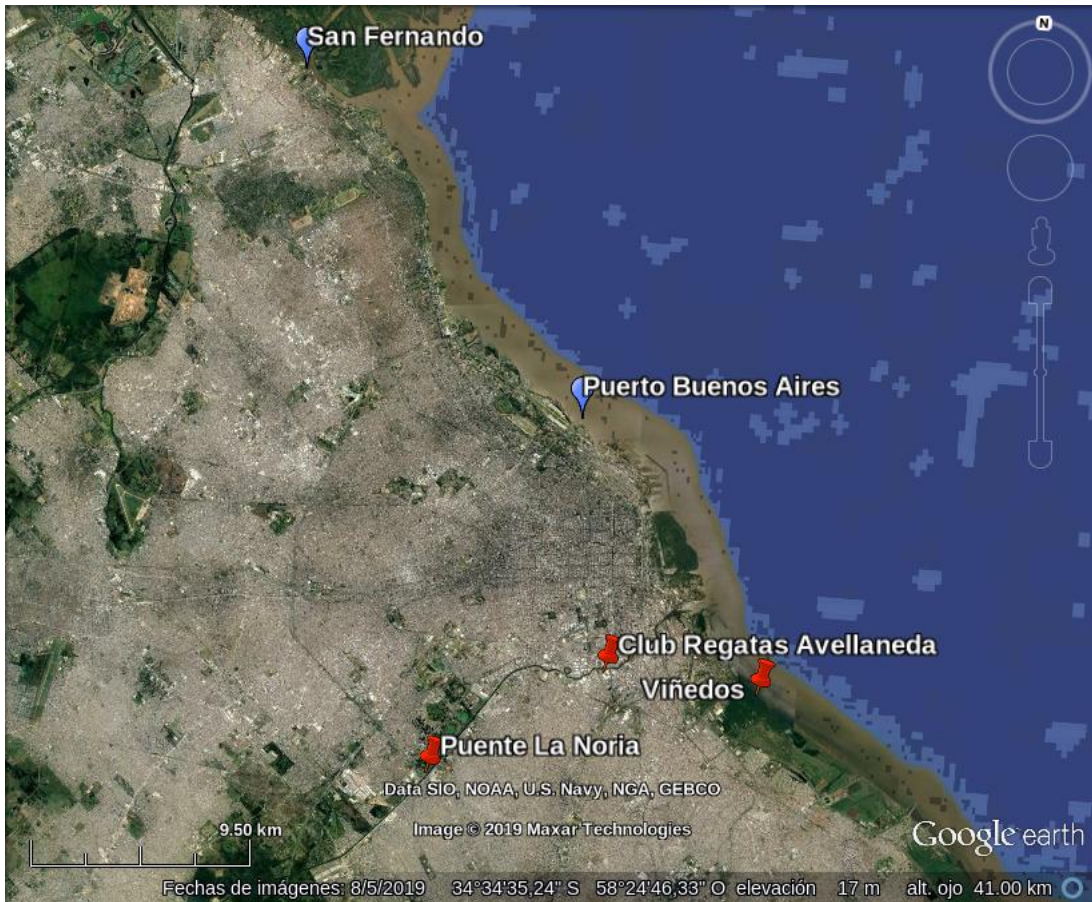


Figura 1.4. Imagen satelital (*extraída de Google Earth*) con la ubicación de las locaciones de monitoreo dentro de los límites o en las cercanías de la cuenca Matanza-Riachuelo (Puente La Noria, Club Regatas Avellaneda y Viñedos). Se incluyen además las ubicaciones de los mareógrafos San Fernando y Buenos Aires.

forman el acuífero freático (37F). En esta locación también se cuentan con datos de un mareógrafo instalado en el Riachuelo. La locación Club Regatas Avellaneda se encuentra a 6 Km de la desembocadura del Riachuelo. Sus coordenadas son $34^{\circ}39'32.4''$ S de latitud y $58^{\circ}22'50.7''$ O de longitud. Esta locación también cuenta con dos pozos: el pozo 33P que perfora el acuífero Puelche y el pozo 33F que alcanza los sedimentos Postpampeanos. La locación Viñedos es la que se encuentra más próxima al Río de La Plata. Sus coordenadas son $34^{\circ}39'49''$ S de latitud y $58^{\circ}18'28.3''$ O de longitud. La locación cuenta con 4 pozos: 8A, que es el más profundo y alcanza la formación Paraná; el pozo 8B, que perfora a las arenas Puelches; los pozos 8C y 8D que perforan los sedimentos Postpampeanos. Esta locación es la más completa y ha sido especialmente diseñada para el estudio de la interacción entre los acuíferos costeros y el Río de La Plata. En la Tabla (1.2) se resume la información relativa a los pozos de monitoreo mencionados, incluyendo la locación a la que pertenecen, el acuífero que perforan, el período

de adquisición y el tiempo de muestreo.

Pozo	Locación	Acuífero	Período de adquisición de datos (año/mes/día)	Muestreo (minutos)
33 F	Club Regatas Avellaneda	Postpampeano	2014/05/15-2015/02/12	10
33 P	Club Regatas Avellaneda	Puelche	2014/05/15-2015/02/12	10
8 A	Viñedos	Paraná	2015/03/11-2015/06/23	10
8 B	Viñedos	Puelche	2015/03/11-2015/06/23	10
8 C	Viñedos	Postpampeano	2015/03/11-2015/06/23	10
8 D	Viñedos	Postpampeano	2015/03/11-2015/06/23	10
37 F	Puente La Noria	Postpampeano	2014/02/11-2014/03/13	10
37 P	Puente La Noria	Puelche	2014/02/11-2014/03/13	10

Tabla 1.2. Información relativa a los datos piezométricos adquiridos en la cuenca Matanza-Riachuelo.

Es importante destacar el pozo 8A que perfora el acuífero Paraná. En la literatura no existe información donde se analice la interacción de este acuífero con el Río de La Plata y los trabajos en los que se ha realizado una caracterización hidráulica son escasos y con datos inéditos por lo que resultan de difícil acceso.

1.4.2. Región costera del Gran La Plata

En el marco del Proyecto “Dinámica del Acuífero Puelche en la Planicie Costera del Río de La Plata” (CONICET-YPF) se trabajó con datos de pozos ubicados en la planicie costera de las cuencas hidrográficas del Gran La Plata (La Plata, Berisso y Ensenada). En la Fig. (1.5) se ilustra la región que delimitan estas cuencas. Los recursos hídricos de esta región geográfica son intensamente explotados para una gran diversidad de usos, tales como abastecimiento de agua potable, riego, ganadería e industria. Las cuencas abarcan los municipios de La Plata, Berisso y Ensenada cubriendo un área de 900 Km² aproximadamente (Kruse *et al.*, 2016). En particular, en este trabajo de Tesis se cuenta con datos piezométricos que corresponden a pozos que se encuentran en tres locaciones ubicadas en la planicie costera: ATULP, Astillero y Parque Industrial Berisso. En la Fig. (1.6) podemos visualizar la ubicación de las locaciones así como de la estación mareográfica utilizada (Puerto La Plata).

El mareógrafo Puerto La Plata se encuentra en el muelle del Destacamento PNA I. Monte Santiago, en un canal interior de acceso al Puerto La Plata. Sus coordenadas son 34°50'2" S de latitud y 57°52'49" O de longitud. La locación

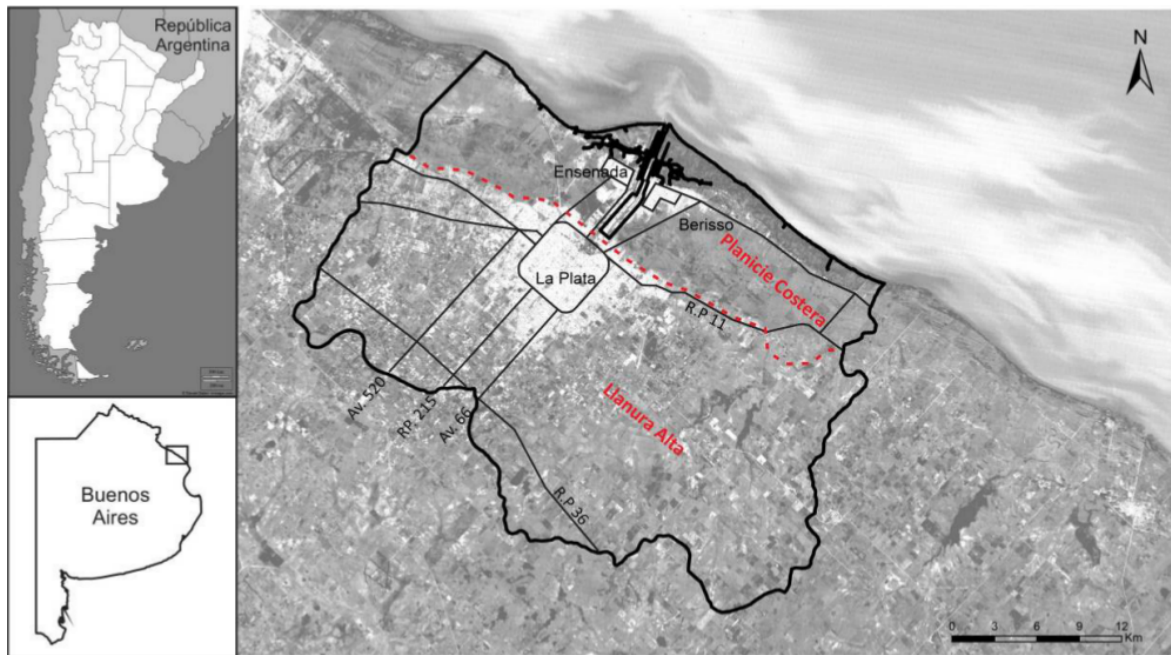


Figura 1.5. Límite hidrográfico de las cuencas del Gran La Plata. *Extraído de Kruse et al. (2016).*

ATULP se encuentra a 60 m del Río de La Plata y se sitúa dentro del predio de dicha asociación. Sus coordenadas son $34^{\circ}49'50''$ S de latitud y $57^{\circ}56'53''$ O de longitud. En dicha locación se tiene un pozo que perfora al acuífero Puelche (ATULP-P) y un pozo que perfora los sedimentos Postpampeanos (ATULP-F). La locación denominada Astillero se encuentra dentro del Astillero Río Santiago y tiene la particularidad de ubicarse en cercanías de 3 cursos de agua interconectados. Se encuentra a 60 metros de un canal interno del Astillero, a 600 metros del cuerpo principal del Canal Santiago y a 2500 metros de la costa del Río de La Plata. Sus coordenadas son $34^{\circ}51'8''$ S de latitud y $57^{\circ}54'2''$ O de longitud. En esta locación se obtuvieron datos piezométricos del acuífero Puelche (Pozo AS-P) y de los sedimentos Postpampeanos que conforman el acuífero freático (AS-F). La locación Parque Industrial Berisso (PIB) se ubica a unos 440 metros de la Av. Río de La Plata que conecta las ciudades de Berisso y La Plata. Sus coordenadas son $34^{\circ}53'12''$ S de latitud y $57^{\circ}51'2''$ O de longitud. Esta locación se encuentra a 3500 metros del Río de La Plata y a 440 metros del arroyo que se encuentra a la vera de la Av. Río de La Plata. En el PIB se tiene un pozo que perfora el acuífero Puelche (PIB-P) y un pozo que alcanza los sedimentos Postpampeanos (PIB-F). En la Tabla (1.3) se resume la información relativa a los pozos de monitoreo mencionados, incluyendo la locación a la que pertenecen, el acuífero que perforan, el período de adquisición y el tiempo de muestreo.

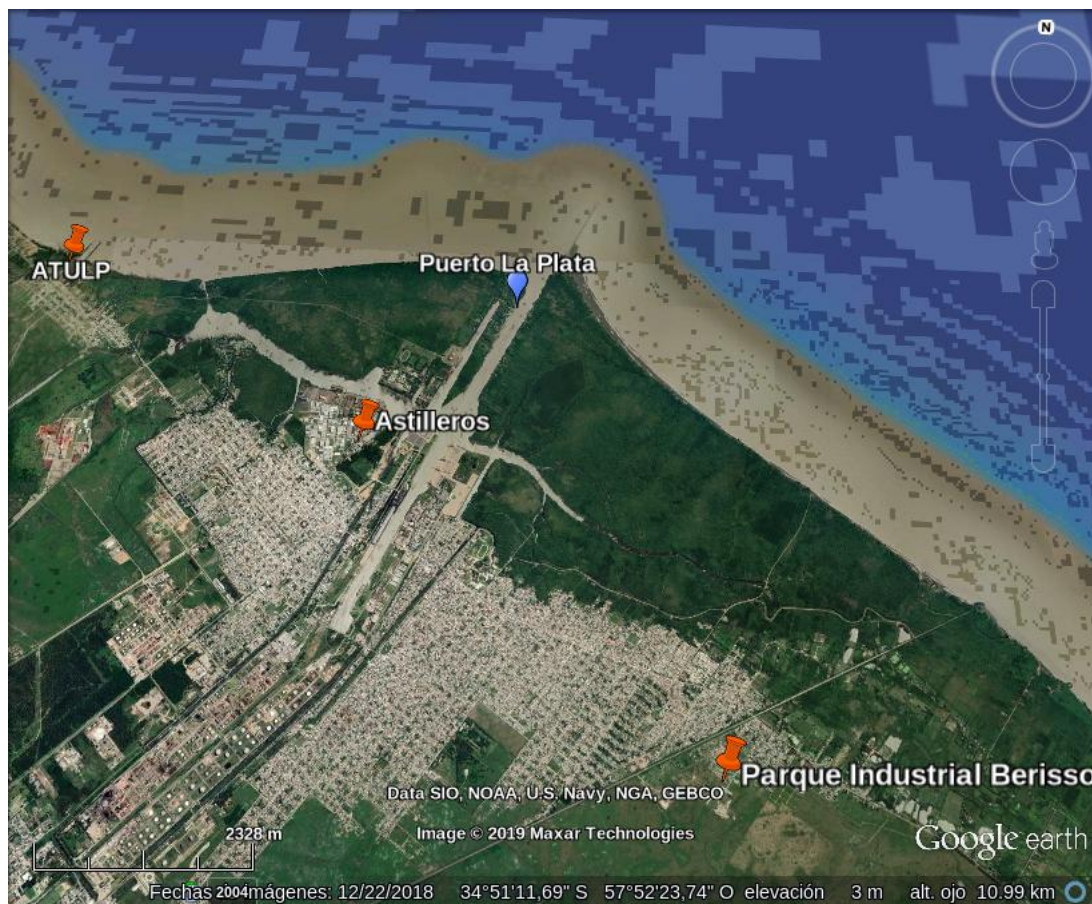


Figura 1.6. Imagen satelital (*extraída de Google Earth*) con la ubicación de las locaciones de monitoreo ubicadas en la planicie costera de la región del Gran La Plata (ATULP, Parque Industrial Berisso y Astillero). Se incluye además la ubicación del mareógrafo del Puerto La Plata.

Pozo	Locación	Acuífero	Período de adquisición de datos (año/mes/día)	Muestreo (minutos)
ATULP-F	ATULP	Postpampeano	2015/12/23-2016/04/06	60
ATULP-P	ATULP	Puelche	2015/12/23-2016/04/06	60
AS-F	Astillero	Postpampeano	2015/12/23-2016/04/06	60
AS-P	Astillero	Puelche	2015/12/23-2016/04/06	60
PIB-F	Parque Industrial Berisso	Postpampeano	2015/12/23-2016/04/06	60
PIB-P	Parque Industrial Berisso	Puelche	2015/12/23-2016/04/06	60

Tabla 1.3. Información relativa a los datos piezométricos adquiridos en la planicie costera del Gran La Plata.

1.5. Aportes de este trabajo de Tesis

En esta sección se describen los aportes que realiza el presente trabajo de Tesis, que pueden agruparse en dos campos del conocimiento: las ciencias aplicadas

y las ciencias básicas.

En el campo de las ciencias aplicadas se destaca la utilización los datos provenientes de los proyectos de investigación mencionados para realizar un análisis de la interacción entre agua superficial (Río de La Plata y Riachuelo) y el sistema acuífero costero de la zona (Puelche, Paraná y Postpampeano). A partir de este análisis se puede identificar el tipo de conexión existente entre los acuíferos costeros y los cuerpos de agua superficial. Las señales de marea inducida también brindan información de los parámetros hidráulicos del acuífero. Como se mencionó al momento de presentar las ecuaciones que rigen el fenómeno de marea inducida, la difusividad hidráulica define la relación entre la señal de marea en el río y las fluctuaciones en el acuífero. De esta manera, utilizando las componentes características de marea presentes en los datos mareográficos y piezométricos adquiridos es posible estimar la difusividad hidráulica de los acuíferos de la región. Posteriormente, a partir del coeficiente de almacenamiento específico dado por las propiedades granulométricas del material que conforma el acuífero, se realizan estimaciones de conductividad hidráulica.

Asimismo, se propone una variante del método de marea inducida con el objetivo de poder realizar una estimación de la difusividad hidráulica utilizando datos de 2 pozos de monitoreo y prescindiendo de datos mareográficos. En este caso, se reemplaza la señal de marea del río (condición de borde) por la señal piezométrica del pozo más cercano a la costa. De esta forma, la señal observada en el pozo más alejado de la costa representa la marea inducida. Esta técnica permite independizarse de la medición de la distancia a la costa, que suele ser de difícil realización, así como también evitar la utilización de datos mareográficos, que no siempre son factibles de obtener.

En el campo de las ciencias básicas y con el fin de profundizar el estudio de la marea inducida se generan modelos más complejos que aquellos contemplados en la solución clásica de Jacob-Ferris para un acuífero semi-infinito de espesor constante. El principal aporte consiste en considerar variaciones en el espesor del acuífero para el estudio del fenómeno de marea inducida. Esto constituye una novedad ya que no existen en la bibliografía soluciones analíticas que contemplen esta característica. En primer lugar se deriva una solución analítica para un acuífero cuyo espesor decrece con la distancia a la costa. En segundo lugar se deriva una generalización de la primera solución, permitiendo de esta forma representar acuíferos con un espesor que crece o decrece con la distancia a la costa. Estas nuevas soluciones analíticas cerradas permiten identificar posibles acuíferos y diseñar estrategias para una mejor estimación

de los parámetros hidráulicos.

1.6. Contenidos del trabajo de Tesis

La presente Tesis se ha estructurado en base a seis capítulos. En el Capítulo 1 se ha presentado la introducción general del trabajo. En el Capítulo 2 se presentan dos modelos clásicos de referencia para describir el fenómeno de marea inducida junto con las respectivas soluciones analíticas. En estos dos modelos se contemplan distintos tipos de interacción río-acuífero. El modelo de Jacob-Ferris para un acuífero semi-infinito conectado hidráulicamente al cuerpo de agua superficial y el modelo puramente mecánico de van der Kamp. En este Capítulo también se estiman los parámetros de almacenamiento específico y eficiencia de carga para las formaciones con las que se trabaja.

En el Capítulo 3 se realiza una recopilación de los datos obtenidos en las zonas de estudio. Se analizan cualitativamente las señales y se muestran fenómenos extremos, como por ejemplo Sudestadas o bajantes históricas. En este Capítulo se analiza el tipo de interacción que existe entre los acuíferos costeros y los cuerpos de agua superficial como el Río de La Plata y el Riachuelo.

En el Capítulo 4 se muestran aplicaciones del método de marea inducida utilizando las soluciones clásicas presentadas en el Capítulo 2 para estimar la difusividad hidráulica y posteriormente la conductividad hidráulica de los acuíferos costeros de la región. También se presenta una variante del método de marea inducida en la que se propone la utilización de 2 pozos para la estimación de parámetros hidráulicos prescindiendo de los datos mareográficos y de la medición de la distancia a la costa.

En el Capítulo 5 se derivan dos nuevas soluciones analíticas para el fenómeno de marea inducida. Estas soluciones se obtienen para acuíferos cuyo espesor varía con la distancia a la costa. En primer lugar se deriva una solución para un acuífero con forma de cuña cuyo espesor decrece cuadráticamente con la línea de costa y su longitud es variable. Luego se deriva una solución que constituye una generalización de la primera, permitiendo representar acuíferos cuyo espesor puede crecer o decrecer con la distancia a la línea de costa. De esta forma se puede obtener una gran variedad de geometrías a modelar y extraer importantes conclusiones que resultan útiles a la hora de evaluar el comportamiento hidráulico de acuíferos costeros.

Finalmente, en el Capítulo 6 se sintetizan las conclusiones más importantes que surgen de la realización de este trabajo de Tesis.

Capítulo 2

Modelos Analíticos Clásicos

En este Capítulo se presentan dos modelos de referencia para describir el fenómeno de marea inducida y sus correspondientes soluciones analíticas. En primer lugar, se presenta el modelo de Jacob-Ferris (Jacob, 1950; Ferris, 1951) válido para un acuífero semi-infinito conectado hidráulicamente al cuerpo de agua superficial. Estos autores resultan pioneros en el estudio del fenómeno de marea inducida. En segunda instancia se presenta un modelo de interacción mecánica entre el acuífero y el río/océano y la correspondiente solución analítica derivada por van der Kamp (1972). A partir de las soluciones analíticas derivadas se analiza el efecto que tiene la conductividad hidráulica del acuífero y la frecuencia de la marea en la marea inducida. Luego se obtienen expresiones que permiten estimar la difusividad hidráulica a partir de la atenuación y desfase de la marea inducida utilizando las soluciones clásicas. Por último, se presentan los coeficientes de almacenamiento específico y de eficiencia de carga para los acuíferos de la región. De esta manera, a partir de los coeficientes de almacenamiento específico y eficiencia de carga y de las expresiones que permiten estimar la difusividad hidráulica se pueden obtener estimaciones de la conductividad hidráulica.

2.1. Modelo con conexión hidráulica

El fenómeno de marea inducida comienza a estudiarse a mediados del siglo XX a partir de los trabajos de Jacob (1950) y Ferris (1951). Estos autores estudiaron, de manera independiente, la interacción hidráulica entre un acuífero costero y el mar. Considerando un acuífero homogéneo en sus propiedades hidráulicas y proponiendo adecuadas condiciones de borde, Jacob y Ferris derivaron una solución analítica que permite predecir la fluctuación de altura hidráulica como respuesta a la señal de marea. En la Fig. (2.1) se ilustra el mo-

delo conceptual utilizado por Jacob y Ferris para la derivación de la solución analítica.

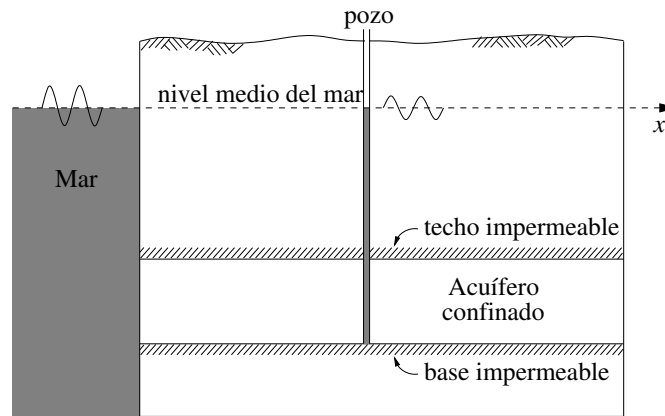


Figura 2.1. Representación esquemática de un acuífero costero semi-infinito 1D.

Jacob resolvió la ecuación general de flujo unidimensional presentada en la Introducción (Ec. 1.3) utilizando las siguientes condiciones de borde:

$$h(0, t) = A \cos(\omega t), \quad (2.1)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad (2.2)$$

siendo $h(0, t)$ la altura piezométrica en la costa ($x = 0$), A su amplitud y ω su frecuencia angular. Notar que la condición impuesta por la Ec. (2.2) establece que el flujo debe anularse para $x \rightarrow \infty$.

La solución del problema diferencial dado por las Ecs. (1.3), (2.1) y (2.2) viene dada por (Jacob, 1950):

$$h(x, t) = A e^{-ax} \cos(\omega t - ax), \quad (2.3)$$

siendo a el parámetro de propagación de marea, cuya expresión es:

$$a = \sqrt{\frac{\omega S_s}{2K_s}}. \quad (2.4)$$

El parámetro a [L^{-1}] depende tanto de las propiedades hidráulicas del medio como de la frecuencia angular de la condición de borde, parámetros que en su conjunto definen por completo la solución para el problema planteado. La longitud característica es un coeficiente que se desprende del parámetro de propagación de marea y se define como $L_c = a^{-1}$ [L]. Este parámetro mide, en cierto modo, la región del acuífero afectada por la marea ya que para $x = L_c$ la

amplitud se reduce a A/e , es decir aproximadamente a un tercio de la amplitud en la marea.

Comparando la solución (2.3) y la condición de borde dada por (2.1), podemos observar dos efectos: (a) un decaimiento exponencial de la amplitud de $h(x, t)$ con la distancia x a la línea de costa, de la forma e^{-ax} y (b) un desfase o retraso temporal de la solución con respecto a la distancia x a la línea de costa, que aumenta de manera lineal, de la forma $-ax/w$.

Para analizar la solución se definen los parámetros de coeficiente de amplitud y desfase temporal. El coeficiente de amplitud $c(x)$ se define como el cociente entre la amplitud de la marea inducida en el acuífero y la amplitud de la marea:

$$c(x) = \frac{Ae^{-ax}}{A} = e^{-ax} \quad (2.5)$$

El coeficiente de desfase temporal $\tau(x)$ representa el desfase temporal entre la marea inducida en el acuífero y la marea:

$$\tau(x) = \frac{-ax}{\omega} \quad (2.6)$$

También puede definirse el desfase entre la marea inducida y la marea oceánica como $\Delta\phi = -ax$.

En la Fig. (2.2) se ilustran curvas de caída de amplitud y desfase temporal predichas por el modelo de Jacob-Ferris para distintos valores de conductividad hidráulica K_s . Para generar las curvas se utilizó $A = 1$ m y $\omega = 2\pi/(12.4/24)$ d^{-1} (marea semi-diurna). Para el almacenamiento específico se consideró $S_s = 10^{-3}$ m^{-1} . Como se puede observar en la figura, cuanto mayor es

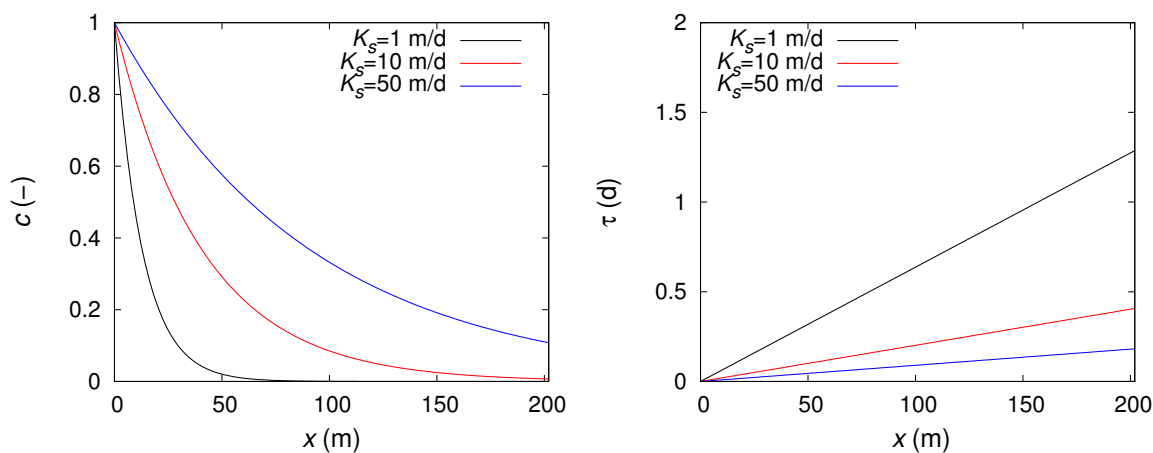


Figura 2.2. Coeficiente de amplitud c y desfase temporal τ generados por una marea semi-diurna de componente M2

la conductividad hidráulica, menores son los valores de la pérdida de amplitud y el desfase. Esto implica que mayores valores de conductividad permiten mayor penetración de la señal de marea y con mayor velocidad. En las Figs. (2.3) y (2.4) se ilustran las caídas de amplitud y desfase temporal considerando una marea de componente M4 y O1 respectivamente. Los coeficientes $c(x)$ y $\tau(x)$

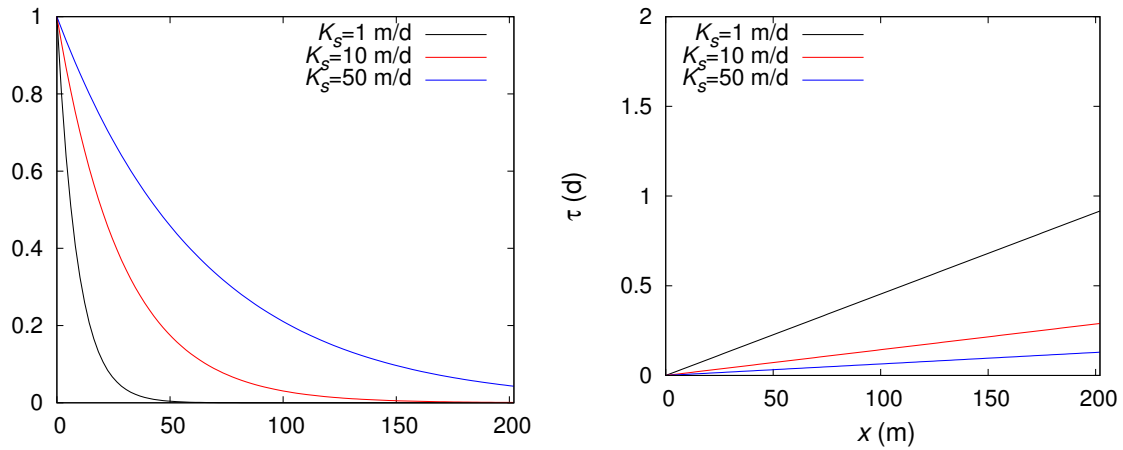


Figura 2.3. Coeficiente de amplitud c y desfase temporal τ generados por una marea compuesta de componente M4 en función de la distancia a la línea de costa para un acuífero homogéneo considerando 3 valores diferentes de conductividad hidráulica.

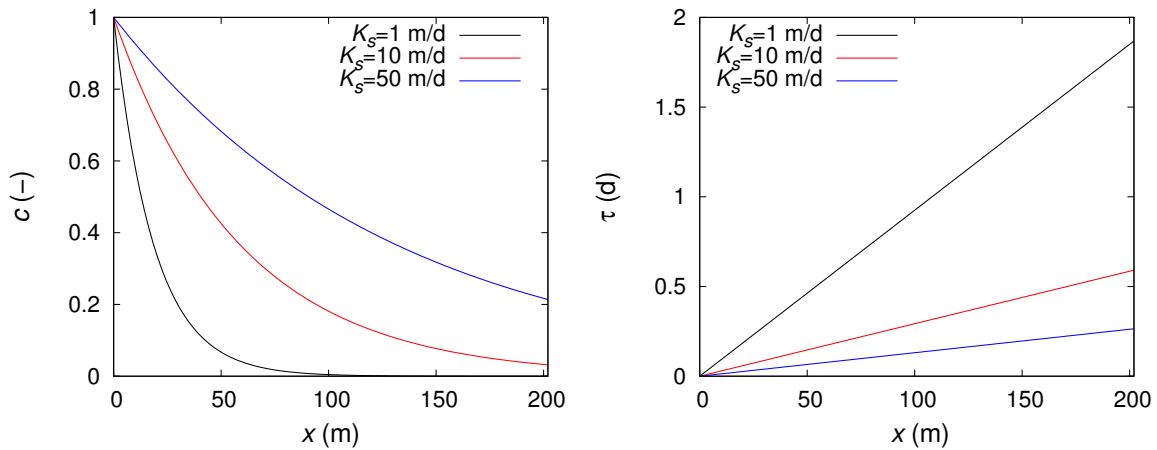


Figura 2.4. Coeficiente de amplitud c y desfase temporal τ generados por una marea diurna de componente O1 en función de la distancia a la línea de costa para un acuífero homogéneo considerando 3 valores diferentes de conductividad hidráulica.

producidos por la marea de componente M2 presentan un comportamiento intermedio entre las caídas de amplitud y desfases graficados en las Figs. (2.3) y (2.4) para mareas de componente M4 y O1 respectivamente. La frecuencia juega

un rol importante en las características que presenta la marea inducida. Para un determinado valor de conductividad hidráulica, cuanto mayor es la frecuencia de la marea, menor es la penetración de la misma. Puede observarse que, para el caso de la componente O1 (Fig. 2.4), los valores de amplitud son mayores que para los otros dos ejemplos. En cuanto a los desfases temporales, a mayores frecuencias se obtienen menores desfases temporales.

La solución obtenida por Jacob suele utilizarse para determinar la difusividad hidráulica del acuífero. Conociendo la señal de marea del cuerpo de agua superficial y midiendo la fluctuación de altura piezométrica en un pozo cercano a la costa se puede estimar la difusividad hidráulica del acuífero utilizando la caída de amplitud de la marea inducida o su desfase, como se verá en la sección 2.3.

2.2. Modelo con conexión mecánica

En el caso de que el acuífero se prolongue por debajo de un cuerpo de agua superficial y se encuentre confinado por una capa de baja permeabilidad, la marea inducida tendrá un origen mecánico. En ese caso, la marea produce variaciones de presión de agua que comprime y descomprime la formación, deformando elásticamente la matriz e induciendo una onda. van der Kamp (1972) derivó una solución analítica para un acuífero confinado que se prolonga por debajo de un cuerpo de agua superficial. En la Fig. (2.5) se ilustra un esquema del modelo propuesto por este autor. Notar que la línea de costa corresponde a $x = 0$.

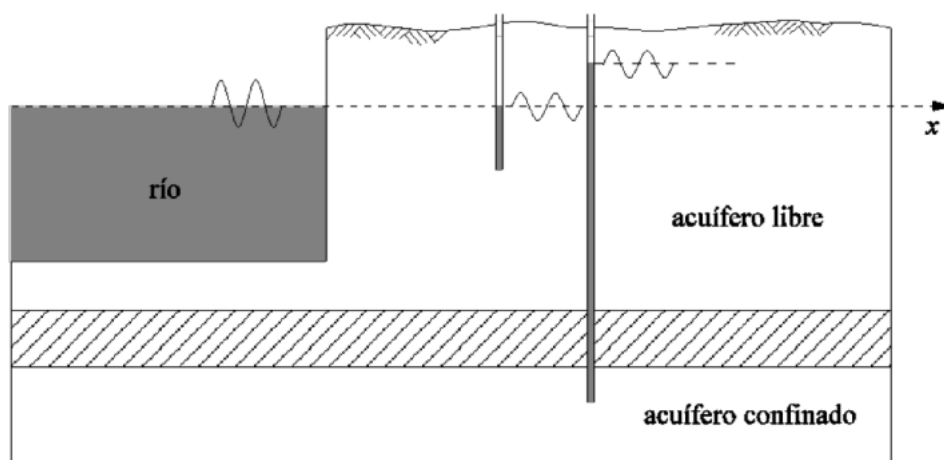


Figura 2.5. Representación esquemática de un acuífero costero confinado que se prolonga por debajo del río/mar. Para completar la imagen se ilustra un acuífero costero con conexión hidráulica.

van der Kamp (1972) resolvió el sistema de ecuaciones (1.6)-(1.10) utilizando una señal de marea $m(t) = A\cos(\omega t)$ para calcular el término fuente-sumidero $S_s L_e dm/dt$ en la Ec. (1.7). La solución obtenida en este caso tiene la siguiente expresión:

$$h(x, t) = \frac{L_e}{2} A e^{-ax} \cos(\omega t - ax). \quad (2.7)$$

Comparando la solución (2.7) y la condición de borde se observa: (a) un decaimiento exponencial de la amplitud de $h(x, t)$ con la distancia x a la línea de costa, de la forma $\frac{L_e}{2} e^{-ax}$, y (b) un desfase o retraso temporal de la solución con respecto a la distancia x a la línea de costa que aumenta linealmente, de la forma $-ax/\omega$.

El coeficiente de amplitud $c_m(x)$ y el desfase temporal $\tau_m(x)$ para el caso de conexión mecánica quedan definidas de la siguiente forma:

$$c_m(x) = \frac{L_e}{2} e^{-ax}, \quad (2.8)$$

$$\tau_m(x) = \frac{-ax}{\omega}. \quad (2.9)$$

Como veremos en la siguiente sección, L_e es aproximadamente 1, por lo que el coeficiente de amplitud para el caso de conexión mecánica se reduce casi a la mitad si se la compara con el caso de interacción hidráulica. Por el contrario, el desfase temporal para el caso de conexión mecánica es idéntico al que se obtiene para interacción hidráulica. Estas similitudes pueden conducir a graves errores en la interpretación de los datos observados.

2.3. Estimación de los parámetros hidráulicos

En esta sección se presentan las expresiones que permiten la estimación de la difusividad hidráulica en acuíferos costeros utilizando las soluciones analíticas clásicas presentadas en la sección anterior. A partir de las expresiones que definen la caída de amplitud y el desfase temporal de la marea inducida tanto para conexión hidráulica [Ecs. (2.5) y (2.6)] como para conexión mecánica [Ecs. (2.8) y (2.9)] es posible determinar la difusividad hidráulica. Estas expresiones se obtienen reemplazando la Ec. (2.4) en las expresiones de caída de amplitud y desfase mencionadas, teniendo en cuenta que $D = K_s/S_s$.

Para el caso de conexión hidráulica, las estimaciones de difusividad hidráulica mediante atenuación y fase pueden expresarse de la siguiente forma:

$$D_{amp}(x) = \frac{\omega x^2}{2\ln^2[c(x)]}, \quad (2.10)$$

$$D_{\phi}(x) = \frac{\omega x^2}{2\Delta\phi^2(x)}, \quad (2.11)$$

donde $\Delta\phi(x) = \omega\tau(x)$ representa el desfase de la marea inducida y está vinculado al desfase temporal a través de la frecuencia angular ω .

Para el caso de conexión mecánica las expresiones que permiten estimar la difusividad hidráulica pueden expresarse de la siguiente forma:

$$D_{amp}(x) = \frac{\omega x^2}{2\ln^2[2c_m(x)/L_e]}, \quad (2.12)$$

$$D_{\phi}(x) = \frac{\omega x^2}{2\Delta\phi^2(x)}. \quad (2.13)$$

Notar que las expresiones que permiten estimar la difusividad hidráulica mediante atenuación para el modelo hidráulico (Ec. 2.10) y para el modelo mecánico (Ec. 2.12) se diferencian en el argumento del logaritmo natural, en donde para el caso mecánico el cociente de amplitudes entre la marea inducida y la marea presenta el factor $2/L_e$. En cuanto a las expresiones que permiten estimar la difusividad hidráulica mediante desfase, las Ecs. (2.11) y (2.13) son idénticas.

Las expresiones presentadas se obtienen de las soluciones analíticas, por lo que si un acuífero costero cumple las hipótesis consideradas para cada modelo no existirían diferencias entre los valores de difusividad hidráulica obtenidos mediante atenuación y desfase. Claro está que, al trabajar con datos reales, estas hipótesis no siempre se cumplen. Con el objetivo de obtener un indicador del grado de heterogeneidad del acuífero, Trefry y Bekele (2004) definieron un parámetro que cuantifica las inconsistencias que se obtienen al estimar la difusividad hidráulica mediante atenuación y desfase en acuíferos costeros reales. El factor de heterogeneidad de Trefry-Bekele se define de la siguiente forma (Trefry y Bekele, 2004):

$$F_{T-B} = \sqrt{\frac{D_{amp}}{D_{\phi}}} \quad (2.14)$$

Si el factor de heterogeneidad es igual a 1 significa que el modelo propuesto representa perfectamente los datos. Valores del factor de heterogeneidad alejados de la unidad resultan un indicador de heterogeneidades en el modelo de acuífero. Estas heterogeneidades pueden tener su origen en variaciones del espesor del

acuífero, conexión hidráulica entre el acuífero y las formaciones que lo confinan, variaciones espaciales en las propiedades hidráulicas del acuífero o errores en las observaciones. Basados en el análisis de distintos grupos de datos, Trefry y Bekele (2004) obtuvieron valores del factor de heterogeneidad en el rango entre 0.3 y 2.1.

Las expresiones (2.10)-(2.14) serán utilizadas en el Capítulo 4 para evaluar la difusividad hidráulica de los acuíferos de la región. Si bien esta técnica permite estimar la difusividad hidráulica, los acuíferos suelen caracterizarse en términos de la conductividad hidráulica. Como $D = K_s/S_s$, si se cuenta con un valor de almacenamiento específico S_s se puede estimar el valor de conductividad hidráulica K_s . Lamentablemente, los valores de almacenamiento específico S_s son difíciles de medir pero pueden estimarse a partir de fórmulas que dependen de los parámetros elásticos de la formación. Para el caso de acuíferos que presenten una conexión mecánica con el río es necesario también conocer el valor de la eficiencia de carga L_e .

El factor eficiencia de carga L_e y el almacenamiento específico S_s dependen de la compresibilidad de la formación k , la compresibilidad del agua que la satura k_f y de la porosidad n . Sus expresiones son teóricas y se derivan a partir de conceptos poroelásticos (van der Kamp y Gale, 1983):

$$L_e = \frac{1/k}{1/k + n/k_f}, \quad (2.15)$$

$$S_s = \rho g \left[\frac{1}{k} + n \frac{1}{k_f} \right], \quad (2.16)$$

siendo ρ es la densidad del agua y g la aceleración de la gravedad.

En la Tabla (2.1) se listan los valores de L_e y S_s calculados para las formaciones Postpampeano, Puelche y Paraná a partir de los valores de porosidad tomados del Atlas Ambiental de Buenos Aires y los módulos elásticos determinados por Lo *et al.* (2007) para distintas texturas de suelo. Cabe destacar que para el acuífero superficial constituido por los sedimentos Postpampeanos se ha realizado un cálculo considerando la granulometría predominante en la cuenca Matanza-Riachuelo y otro cálculo considerando la granulometría predominante en la planicie costera del Gran La Plata.

Acuífero	k [Mpa]	k_f [Gpa]	n	L_e	S_s [m^{-1}]
Postpampeano-CMR	23.8	2.25	0.3	—	$4.1 \cdot 10^{-4}$
Postpampeano-GLP	25.4	2.25	0.3	—	$3.84 \cdot 10^{-4}$
Puelche	35.3	2.25	0.2	0.99687	$2.76 \cdot 10^{-4}$
Paraná	29.9	2.25	0.2	0.99735	$3.26 \cdot 10^{-4}$

Tabla 2.1. Parámetros elásticos de los acuíferos costeros de la región.

De esta forma, a partir de los valores de eficiencia de carga y almacenamiento específico obtenidos pueden realizarse estimaciones de conductividad hidráulica utilizando la técnica de marea inducida.

Capítulo 3

Medición de Marea Inducida

En este Capítulo se realiza una síntesis de los datos mareográficos y piezométricos obtenidos en el marco de los Proyectos de Investigación “Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo” (ACUMAR, CIC) y “Dinámica del Acuífero Puelche en la Planicie Costera del Río de La Plata” (CONICET-YPF). Estos datos serán utilizados para evaluar la interacción hidráulica entre los acuíferos costeros de la región y el Río de La Plata y para realizar estimaciones de parámetros hidráulicos (Capítulo 4).

El objetivo de este Capítulo es realizar un análisis cualitativo de los datos, mostrar eventos extremos, como Sudestadas y bajantes históricas del Río de La Plata que han sido documentados en medios periodísticos de alcance nacional y finalmente identificar el tipo de interacción existente entre los acuíferos costeros de la región y los cuerpos de agua superficial como el Río de La Plata y el Riachuelo. Para facilitar la lectura, primero se presentan y analizan los datos correspondientes a la cuenca Matanza-Riachuelo y luego los correspondientes a la región del Gran La Plata.

3.1. Cuenca Matanza-Riachuelo

3.1.1. Datos mareográficos

Para utilizar el método de marea inducida resulta necesario conocer las variaciones de nivel del río en la costa donde se tienen los pozos de monitoreo. Lamentablemente, no siempre es posible contar con una estación mareográfica en la zona donde están ubicados los pozos, por lo que en estos casos se suele extrapolar la señal de marea de la estación más próxima a la zona de estudio. La estación mareográfica más cercana a las locaciones donde se tienen datos piezométricos es la correspondiente al Puerto de Buenos Aires, ubicada frente

al Aeroparque J. Newbery (ver Fig. 1.4 de la Introducción). Los datos mareográficos de esta estación y de la estación San Fernando fueron provistos por el Servicio de Hidrografía Naval del Ministerio de Defensa de la Nación. El mareógrafo del Puerto de Buenos Aires es tomado como referencia para el estudio de mareas y sus valores son extrapolados para contar con señales de variación de niveles de agua superficial en cada una de las locaciones. Con el fin de estimar la velocidad de propagación de marea en el río, se solicitaron también los datos de la estación mareográfica de San Fernando, ubicada en el Espigón del Yatch Club Argentino sobre el Río Luján (ver Fig. 1.4 en la Introducción). En la Tabla (3.1) se detallan los períodos que abarcan las series temporales y la frecuencia de medición.

Estación	Período	Frecuencia
Puerto de Bs. As.	01/02/2014-30/06/2015	Horaria
San Fernando	01/02/2014-31/03/2014	Horaria

Tabla 3.1. Serie de datos mareográficos correspondientes a las estaciones Puerto de Buenos Aires y San Fernando.

En la Fig. (3.1) se ilustra la serie completa de alturas mareográficas para la estación Puerto de Buenos Aires, expresadas en cm. En la figura se puede notar la existencia de eventos extremos como Sudestadas y bajantes significativas, que tienen un origen meteorológico. Las Sudestadas son la manifestación de persistentes vientos del sudeste, usualmente acompañados de fuertes lluvias, que producen un aumento en el nivel del Río de La Plata en la costa (Escobar *et al.*, 2004). Por otro lado, los vientos del noroeste producen el efecto contrario, generando bajantes en cercanías de la costa. Estos fenómenos extremos pueden tener una duración de algunos días y afectan severamente los asentamientos costeros produciendo inundaciones e interrupciones en el servicio de abastecimiento de agua potable de la región. Los valores máximo y mínimo del nivel de agua en el río para toda la serie son 321 cm y -230 cm respectivamente, lo que implica una amplitud de variación máxima de 551 cm. Con el objetivo de visualizar más claramente los eventos extremos descritos, se grafican intervalos pequeños de la serie mareográfica. En la Fig. (3.2) (a) se muestra una bajante histórica ocurrida el 7 de julio de 2014 que tuvo una duración aproximada de 24 horas. Este evento fue noticia periodística en los principales medios del país porque la disminución de presión de agua causó una interrupción en el suministro de agua de la Capital Federal y el Conurbano. En la Fig. (3.2) (b) se ilustra una Sudestada ocurrida en enero del 2015. Este fenómeno tuvo una duración de aproximadamente dos

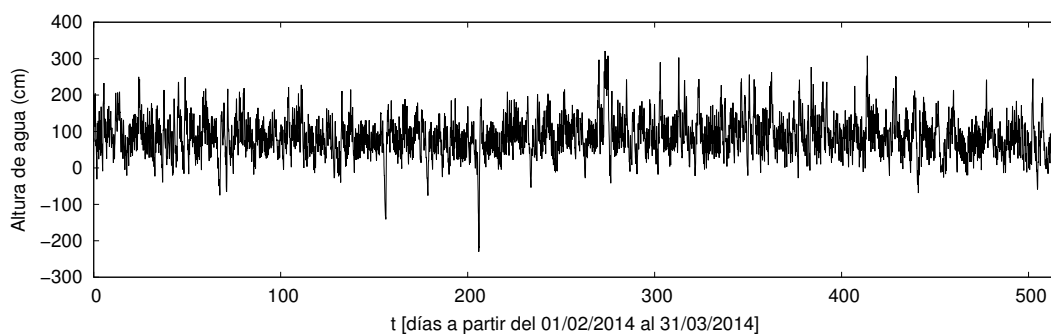


Figura 3.1. Serie de datos mareográficos de la estación Puerto de Buenos Aires.

días. Estos fenómenos de marea meteorológica son propios de la región y están generados por anomalías en la circulación de la baja atmósfera y por la propia geometría del Río de La Plata (Escobar *et al.*, 2004; Pizarro *et al.*, 2007).

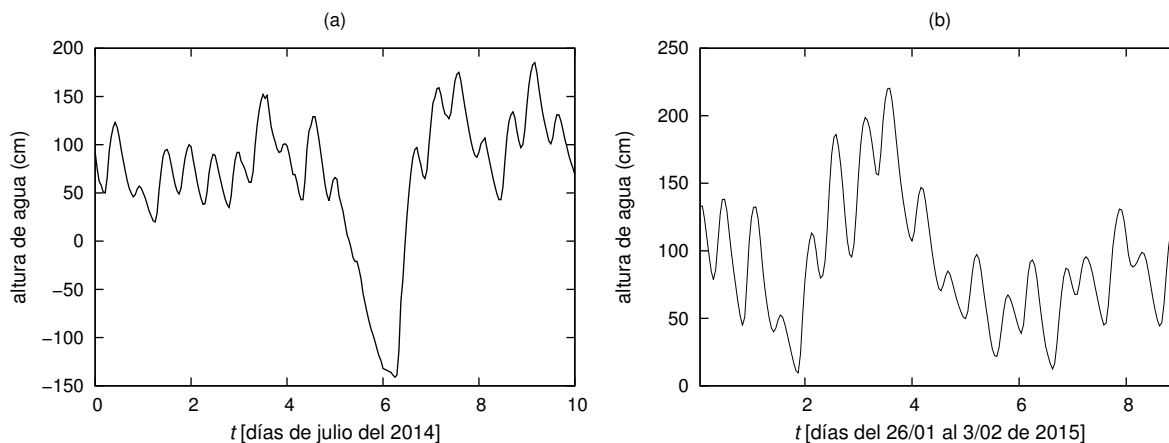


Figura 3.2. (a) Bajante del Río de La Plata ocurrida el 7 de julio de 2014 y (b) Fenómeno de Sudestada que tuvo lugar a finales de enero de 2015.

En los ejemplos de marea meteorológica de la Fig. (3.2) puede observarse la fuerte componente semi-diurna que posee la señal mareográfica en el Río de La Plata. Para una mejor descripción de las componentes predominantes en la marea del Río de La Plata se calcula el espectro de amplitud de toda la señal mediante un algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (Nussbaumer, 1981). La Fig. (3.3) ilustra el espectro de amplitud de la señal mareográfica del Puerto de Buenos Aires en función del período ($\omega = 2\pi/T$). El eje de las abscisas que corresponde al período expresado en días está en escala logarítmica con el objetivo de tener una mejor visualización de la información que brinda el espectro. La preponderancia de las componentes M2, N2, S2, M4, K1 y O1 observadas en la Fig. (3.3) se condice con las observaciones efectuadas por D'Onofrio *et al.* (1999) y D'Onofrio *et al.* (2012) para el Río de La Plata. En la Tabla (1.1)

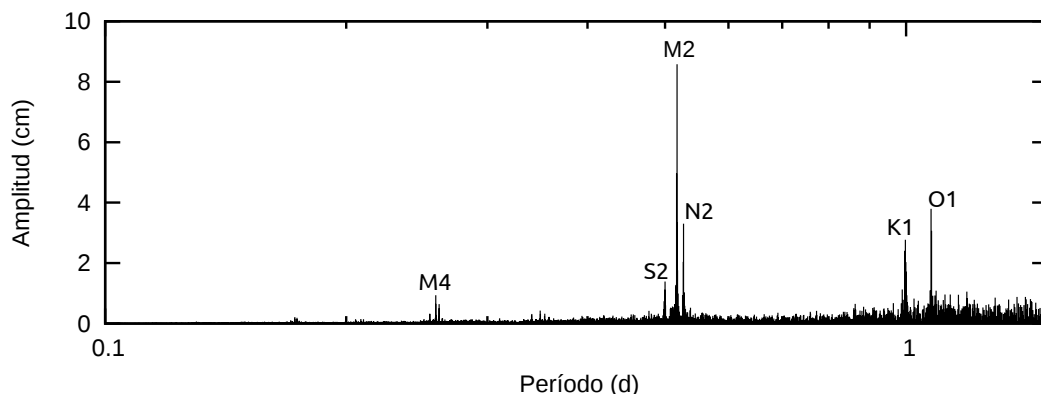


Figura 3.3. Espectro de amplitud de la señal mareográfica correspondiente a la estación Puerto de Buenos Aires.

incluida en el Capítulo 1 (Introducción) se listan estas mismas componentes con sus correspondientes períodos y descripción.

La Fig. (3.4) ilustra la serie mareográfica correspondiente a la estación de San Fernando para el período febrero-marzo de 2014. En este caso, la serie no posee valores negativos, evidenciando una mayor altura del nivel del río en relación a la estación del Puerto de Buenos Aires. Esta serie fue utilizada para correlacionar las alturas de ambas estaciones y determinar la velocidad de propagación de la onda de marea en el Río de La Plata.

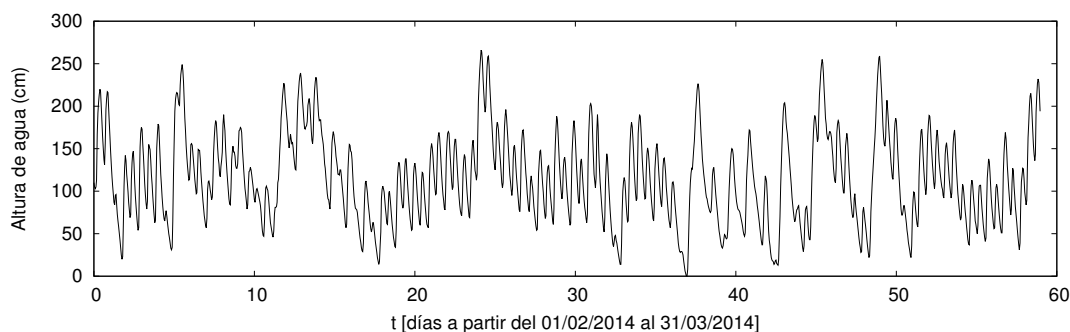


Figura 3.4. Serie de datos mareográficos de la estación San Fernando.

Mediante el método de prueba y error se obtuvo que la mejor correlación entre las series mareográficas de las estaciones San Fernando y Puerto de Buenos Aires ocurre al retrasar una hora la señal de marea medida San Fernando. La Fig. (3.5) ilustra el crossplot de las series junto con un ajuste de tipo lineal. La pendiente de la recta de ajuste es aproximadamente 1, lo que indica que prácticamente no existe pérdida de amplitud en la señal de marea. Por otra parte, la ordenada al origen indica la diferencia en la altura media del río entre ambas estaciones (-25,7 cm). El coeficiente de correlación es de 0.993, lo que indica una muy buena asociación lineal entre ambas señales mareográficas. Considerando que la

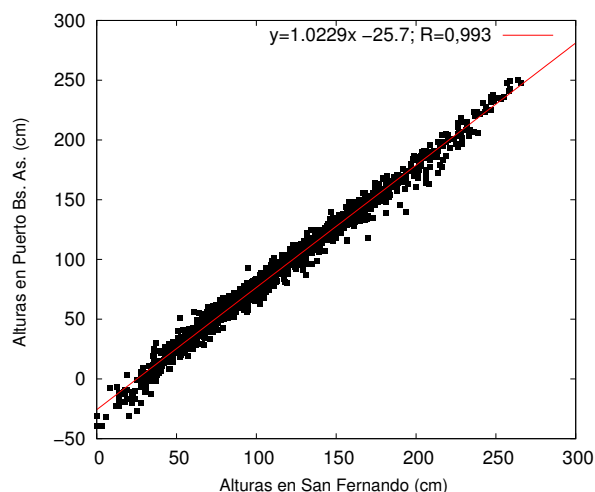


Figura 3.5. Crossplot y ajuste lineal considerando un desfase temporal de 1 hora entre ambas estaciones mareográficas.

distancia entre las estaciones mareográficas es de aproximadamente 20 Km y que el desfase entre ambas señales es de 1 hora, la velocidad de propagación de la onda de marea puede estimarse entonces en 20 Km/h. Esta estimación de la velocidad nos permite calcular el desfase temporal que debemos aplicar a la serie de datos de Puerto de Buenos Aires para referirlas a las distintas locaciones. En la Tabla (3.2) se listan las distancias y desfases entre distintas locaciones, que serán utilizadas para estimar la marea donde se encuentran los pozos de monitoreo.

Locaciones	Distancia [Km]	Desfase (min)
Buenos Aires - Dock Sud	10,5	-31,5
Dock Sud - La Noria	17	51
Dock Sud - Avellaneda	7	21
Buenos Aires - Viñedos	14.9	-44.7

Tabla 3.2. Estimación del desfase temporal de la marea en distintas locaciones de la cuenca Matanza-Riachuelo.

En Puente La Noria se cuenta con una serie reducida de datos mareográficos provistos por ACUMAR que fueron utilizados para estimar la caída de amplitud de la señal de marea dentro del río Matanza-Riachuelo. La correlación se realizó entre una serie de marea extrapolada a Dock Sud (desembocadura del Riachuelo) y los datos mareográficos registrados en Puente La Noria.

En la Fig. (3.6) podemos visualizar la señal de variación del Riachuelo en la estación mareográfica correspondiente a la locación Puente La Noria. La serie temporal tiene una longitud de 31 días y un intervalo de muestreo de 10 minutos.

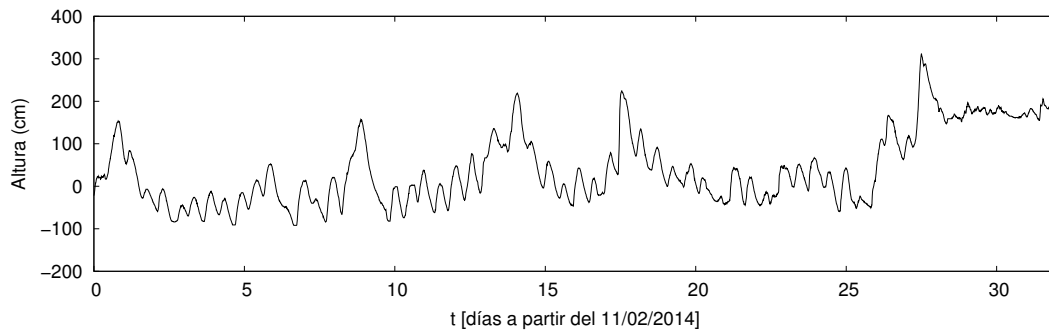


Figura 3.6. Serie mareográfica correspondiente a la locación Puente La Noria.

La Fig. (3.7) muestra el crossplot entre los datos medidos en Puente La Noria y la señal extrapolada a Dock Sud junto con la recta de ajuste entre ambas series. La pendiente de la recta ajustada (0,6465) indica que la amplitud de la marea en la estación Puente La Noria es aproximadamente un 65 % de la amplitud registrada en la desembocadura del Riachuelo (Dock Sud). Teniendo en

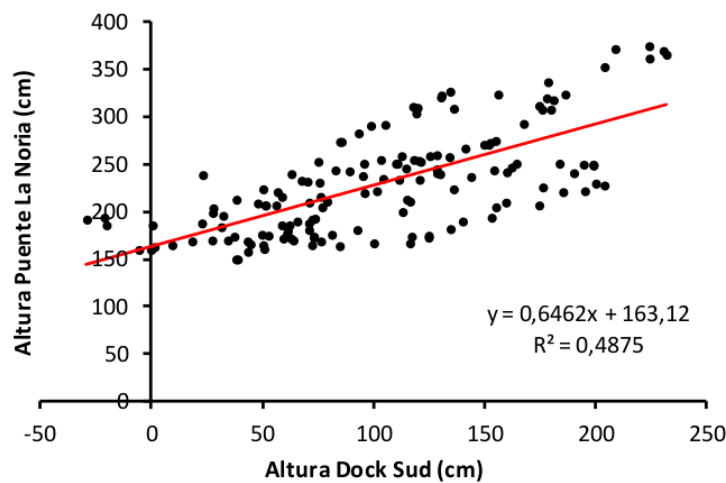


Figura 3.7. Crossplot y ajuste lineal entre la estación mareográfica Puente La Noria y la señal mareográfica extrapolada a Dock Sud.

cuenta que la distancia medida sobre el Riachuelo entre Dock Sud y el Club Regatas de Avellaneda es de 7 Km (Tabla 3.2) podemos estimar la caída de amplitud en esta última locación. Asumiendo que la caída de amplitud dentro del Riachuelo es lineal, la amplitud de la marea en el Club Regatas Avellaneda se estima como aproximadamente el 85 % de la amplitud observada en Dock Sud. Resulta importante remarcar que lo ideal sería contar con estaciones de medición mareográfica a lo largo del río Matanza-Riachuelo para conocer en forma precisa la propagación de la marea que, sin lugar a dudas, estará afectada por

el ancho del río y la morfología de sus costas. En el Club Regatas Avellaneda se realizaron intentos de instalación de boyas mareográficas por parte de ACUMAR. Sin embargo, debido a dificultades propias de la instalación de este tipo de instrumental, no se pudo llevar a cabo la adquisición de señales de variación del Riachuelo en esta locación.

3.1.2. Datos piezométricos

En esta sección se presentan los datos de altura piezométrica referidos a los pozos ubicados en la cuenca Matanza-Riachuelo. Se incluyen gráficos con las series temporales, eventos meteorológicos extremos y un análisis cualitativo de las señales.

La Tabla (3.3) es la misma que se presentó en la introducción (Tabla 1.2) y se repite para facilitar la descripción. En ella se resume la información relativa a los pozos de monitoreo utilizados y el acuífero que perfora cada pozo.

Pozo	Locación	Acuífero	Período de adquisición de datos (año/mes/día)	Muestreo (minutos)
33 F	Club Regatas Avellaneda	Postpampeano	2014/05/15-2015/02/12	10
33 P	Club Regatas Avellaneda	Puelche	2014/05/15-2015/02/12	10
8 A	Viñedos	Paraná	2015/03/11-2015/06/23	10
8 B	Viñedos	Puelche	2015/03/11-2015/06/23	10
8 C	Viñedos	Postpampeano	2015/03/11-2015/06/23	10
8 D	Viñedos	Postpampeano	2015/03/11-2015/06/23	10
37 F	Puente La Noria	Postpampeano	2014/02/11-2014/03/13	10
37 P	Puente La Noria	Puelche	2014/02/11-2014/03/13	10

Tabla 3.3. Información relativa a los datos piezométricos adquiridos en la cuenca Matanza-Riachuelo.

Las señales correspondientes a los pozos 8A, 8B, 8C, 8D, 33F y 33P fueron adquiridas por el autor de esta Tesis y miembros del Proyecto de investigación llevado a cabo por ACUMAR. Para la adquisición se utilizaron sensores de presión denominados “divers”, construidos por la división “Water Services” de la firma Schlumberger. Estos sensores se ubican dentro del pozo y tienen que estar siempre por debajo del nivel de agua. Las variaciones de presión que mide el “diver” se corrigen con la señal de variación de presión atmosférica que registra un “baro-diver” en boca de pozo. De esta forma se obtiene la señal de presión debida a la variación del nivel de agua, que se convierte en fluctuación piezométrica a partir de los parámetros de densidad del agua y gravedad.

En la locación Puente la Noria se dispone de datos de altura piezométrica adquiridos por ACUMAR en dos pozos, 37P y 37F, que perforan el acuífero Puelche y Postpampeano respectivamente. La distancia entre los pozos y el Riachuelo se estimó en 52 m. En la Fig. (3.8) se ilustra la serie temporal de variaciones piezométricas correspondiente al pozo 37F de la locación Puente La Noria. Como

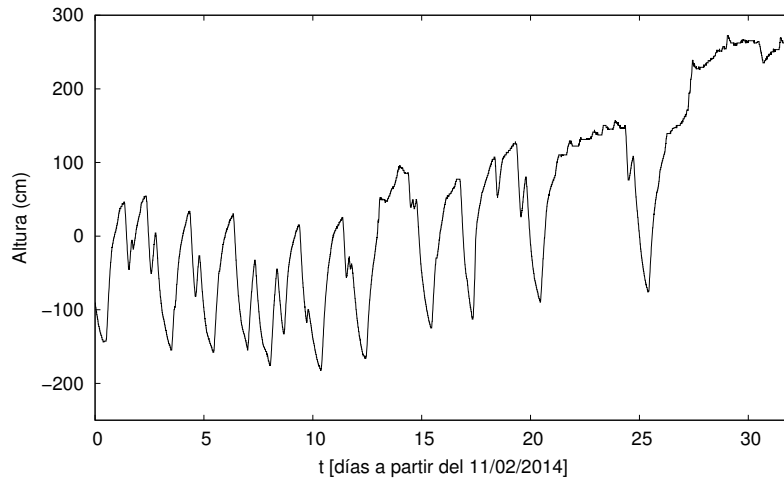


Figura 3.8. Datos de altura hidrúlica del pozo 37F que perfora los sedimentos Postpampeanos en la locación Puente La Noria.

puede observarse, la señal presenta variaciones bruscas en el nivel de agua. Estas variaciones posiblemente se deban a efectos de bombeo. Más allá de las perturbaciones de tipo antrópico que presenta la señal del pozo 37F, a partir del análisis en frecuencia de la señal se puede extraer información relativa a la amplitud y desfase de la marea inducida para determinadas frecuencias. De este modo es factible determinar el grado de conexión hidrúlica entre el acuífero superficial y el Riachuelo, que no llega a manifestarse con claridad analizando las series temporales.

En la Fig. (3.9) se ilustra la serie temporal de variaciones piezométricas correspondiente al pozo 37P de la locación Puente La Noria que perfora las arenas Puelches. Esta señal presenta una mayor similitud con la señal mareográfica medida en esta locación (Fig. 3.6). Ambas señales presentan un patrón temporal similar con una fuerte componente semi-diurna. En este caso el fenómeno de marea inducida es evidente y tiene un origen mecánico ya que la evidencia geológica indica que el acuífero Puelche no está en contacto hidrúlico con el Riachuelo.

En la locación Club Regatas Avellaneda se cuenta con dos pozos. El pozo 33F que perfora los sedimentos Postpampeanos y el 33P que perfora el acuífero Puelche. Las Figs. (3.10) y (3.11) muestran las series temporales correspondientes a

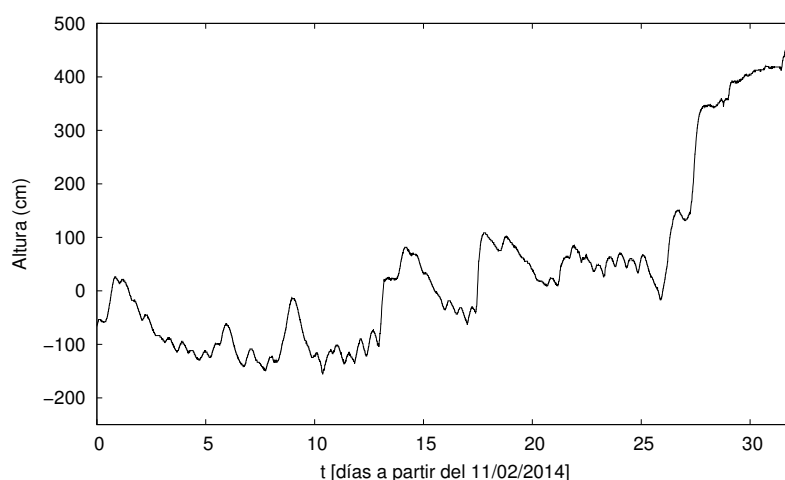


Figura 3.9. Datos de altura piezométrica del pozo 37P que perfora el acuífero Puelche en la locación Puente La Noria.

los pozos 33F y 33P respectivamente. Por simple inspección de las figuras pue-

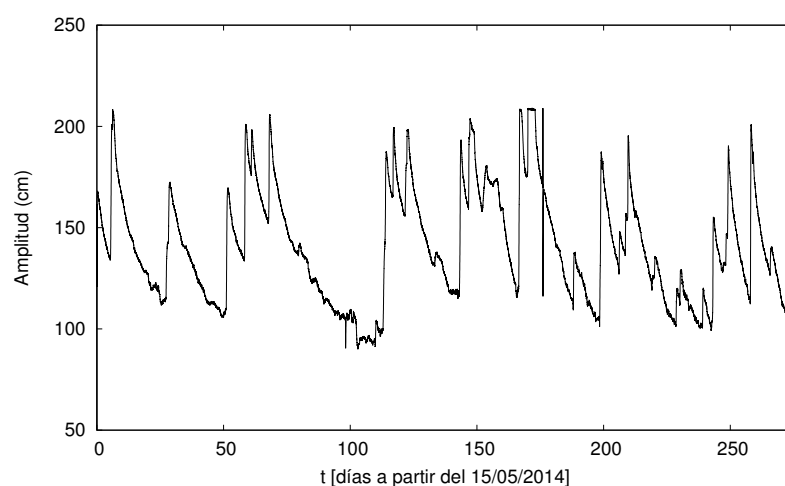


Figura 3.10. Datos de altura hidráulica del pozo 33F que perfora los sedimentos Postpampeanos en la locación Club Regatas Avellaneda.

de identificarse que la señal correspondiente al pozo 33P, que perfora al acuífero Puelche, posee componentes de mayor frecuencia que la señal correspondiente al pozo 33F.

En cuanto a la manifestación de fenómenos extremos, en la Fig. (3.12) se muestra un detalle de las series donde se observan los efectos que produjo la bajante del 7 de julio de 2014 en los pozos de esta locación. Los acuíferos superficial y Puelche se ven afectados de distinta forma. Mientras que el acuífero freático (33F) muestra una clara baja de su nivel de agua para esa época, debido a la conexión hidráulica existente entre los sedimentos Postpampeanos y el Riachuelo, en el acuífero Puelche (33P) se atenúa la oscilación que tiene un

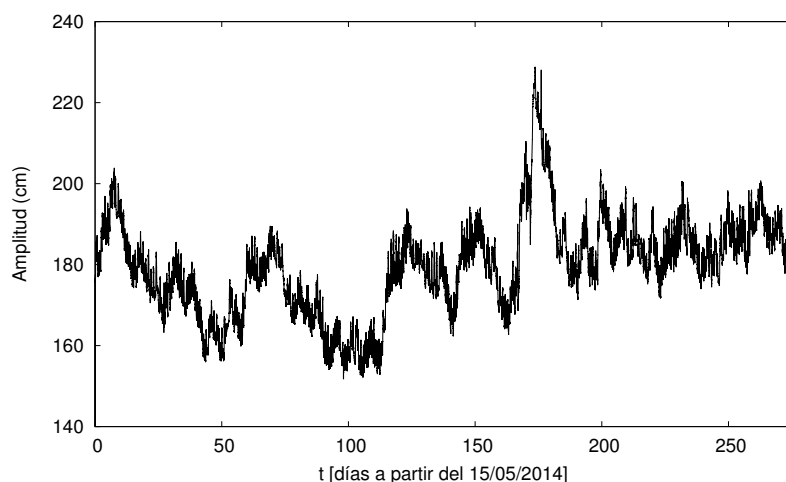


Figura 3.11. Datos de altura piezométrica del pozo 33P que perfora el acuífero Puelche en la locación Club Regatas Avellaneda.

marcado período semi-diurno. Esto es debido a que una disminución en el nivel del Riachuelo produce una menor carga, de manera que se atenúa la marea inducida de origen mecánico. En las señales de los pozos correspondientes a la

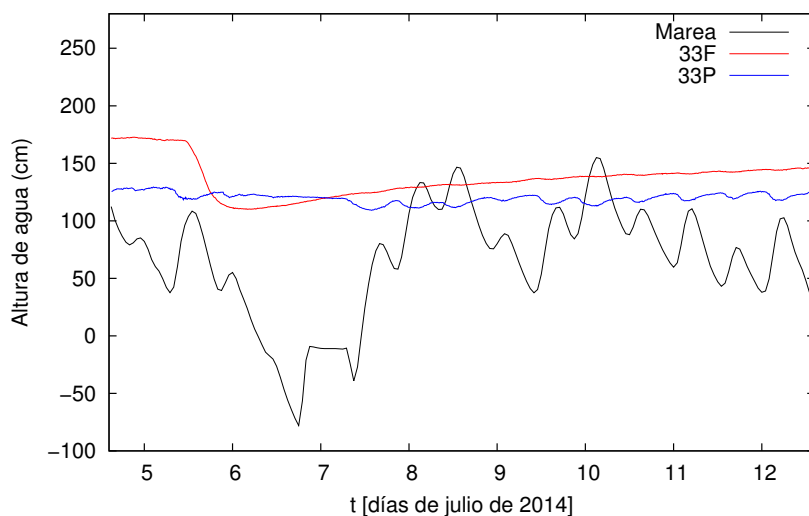


Figura 3.12. Efectos de la bajante ocurrida el 7 de julio de 2014 en el Río de La Plata en la locación Club Regatas Avellaneda.

locación Club Regatas Avellaneda también pueden observarse registros de Sudestadas que fueron documentadas por medios periodísticos. La Fig. (3.13) refleja el efecto que tuvo una crecida del Río de La Plata en enero de 2015. Se observa claramente un ascenso del nivel del Riachuelo y un aumento de la altura de agua del acuífero superficial. El acuífero Puelche también registra un leve aumento en su nivel para esa época. En la Fig. (3.14) se observan otros fenómenos de Sudestada ocurridos a fines de octubre y principios de noviembre de 2014. En

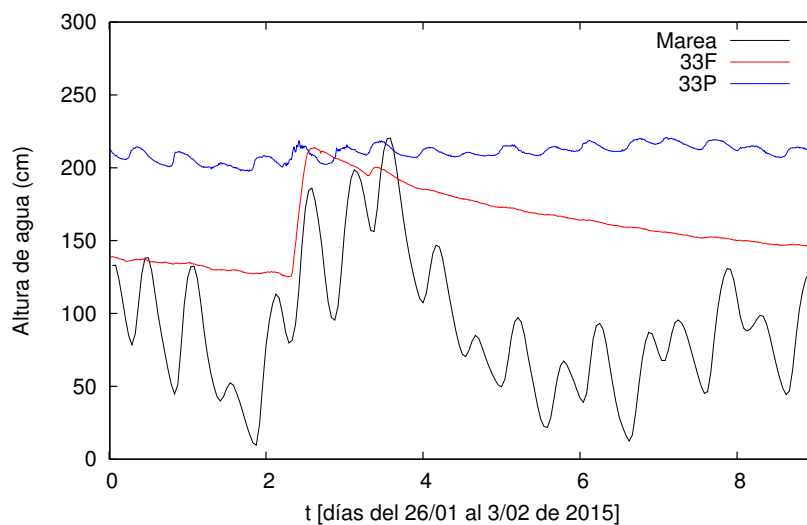


Figura 3.13. Efectos de una Sudestada ocurrida en enero de 2015. El registro de datos corresponde al período 26 de enero - 3 de febrero de 2015. Se incluye la serie mareográfica correspondiente.

este caso el ascenso del nivel del Riachuelo produce una saturación en los niveles de agua medidos por los sensores de presión, generando una “meseta” en las observaciones correspondientes al acuífero Postpampeano. Para este fenómeno de Sudestada, el acuífero Puelche registra un aumento importante en los niveles de agua.

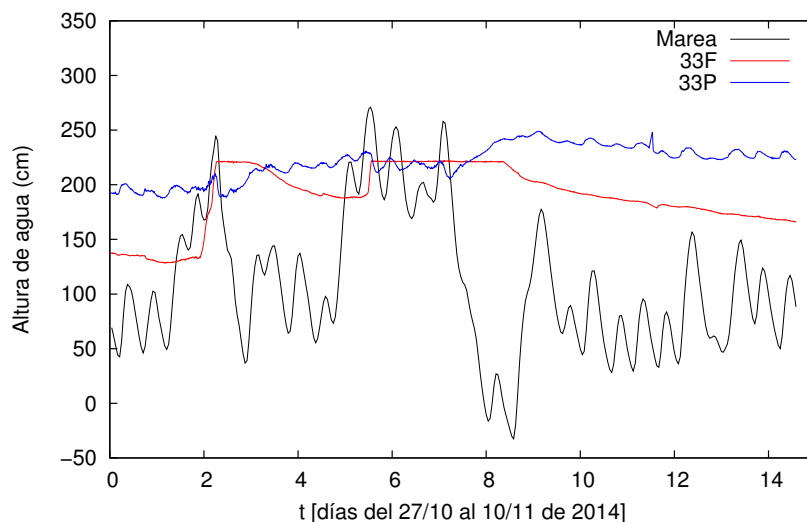


Figura 3.14. Efectos de una Sudestada ocurrida a fines de octubre y principios de noviembre de 2014. El registro de datos corresponde al período 27 de octubre - 10 de noviembre de 2014. Se incluye la serie mareográfica correspondiente.

La locación Viñedos es la más completa ya que cuenta con 4 pozos y fue específicamente diseñada para estudiar la interacción entre los acuíferos costeros

y el Río de La Plata. En la Fig. (3.15) se presenta un esquema de la locación para visualizar las distintas perforaciones y sus correspondientes distancias a la costa. El pozo 8A, que es el más profundo, alcanza la formación Paraná, el

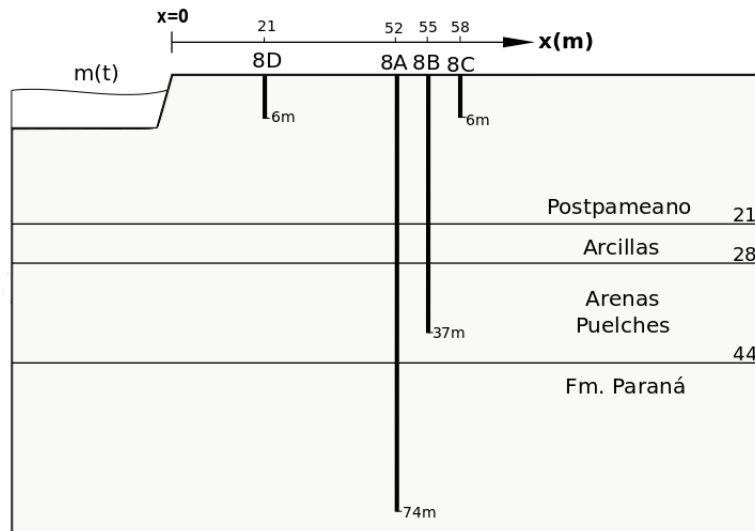


Figura 3.15. Esquema representativo de los pozos en la locación Viñedos incluyendo las distancias a la costa y las profundidades de las perforaciones.

pozo 8B perfora el acuífero Puelche y los pozos 8C y 8D alcanzan los sedimentos Postpampeanos que constituyen el acuífero superficial. En la Fig. (3.16) podemos visualizar la serie completa de datos obtenidos en cada pozo de dicha locación, así como también la serie mareográfica extrapolada a partir de las señales de las estaciones mareográficas de Puerto de Buenos Aires y San Fernando.

Analizando la Fig. (3.16) puede observarse claramente que las señales correspondientes a los pozos 8A y 8B, que perforan los acuíferos Paraná y Puelche respectivamente, presentan una mejor correlación con los datos mareográficos que las señales correspondientes a los pozos 8C y 8D. A partir del análisis de las señales de marea, resulta clara la conexión existente entre los acuíferos profundos y el Río de La Plata. Esta conexión tiene un origen mecánico ya que el Río de La Plata y los acuíferos Puelche y Paraná están separados por material de baja permeabilidad. Por otra parte, la marea inducida observada no puede ser producto de una interacción puramente hidráulica, debido a la gran distancia que existe entre los filtros de las perforaciones y el río. En cuanto al acuífero superficial, el pozo 8D que se encuentra más cercano a la costa presenta mayores amplitudes que el pozo 8C. La conexión río-acuífero para los sedimentos Postpampeanos se manifiesta en los eventos extremos. En esta locación pueden notarse fenómenos de Sudestadas documentadas periodísticamente, como por

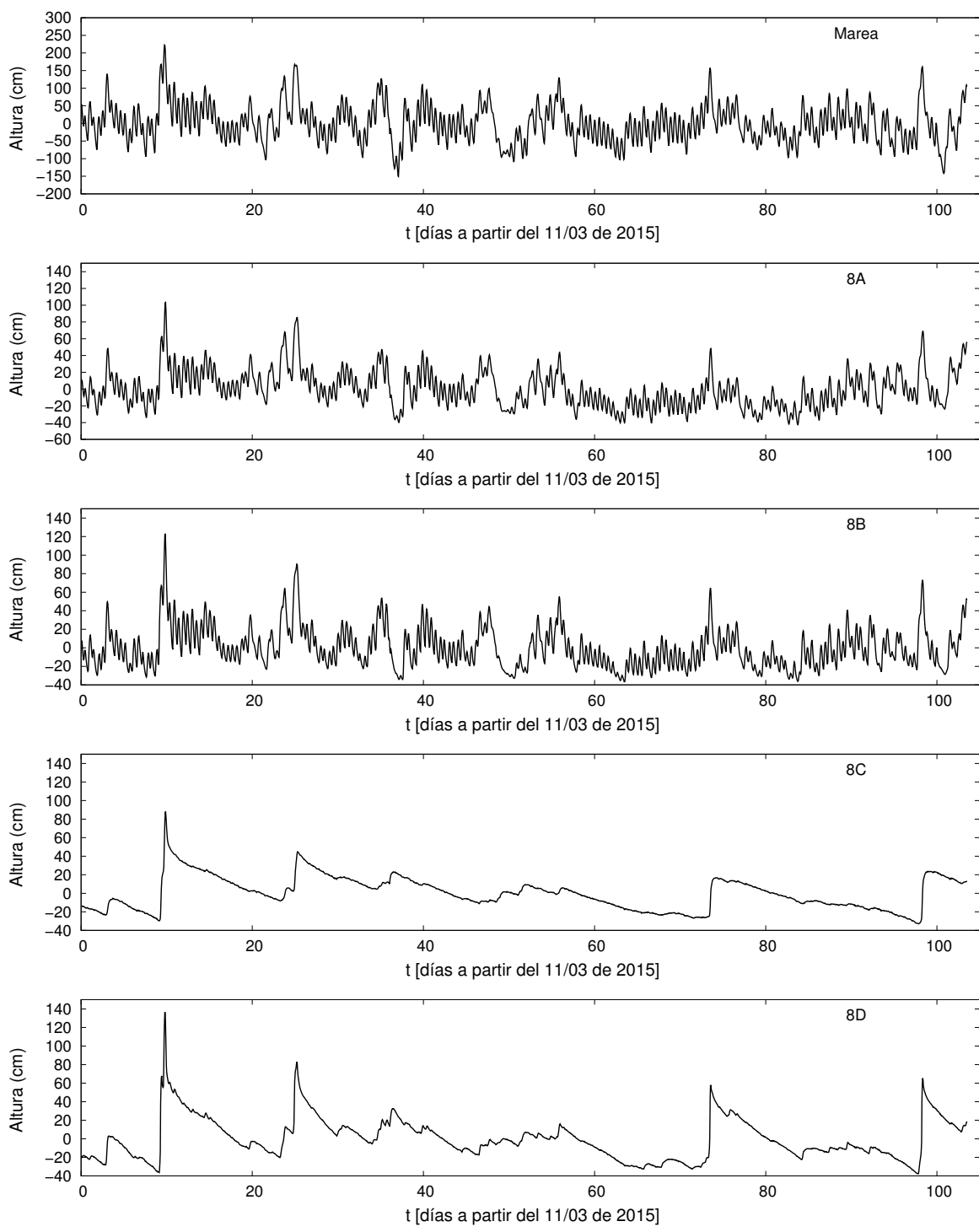


Figura 3.16. Señal mareográfica extrapolada a la locación Viñedos y series de datos correspondientes a los 4 pozos ubicados en la locación Viñedos. El pozo 8A perfora el acuífero Paraná, el pozo 8B al acuífero Puelche y los pozos 8C y 8D a los sedimentos Postpampeanos.

ejemplo el ocurrido el 21 de marzo de 2015 (registro correspondiente al día 10 de la Fig (3.16)). En líneas generales se observa que los niveles de agua correspondientes a los sedimentos Postpampeanos se ven fuertemente afectados por

las crecidas del Río de La Plata y que los acuíferos más profundos (Puelche y Paraná) también registran dichos fenómenos. El registro de Sudestadas que se manifiestan a lo largo de varios días en esta locación donde se tienen dos perforaciones a los sedimentos Postpampeanos motivó el diseño de una nueva técnica para estimar los parámetros hidráulicos que se presenta en el Capítulo 4.

3.1.3. Interacción de los acuíferos con el río

Del análisis cualitativo realizado de los datos piezométricos correspondientes a los pozos y de las señales mareográficas se puede inferir el tipo de conexión existente entre los acuíferos costeros y el Río de La Plata o el Riachuelo. Para el caso del acuífero superficial, constituido en esta zona por los sedimentos Postpampeanos, la conexión es de tipo hidráulica y se manifiesta principalmente por el registro de eventos extremos tales como Sudestadas o bajantes históricas. La componente semi-diurna de la marea que resulta significativa en el río se atenúa fuertemente en los sedimentos Postpampeanos. Por otro lado, la conexión entre los acuíferos Paraná y Puelche y el Río de la Plata queda evidenciada al observar las señales temporales, así como también la conexión entre el acuífero Puelche y el Riachuelo. La evidencia geológica sugiere una conexión de tipo mecánica entre los cuerpos de agua superficial y los acuíferos profundos, ya que los datos observados no pueden explicarse mediante un modelo puramente hidráulico.

3.2. Región costera del Gran La Plata

3.2.1. Datos mareográficos

Para la región costera del Gran La Plata se utilizó la señal mareográfica correspondiente a la estación Puerto La Plata. Los datos mareográficos fueron provistos por el Servicio de Hidrografía Naval del Ministerio de Defensa de la Nación. La Fig. (3.17) ilustra la serie temporal completa correspondiente a la estación Puerto La Plata para el período comprendido entre los días 23 de diciembre de 2015 y 6 de abril de 2016.

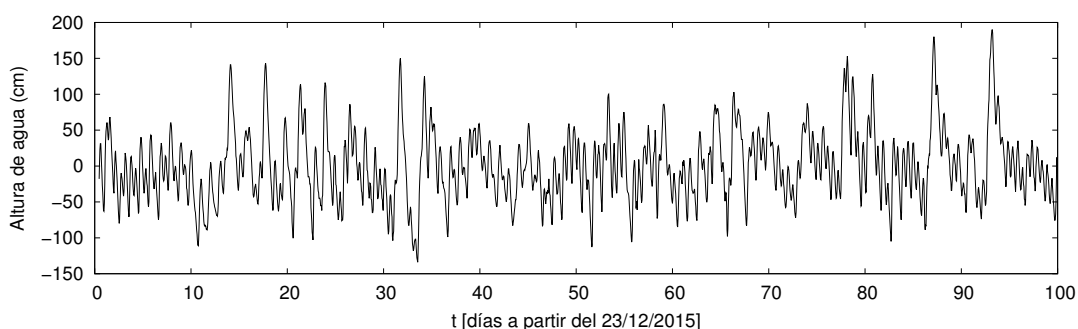


Figura 3.17. Serie de datos mareográficos de la estación Puerto La Plata.

El valor máximo de la serie es de 190 cm y el valor mínimo es de -134 cm obteniéndose así una amplitud máxima de marea para el período considerado de 224 cm. En esta señal mareográfica pueden observarse crecidas del río debido a Sudestadas, como por ejemplo la ocurrida el 5 de enero de 2016 (día 12 de la serie) o la ocurrida el 29 de marzo de 2016 (día 92 de la serie).

3.2.2. Datos piezométricos

En la región de la planicie costera del Río de La Plata se cuenta con 6 pozos distribuidos en 3 locaciones: ATULP, Astillero y Parque Industrial Berisso. En la Fig. (1.6) del Capítulo 1 (Introducción) se muestran las ubicaciones de las locaciones mencionadas. En la Tabla (3.4) se resume la información relativa a los pozos de monitoreo utilizados y los acuíferos que perforan. Esta Tabla es la misma que se presentó en la Introducción (Tabla 1.3) y vuelve a mostrarse para facilitar la descripción.

La locación ATULP posee dos pozos, uno que perfora los sedimentos Postpampeanos (ATULP-F) y otro que perfora las arenas Puelches (ATULP-P). En la Fig. (3.18) se ilustran las series completas de datos piezométricos correspondientes a los pozos de la locación ATULP así como también la señal mareográfica

Medición de Marea Inducida

Pozo	Locación	Acuífero	Período de adquisición de datos (año/mes/día)	Muestreo (minutos)
ATULP-F	ATULP	Postpampeano	2015/12/23-2016/04/06	60
ATULP-P	ATULP	Puelche	2015/12/23-2016/04/06	60
AS-F	Astillero	Postpampeano	2015/12/23-2016/04/06	60
AS-P	Astillero	Puelche	2015/12/23-2016/04/06	60
PIB-F	Parque Industrial Berisso	Postpampeano	2015/12/23-2016/04/06	60
PIB-P	Parque Industrial Berisso	Puelche	2015/12/23-2016/04/06	60

Tabla 3.4. Información relativa a los datos piezométricos adquiridos en la planicie costera del Gran La Plata.

medida en Puerto La Plata. Como puede observarse en la figura, la señal correspondiente al acuífero Puelche presenta una marcada similitud con la señal mareográfica. En cuanto a la señal correspondiente a los sedimentos Postpampeanos, se identifica la componente semi-diurna aunque no tan marcada como en el acuífero más profundo (Puelche). Esto ocurre porque en la zona costera de Ensenada-Berisso los sedimentos Postpampeanos presentan una granulometría de tipo arena fina a limosa, por lo que su coeficiente de almacenamiento específico es menor al correspondiente a los sedimentos Postpampeanos en la región de la cuenca Matanza-Riachuelo. También puede observarse en la Fig. (3.18) una correlación entre las crecidas del Río de La Plata y los máximos de las señales correspondiente a ambos pozos, por ejemplo los dos picos cercanos a los 90 días de la señal que también se observan en la marea. En este caso, es clara la existencia de la marea inducida tanto para el acuífero Puelche como para el acuífero superficial, manifestándose en este último acuífero con una menor amplitud.

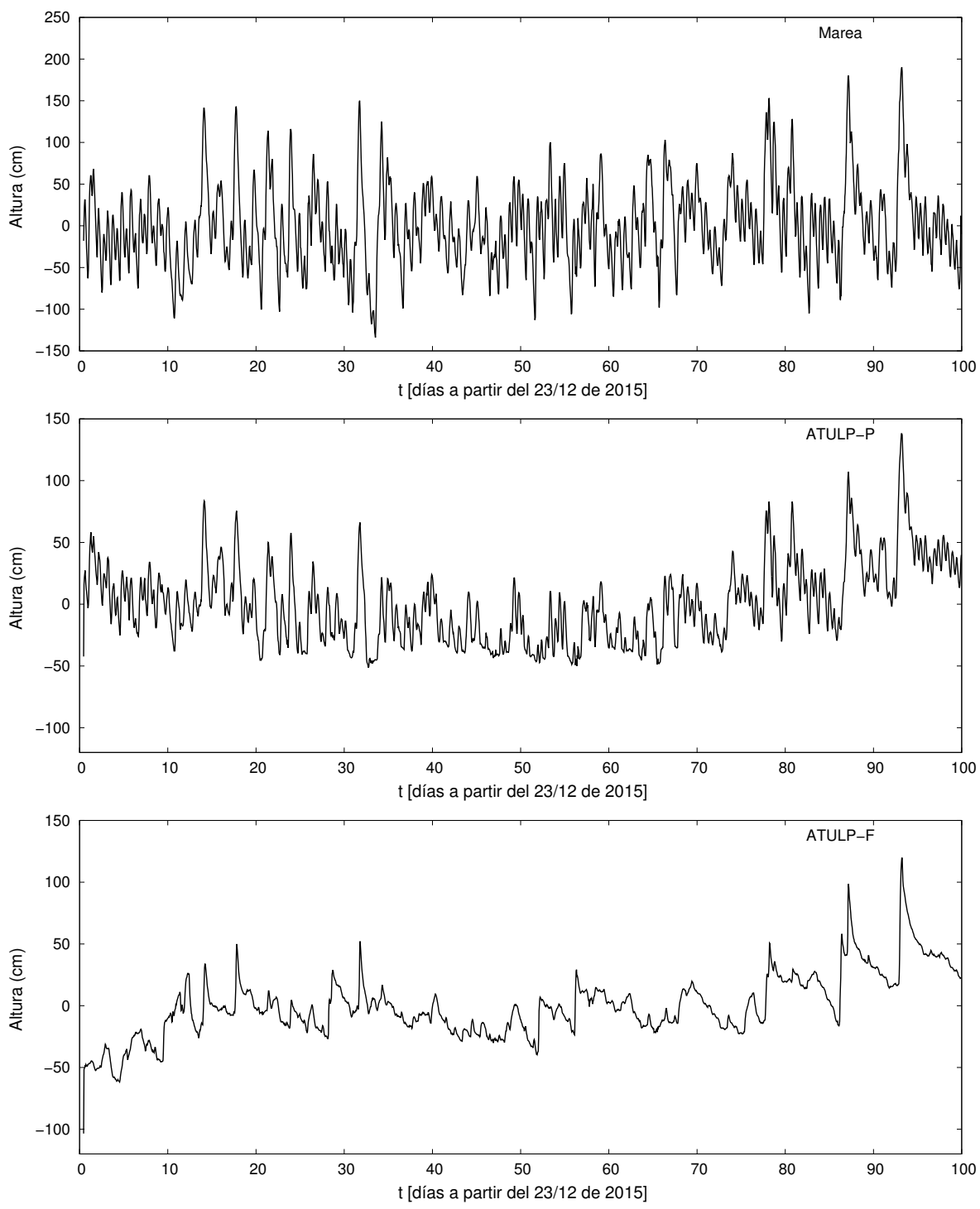


Figura 3.18. Señal mareográfica medida en la estación Puerto La Plata y series de datos piezométricos correspondiente a los pozos ATULP-P y ATULP-F.

En la locación Astillero se dispone de dos pozos que perforan los acuíferos Puelche (AS-P) y Postpampeano (AS-F). En la Fig. (3.19) se ilustra la serie mareográfica junto con las series temporales completas de alturas piezométricas correspondientes a los pozos AS-P y AS-F. Como puede observarse, la señal de

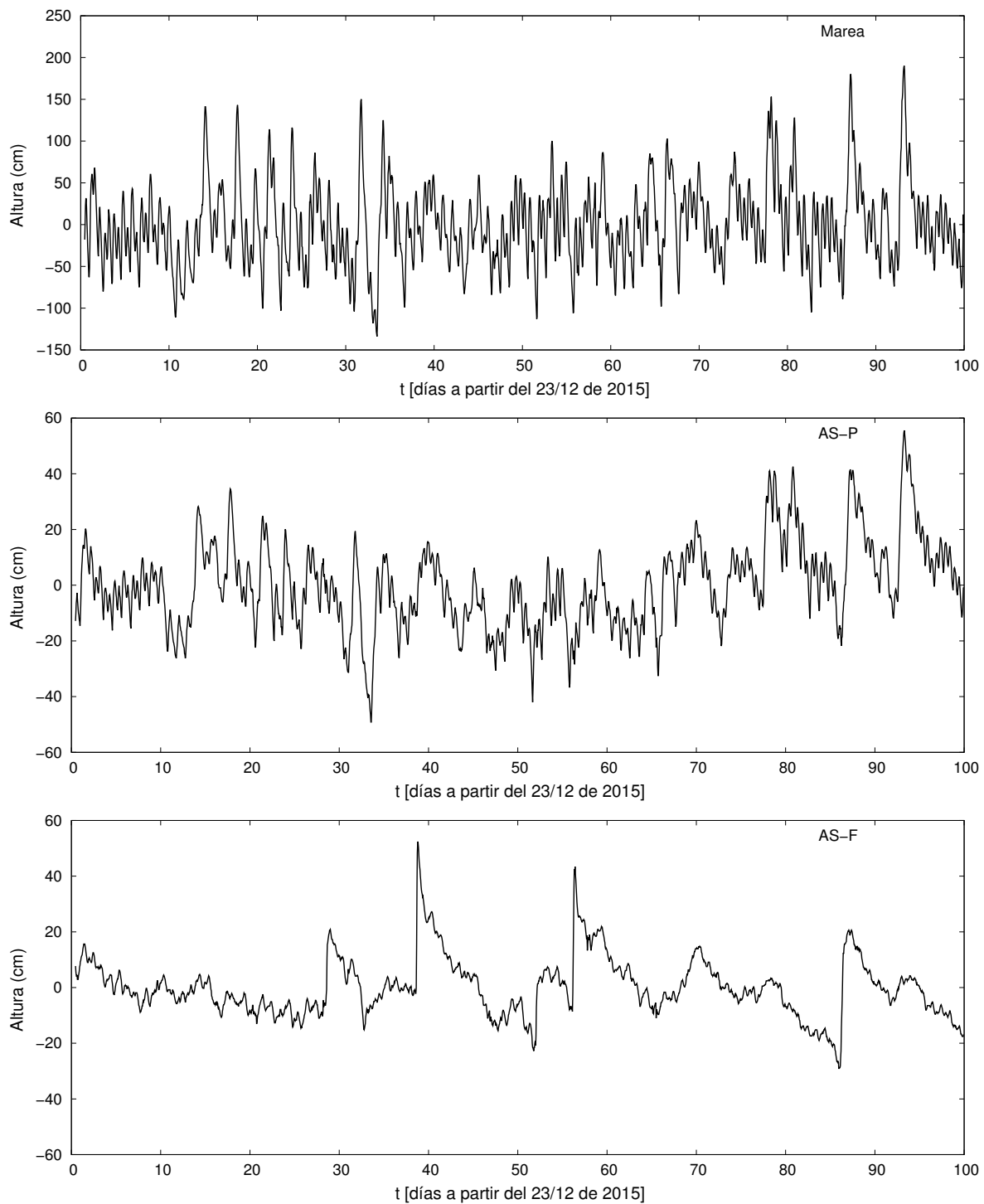


Figura 3.19. Señal mareográfica medida en la estación Puerto La Plata y series de datos piezométricos correspondiente a los pozos AS-P y AS-F.

marea inducida correspondiente al acuífero Puelche presenta una mayor similitud a la señal mareográfica que la señal correspondiente al acuífero superficial por tener un contenido de frecuencias mayor. Sin embargo, en la señal hidráulica correspondiente al acuífero Postpampeano se evidencia una mayor presencia de la

componente semi-diurna, al compararla con los pozos que perforan al Postpampeano en la cuenca Matanza-Riachuelo. Las señales correspondientes a ambos pozos son sensibles a las fuertes crecidas y bajantes del Río de La Plata.

La locación Parque Industrial Berisso (PIB) tiene dos pozos que perforan al acuífero Puelche (PIB-P) y al Postpampeano (PIB-F). La Fig. (3.20) ilustra la señal mareográfica junto con las series temporales de altura piezométrica para los pozos PIB-P y PIB-F.

En este caso, las señales correspondientes a ambos pozos presentan una semejanza llamativa y no se observan diferencias que se manifiesten a simple vista como ocurre con el resto de los pozos analizados. Esto se debe posiblemente a que en la zona donde se encuentran emplazados los pozos de esta locación, los sedimentos Postpampeanos son areno-gravosos, de manera que la manifestación del fenómeno de marea inducida resulta más evidente en el acuífero superficial. La marea inducida en PIB se debe claramente a las variaciones en los niveles del arroyo lindante a la Av. Río de La Plata ya que, si el origen de la marea inducida en estos pozos fuera el Río de La Plata, se obtendría un valor extremadamente alto de conductividad hidráulica debido a la gran distancia que los separa (3.5 Km). Con el objetivo de clarificar esta idea, en la Fig. (3.21) se muestra la ubicación de la locación PIB y de la Av. Río de La Plata.

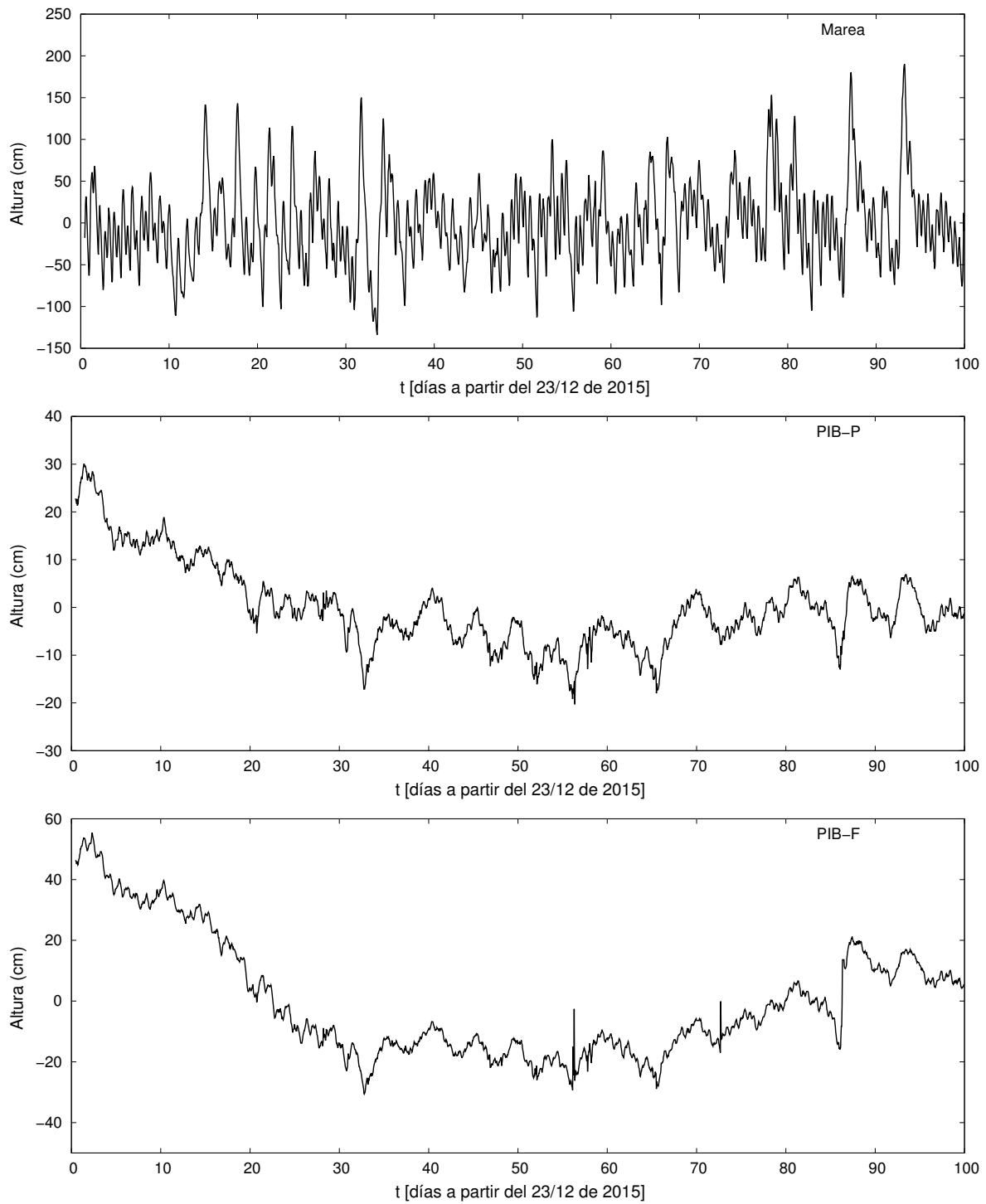


Figura 3.20. Señal mareográfica medida en la estación Puerto La Plata y series de datos piezométricos correspondiente a los pozos PIB-P y PIB-F.



Figura 3.21. Ubicación de la locación PIB y de la Av. Río de La Plata. La locación se encuentra a aproximadamente 440 m de la avenida y a 3.5 Km del río.

3.2.3. Interacción de los acuíferos con el río

Del análisis cualitativo de las señales piezométricas presentadas pudo inferirse el tipo de conexión existente entre los acuíferos Puelche y Postpampeano y el Río de La Plata. En este caso, debido a que los sedimentos Postpampeanos que constituyen el acuífero superficial poseen una granulometría mayor, se comportan como un acuífero de media productividad. Esto queda evidenciado al visualizar las señales temporales referidas al acuífero superficial. En cuanto al acuífero Puelche, se deduce que está conectado mecánicamente al Río de La Plata por la similitud que presentan ambas señales ya que, al igual que ocurre en la cuenca Matanza-Riachuelo, las arenas Puelches se encuentran semiconfinadas por una capa de baja permeabilidad.

3.3. Conclusiones

En este Capítulo se presentaron los datos mareográficos y piezométricos con los que se trabajará en esta Tesis. La presentación de datos se dividió en dos secciones para facilitar la lectura. En las locaciones donde no se disponía de estaciones mareográficas se debieron extrapolar las señales a partir de una estación cercana con el fin de contar con apropiadas variaciones de niveles de agua superficial para resolver el problema de marea inducida.

Mediante un análisis cualitativo de las señales de marea inducida y las señales mareográficas pudo inferirse el tipo de conexión existente entre los acuíferos y los cuerpos de agua superficial tales como el Río de La Plata y el Riachuelo. En la cuenca Matanza-Riachuelo, las señales piezométricas correspondientes a los acuíferos Puelche y Paraná presentaron una fuerte similitud con la señal extrapolada del Río de La Plata para el caso de la locación Viñedos. También en las locaciones Club Regatas Avellaneda y Puente La Noria se identificó una relación entre la señal del Riachuelo y el Puelche. Para estos acuíferos profundos, la evidencia geológica indica que la conexión existente con los cuerpos de agua superficial es de tipo mecánico. Esto mismo puede concluirse a partir del análisis de las señales piezométricas del acuífero Puelche en las locaciones de la costa de Ensenada-Berisso. En cuanto al acuífero superficial, constituido por los sedimentos Postpampeanos, la interacción es de tipo hidráulica, ya que se encuentra en contacto directo con los cuerpos de agua superficial. En la cuenca Matanza-Riachuelo las señales correspondientes al Postpampeano no presentan una marcada componente semi-diurna, como ocurre con los acuíferos profundos. De todas formas, la conexión se evidencia a partir de la manifestación de fenómenos extremos. En cuanto a la región costera de Ensenada-Berisso, debido a la mayor granulometría de los sedimentos Postpampeanos, las señales correspondientes al acuífero superficial presentan una mayor similitud a la señal mareográfica. Algunos de los resultados obtenidos en este Capítulo correspondientes a la cuenca Matanza-Riachuelo han sido publicados en un Informe para el Proyecto “Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo” (Guarracino *et al.*, 2015).

Capítulo 4

Marea Inducida: Aplicaciones

En este Capítulo se presentan los resultados de la aplicación del método de marea inducida a los datos presentados en el Capítulo 3. Para llevar a cabo la estimación de los parámetros hidráulicos se utilizan las expresiones presentadas en el Capítulo 2 que permiten estimar la difusividad hidráulica de la formación acuífera a partir de las mediciones de atenuación de amplitud y de desfase de las señales. Para ello se calculan los espectros de amplitud y fase de las señales piezométricas correspondientes a cada pozo y de la señal de marea que se utiliza en cada locación. Con los valores de difusividad hidráulica obtenidos mediante atenuación y desfase se calcula el factor de heterogeneidad de Trefry-Bekele. Luego, a partir de los valores de almacenamiento específico y de eficiencia de carga obtenidos en el Capítulo 2 en base a las propiedades elásticas de los materiales que conforman los acuíferos, se estima la conductividad hidráulica. En este procedimiento se obtendrán dos estimaciones de la conductividad hidráulica: una mediante información de la atenuación y otra mediante el desfase. Estos valores suelen diferir y esta diferencia suele ser una de las mayores limitaciones del método. El factor de heterogeneidad de Trefry-Bekele cuantifica esta diferencia, por lo que será utilizado para pesar las estimaciones obtenidas.

En este Capítulo también se presenta una metodología para la estimación de parámetros hidráulicos en acuíferos costeros que se basa en la utilización de señales de marea inducida en dos pozos a distintas distancias de la costa. La principal ventaja que presenta esta variante del método de marea inducida consiste en el hecho de prescindir de los datos mareográficos. De este modo se evitan posibles fuentes de error, tales como la extrapolación de las señales mareográficas y la incertidumbre en la medición de la distancia a la costa, cuyo valor podría variar con la marea dependiendo de la geometría de la costa. Además, es importante remarcar que no siempre es posible instalar una estación mareográfica o contar con datos de nivel del río/mar.

Algunos resultados preliminares de este Capítulo han sido publicados en congresos de la especialidad (Cuello *et al.*, 2014a, 2015, 2016; Cuello y Guarracino, 2017).

4.1. Cuenca Matanza-Riachuelo

Como se mencionó en el Capítulo 3, en la región de la cuenca Matanza-Riachuelo se cuenta con ocho pozos distribuidos en tres locaciones. En las locaciones Viñedos y Club Regatas Avellaneda se utilizan señales mareográficas que fueron extrapoladas mientras que en la locación Puente La Noria se emplearon datos mareográficos adquiridos por ACUMAR. En cuanto a las señales piezométricas, los datos correspondientes a las locaciones Viñedos y Club Regatas Avellaneda fueron adquiridos por el autor de esta Tesis y miembros del grupo de trabajo del Proyecto “Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo”, mientras que los datos correspondientes a la locación Puente La Noria fueron también provistos por ACUMAR.

4.1.1. Locación Viñedos

La locación Viñedos cuenta con 4 pozos: 8A, que perfora el acuífero Paraná; 8B, que perfora el acuífero Puelche; 8C y 8D perforan los sedimentos Postpampeanos. La cercanía al Río de La Plata y la cantidad de pozos que se tienen en esta locación la convierten en la más completa y confiable a la hora de estimar las propiedades hidráulicas.

Con el fin de identificar las principales componentes de marea se calcula el espectro de amplitud de la señal mareográfica. La Fig. (4.1) ilustra la señal mareográfica y su espectro de amplitud en función del período, lo que permite identificar claramente algunas de las componentes de marea características.

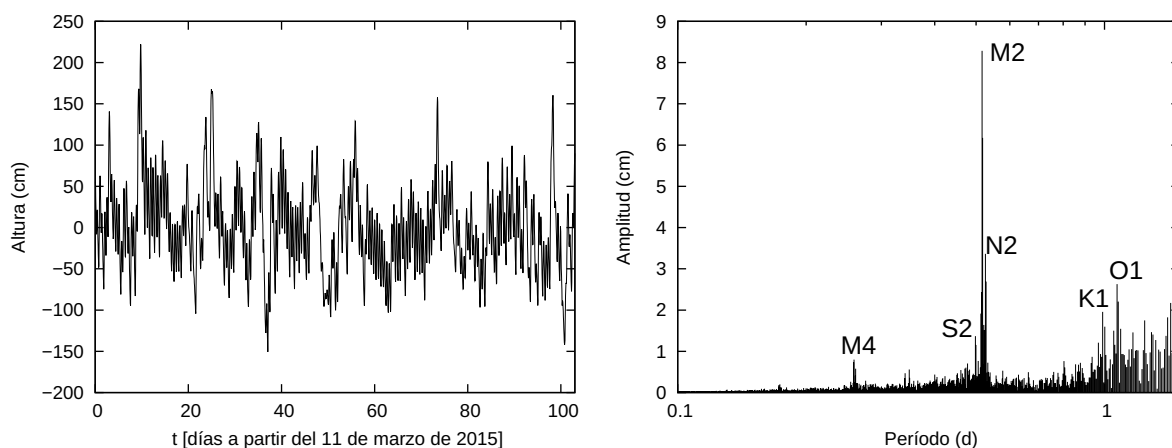


Figura 4.1. Señal mareográfica extrapolada a la locación Viñedos y su espectro de amplitud.

Como puede observarse en la Fig. (4.1), se identifican claramente las principales componentes características M2, N2, O1, K1, M4 y en menor medida S2. Estas componentes resultan consistentes con las determinadas por D'Onofrio *et al.* (1999) y D'Onofrio *et al.* (2012) para el Río de La Plata. En la Tabla (4.1) se presenta la amplitud y la fase de la marea para las principales componentes identificadas, junto con su correspondiente frecuencia angular.

Componente	Frecuencia [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
M2	12.141	8.3	0.144
N2	11.911	3.36	2.74
S2	12.566	1.37	1.18
O1	5.84	2.63	2.43
K1	6.302	1.96	0.04
M4	24.283	0.8	2.96

Tabla 4.1. Amplitud y fase de las componentes M2, N2, S2, O1, K1 y M4 de la marea en la locación Viñedos.

Con el fin de poder aplicar el método de marea inducida, se procede al cálculo del espectro de amplitud de las señales de los pozos con el objeto de determinar si las componentes de marea identificadas en el Río de La Plata se inducen en el acuífero. Las Figs. (4.2)-(4.5) ilustran las señales piezométricas medidas en los pozos y sus correspondientes espectros de amplitud en función del período.

Como puede observarse en las Figs. (4.2) y (4.3), los acuíferos Paraná (pozo 8A) y Puelche (pozo 8B) presentan amplitudes significativas en las componentes características del Río de La Plata. La marea inducida en estos acuíferos se manifiesta principalmente en las componentes M2, N2, O1, K1, M4 y S2. Por otro lado, los espectros de amplitud de los pozos 8C y 8D (Figs. 4.4 y 4.5), que perforan los sedimentos Postpampeanos, se encuentran fuertemente atenuados. Cabe

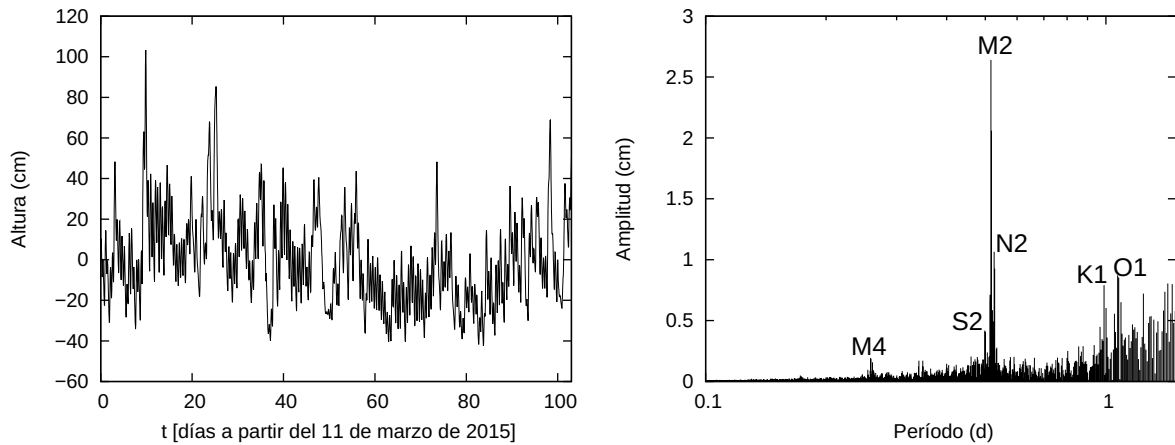


Figura 4.2. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo 8A (acuífero Paraná) y su espectro de amplitud.

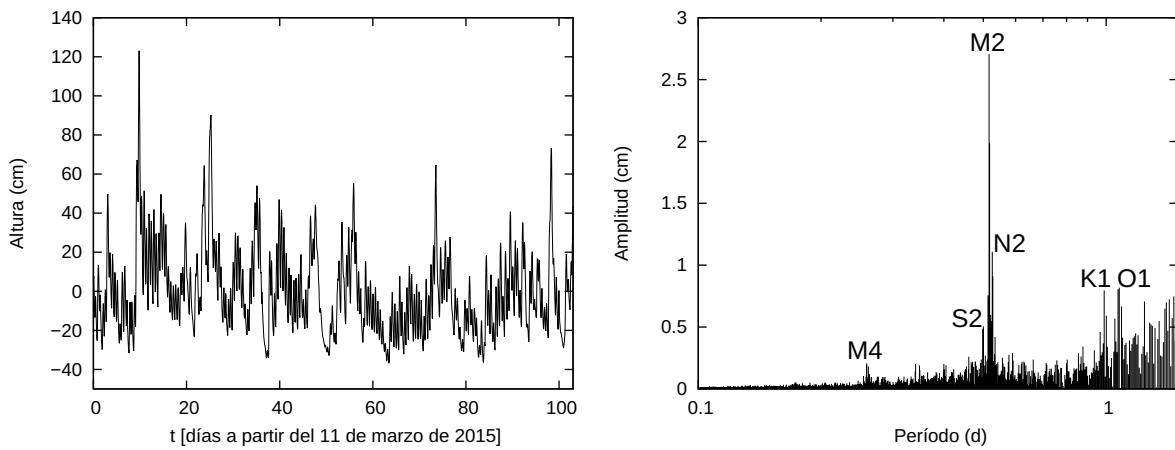


Figura 4.3. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo 8B (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.

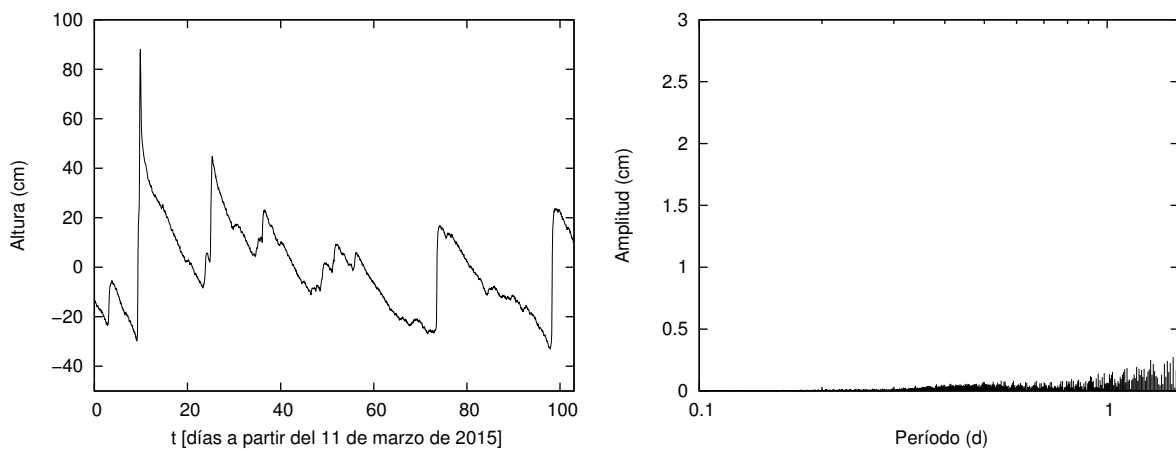


Figura 4.4. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo 8C (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.

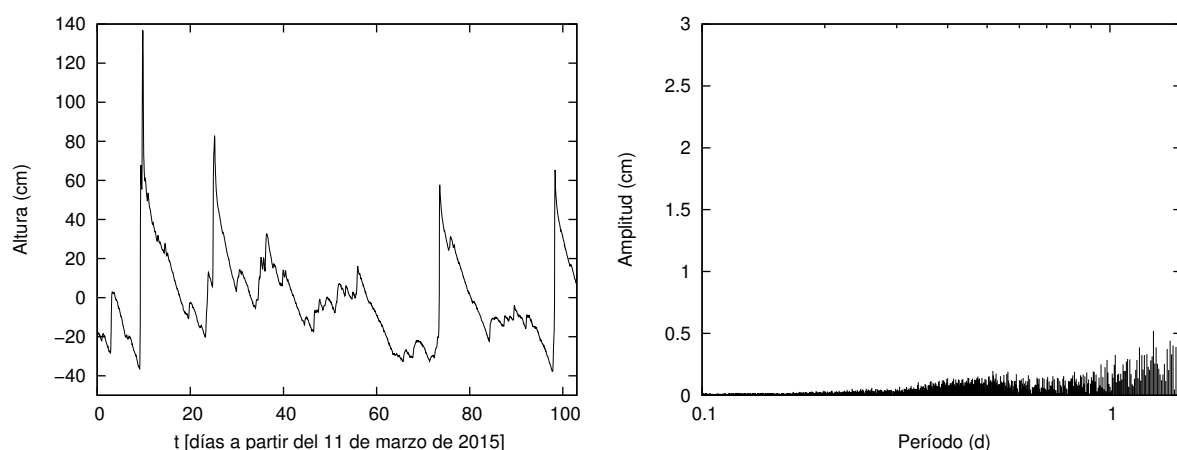


Figura 4.5. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo 8D (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.

mencionar que los acuíferos libres pueden presentar señales atenuadas debido al alto valor de rendimiento específico que suelen tener (Li *et al.*, 2008).

Para estimar las propiedades hidráulicas del acuífero Paraná y Puelche se utiliza la amplitud y la fase de las componentes mencionadas de la marea inducida en los pozos 8A y 8B. En cuanto a los pozos 8C y 8D que perforan el acuífero superficial, se debe considerar otro enfoque para la estimación de difusividad hidráulica, debido a que las amplitudes características de marea del río no se inducen en el acuífero. Es por esto que no puede utilizarse la técnica tradicional de marea inducida. En la Tabla (4.2) se muestran las amplitudes y las fases de las señales piezométricas correspondientes a los pozos 8A y 8B para las componentes características.

A partir de los valores de amplitud y fase de las Tablas (4.1) y (4.2) puede estimarse la difusividad hidráulica utilizando las Ecs. (2.10)-(2.13). Recordemos que las expresiones que nos permiten estimar la difusividad hidráulica están en función de la distancia x entre el pozo y la costa, la frecuencia $\omega = 2\pi/T$ de la componente utilizada y la caída de amplitud $c(x)$ de la marea inducida o su desfase $\Delta\phi$, así como del coeficiente de eficiencia de carga L_e para el caso de interacción mecánica. En cuanto a la aplicabilidad del cálculo de desfase entre la marea inducida y la marea, hay que considerar que en la práctica la resta de fases puede presentar un corrimiento de fase de 2π que habrá que considerar en cada caso particular. Considerando que el pozo 8A se encuentra a 52 m de la costa y el pozo 8B a 55 m de la costa, se puede obtener una estimación de difusividad hidráulica mediante atenuación y mediante desfase para cada componente. En la Tabla (4.3) se presentan las estimaciones realizadas para los pozos 8A y 8B y los valores de factor de heterogeneidad correspondientes a cada

Pozo	Componente	Frec. [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
8A	M2	12.141	2.64	0.75
8A	N2	11.911	1.06	-2.94
8A	O1	5.84	0.87	2.78
8A	K1	6.302	0.79	0.86
8A	M4	24.283	0.19	-2.24
8A	S2	12.566	0.42	0.56
8B	M2	12.141	2.71	0.39
8B	N2	11.911	1.1	3.04
8B	O1	5.84	0.81	2.6
8B	K1	6.302	0.8	0.38
8B	M4	24.283	0.21	-2.6
8B	S2	12.566	0.48	0.34

Tabla 4.2. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos 8A y 8B.

pozo y a cada componente de marea.

Pozo	Componente	D_{amp} [m ² /d]	D_{ϕ} [m ² /d]	FH[-]
8A	M2	81351.7	44795.5	1.35
8A	N2	76885.7	43893.5	1.32
8A	O1	47124.6	64809.2	0.85
8A	K1	189471.1	12769	3.85
8A	M4	59656.3	28143.3	1.46
8A	S2	71777.7	44198.1	1.27
8B	M2	102841.1	304108	0.58
8B	N2	102057.6	200365	0.71
8B	O1	38321	250204.9	0.39
8B	K1	240595.4	83089.4	1.7
8B	M4	89315	70527.3	1.13
8B	S2	152965.3	26936.8	2.38

Tabla 4.3. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Paraná (pozo 8A) y Puelche (pozo 8B) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.

Como muestra la Tabla (4.3), las difusividades obtenidas mediante atenuación y desfase para el pozo 8A son del mismo orden de magnitud para todas las componentes a excepción de K1. Esa componente es justamente la que presenta un mayor factor de heterogeneidad. En cuanto al pozo 8B, las componentes K1, O1 y S2 presentan difusividades de distinto orden. Como se mencionó anteriormente, la desviación del factor de heterogeneidad respecto a la unidad evidencia algún tipo de apartamiento entre el modelo utilizado y la realidad, tal como

variaciones en el espesor del acuífero, variaciones en las propiedades hidráulicas o interacción hidráulica entre la formación acuífera y el entorno. El modelo considerado no contempla las heterogeneidades mencionadas, hipótesis que puede no ser válida. Cabe remarcar que las determinaciones de las difusividades involucran distintas porciones de acuífero en función de la frecuencia angular de la componente. Recordemos que las longitudes características dependen de la frecuencia, aumentando a medida que disminuye ω .

En la Tabla (4.4) se calculan las conductividades hidráulicas calculadas mediante amplitud y desfase para cada una de las componentes estudiadas.

Pozo	Componente	K_s [m/d] (Atenuación)	K_s [m/d](Desfase)	FH[-]
8A	M2	26.5	14.6	1.35
8A	N2	25.1	14.3	1.32
8A	O1	15.4	21.1	0.85
8A	K1	61.8	4.2	3.85
8A	M4	19.4	9.2	1.46
8A	S2	23.4	14.4	1.27
8B	M2	28.4	83.9	0.59
8B	N2	28.2	55.3	0.71
8B	O1	10.6	69.1	0.39
8B	K1	66.4	22.9	1.7
8B	M4	24.7	19.5	1.13
8B	S2	42.2	7.4	2.38

Tabla 4.4. Estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Paraná (8A) y Puelche (8B) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad.

Utilizando las estimaciones correspondientes a todas las componentes puede obtenerse un valor representativo de conductividad hidráulica para cada formación acuífera. Primero se realiza un promedio simple entre la estimación mediante atenuación y desfase para cada componente. Luego se realiza un promedio ponderado de las estimaciones promedio de cada componente utilizando el factor de heterogeneidad como peso. Es decir:

$$K_{s_r} = \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^N P_i} \right] \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Amp_i} + K_{\phi_i})}{2} P_i, \quad (4.1)$$

donde K_{s_r} es el valor de conductividad hidráulica representativo de la formación acuífera, N es el número de componentes utilizadas y P el peso definido del siguiente modo:

$$P_i = \begin{cases} FH_i, & \text{si } FH_i \leq 1 \\ FH_i^{-1}, & \text{si } FH_i > 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

Este cómputo fue realizado utilizando las 6 componentes ($N=6$) correspondientes al acuífero Paraná arrojando un valor de conductividad hidráulica de 16.2 m/d. Esta estimación de conductividad hidráulica constituye un aporte original al conocimiento hidrogeológico de la región ya que es prácticamente nula la información sobre las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas que subyacen al Puelche (Auge *et al.*, 2002). En cuanto al acuífero Puelche, el valor obtenido de conductividad hidráulica que integra las componentes características de marea es de 37.5 m/d. Esta estimación resulta cercana al promedio de 33 m/d obtenido por Auge (2001) a partir de valores de entre 9 y 57 m/d calculados mediante ensayos de bombeo.

Recordemos que, como se analizó en el Capítulo 3, el acuífero superficial evidenciaba una conexión hidráulica con el río a partir de los fenómenos extremos como Sudestadas o bajantes históricas. Los pozos 8C y 8D que perforan a los sedimentos Postpampeanos registraban claramente estos fenómenos extremos. Aprovechando la existencia de dos perforaciones a la misma formación y motivados por el hecho de no poder utilizar las componentes características de marea observadas en el río, se diseñó una metodología alternativa para la estimación de difusividad hidráulica. Esta metodología constituye una variante del método tradicional de marea inducida y consiste en la utilización de señales hidráulicas medidas en dos pozos ubicados a distintas distancias de la costa. Al final de este capítulo se presentará la variante propuesta y se la aplicará a los pozos 8C y 8D.

4.1.2. Locación Club Regatas Avellaneda

En la locación Club Regatas Avellaneda se cuenta con señales de dos pozos que perforan respectivamente el acuífero Puelche (33P) y los sedimentos Postpampeanos que conforman el acuífero freático (33F). Ambos pozos se encuentran a 22 m de la costa del Riachuelo. En la Fig. (4.6) se muestra la señal mareográfica y su espectro de amplitud en función del período para identificar las componentes características que se observan. Como puede notarse, en el espectro de la marea nuevamente tienen preponderancia las componentes M2, N2, O1, K1, M4 y S2. En la Tabla (4.5) se listan las amplitudes y fases de la marea para las componentes características mencionadas.

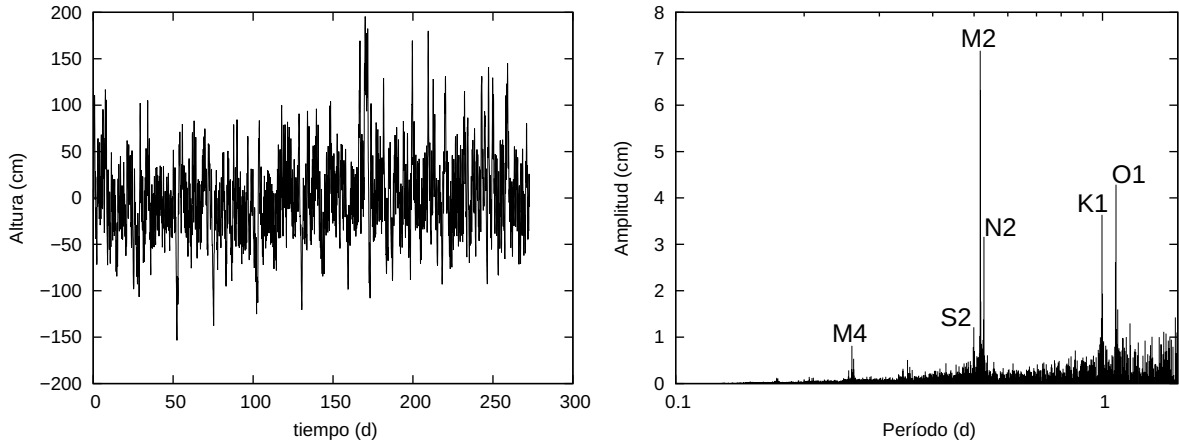


Figura 4.6. Señal mareográfica extrapolada al Club Regatas Avellaneda y su espectro de amplitud.

Componente	Frec. [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
M2	12.141	7.2	-1.96
N2	11.911	3.2	-3.1
O1	5.84	4.3	-2.73
K1	6.302	3.6	0.68
M4	24.283	0.8	2.1
S2	12.566	1.2	-1.73

Tabla 4.5. Amplitud y fase de las componentes M2, S2, O1, K1, M4 y S2 de la marea en la locación Club Regatas Avellaneda.

En las Figs. (4.7) y (4.8) se ilustran las señales correspondientes a los pozos 33P que perfora el Puelche y 33F que perfora el Postpampeano y sus correspondientes espectros de amplitud en función del período para ser comparadas con el espectro de la señal mareográfica.

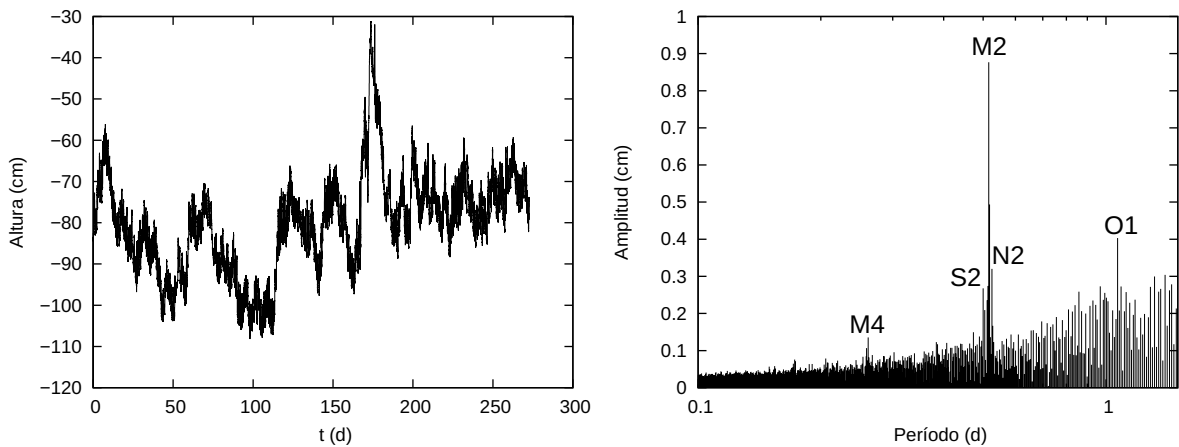


Figura 4.7. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo 33P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.

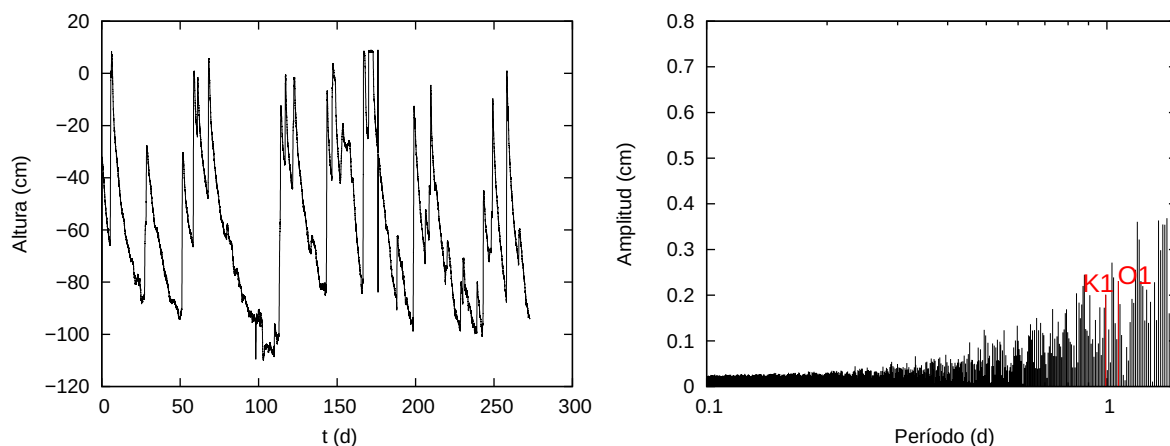


Figura 4.8. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo 33F (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.

En este caso puede observarse que, para la señal correspondiente al acuífero Puelche (33P), las componentes M2, N2, O1, S2 y M4 pueden identificarse claramente en el espectro de amplitud. En cuanto a los sedimentos Postpampeanos, las componentes de períodos menores al semi-diurno (alta frecuencia) están atenuadas. Para períodos mayores la señal se atenúa menos. Si bien las componentes O1 y K1 se encuentran enmascaradas en el espectro, presentan amplitudes significativas por lo que se utilizarán para realizar las estimaciones.

En la Tabla (4.6) se muestran las amplitudes y las fases de las señales piezométricas correspondientes a los pozos 33P y 33F para las componentes mencionadas.

Pozo	Componente	Frec. [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
33P	M2	12.141	0.9	-1.58
33P	N2	11.911	0.32	-2.78
33P	O1	5.84	0.4	-1.74
33P	M4	24.283	0.14	2.69
33P	S2	12.566	0.27	-1.36
33F	O1	5.84	0.23	-1.87
33F	K1	6.302	0.2	-2.17

Tabla 4.6. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos 33P y 33F.

Resulta importante destacar que, a diferencia del Río de La Plata, el Riachuelo posee un ancho de algunas decenas de metros que deben tenerse en cuenta al momento calcular los parámetros hidráulicos. Para el acuífero superficial pueden utilizarse las expresiones (2.10) y (2.11) ya que la conexión hidráulica no depende del tamaño del cuerpo de agua superficial. Sin embargo, para estimar

las propiedades hidráulicas del acuífero Puelche hay que tener en cuenta que la posición del acuífero por debajo del río no puede considerarse semi-infinita. Para analizar el efecto en la marea inducida de un cuerpo de agua superficial como el Riachuelo, de un ancho finito, se derivó una solución analítica que contempla esta condición.

A partir de comparar la solución obtenida por van der Kamp (1972) y la derivada para analizar la marea inducida de origen mecánico en el Riachuelo, se comprobó que, al ser la distancia entre el pozo y el Riachuelo menor al ancho del mismo, los valores de difusividad estimados a partir de ambas soluciones analíticas eran prácticamente iguales. Es por esto que se procede a utilizar las Ecs. (2.12) y (2.13) que se obtienen de la solución de van der Kamp (1972) para la estimación de parámetros hidráulicos. En la Tabla (4.7) se presentan las estimaciones realizadas para los pozos 33F y 33P junto con los valores de factor de heterogeneidad correspondientes a cada pozo y a cada componente.

Pozo	Componente	D_{amp} [m ² /d]	D_{ϕ} [m ² /d]	FH[-]
33P	M2	1538	20877.8	0.27
33P	N2	1118.2	22262.8	0.22
33P	O1	502	1443.2	0.59
33P	M4	5365.4	17175.9	0.56
33P	S2	4807.1	22023.7	0.47
33F	O1	165	1912.4	0.29
33F	K1	183.2	189	0.98

Tabla 4.7. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo 33P) y superficial (pozo 33F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.

Como se observa en la Tabla (4.7), las difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase correspondientes al acuífero Puelche toman valores más pequeños que los obtenidos en la locación Viñedos. Los factores de heterogeneidad son menores a 1 en todos los casos. En cuanto a los sedimentos Postpampeanos, el factor de heterogeneidad para la componente K1 es aproximadamente 1 arrojando valores de difusividad hidráulica del orden de 10² m²/d. Para la componente O1, la difusividad mediante atenuación también resulta del orden de 10² m²/d pero la difusividad mediante desfase es mayor, dando lugar a un factor de heterogeneidad pequeño. En la Tabla (4.8) se listan las estimaciones de conductividad hidráulica que se obtienen en cada pozo.

Como puede observarse en la Tabla (4.8), los valores de conductividad hidráulica mediante amplitud para el acuífero Puelche son significativamente bajos. Los

Pozo	Componente	K_s [m/d] (Atenuación)	K_s [m/d] (Desfasaje)	FH [–]
33P	M2	0.4	5.8	0.27
33P	N2	0.3	6.1	0.22
33P	O1	0.14	0.4	0.59
33P	M4	1.5	4.7	0.56
33P	S2	1.3	6.1	0.47
33F	O1	0.07	0.78	0.29
33F	K1	0.075	0.077	0.98

Tabla 4.8. Conductividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfasaje para los acuíferos Puelche (pozo 33P) y freático (pozo 33F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.

valores de conductividad hidráulica mediante desfasaje se aproximan al límite inferior del rango obtenido por Auge (2001). Resulta importante remarcar que en esta locación no se cuenta con datos de altura del Riachuelo medidos in situ. Es por ello que se realizó una extrapolación de la marea desde el Puerto de Buenos Aires a Dock Sud y desde allí al Club Regatas Avellaneda. La pérdida de amplitud de la señal mareográfica se extrapoló considerando una caída lineal de la misma con la distancia. La extrapolación de la señal mareográfica y las hipótesis asumidas no son las adecuadas. Para la aplicación del método de marea inducida resulta muy importante contar con valores confiables de la marea. Por estos motivos no se estimará un valor para el Puelche. En cuanto a los sedimentos Postpampeanos, los valores de conductividad hidráulica estimados son consistentes con el rango de valores obtenidos por Auge (2004, 2005).

Utilizando la Ec. (4.1) puede obtenerse un valor de conductividad hidráulica representativo de las componentes observadas en los sedimentos Postpampeanos. El valor de conductividad hidráulica promedio es de 0,16 m/d. Este valor se encuentra dentro del rango (0.07-0.38 m/d) obtenido por Auge (2004) y cercano a su promedio (0.22 m/d).

4.1.3. Locación Puente La Noria

En la locación Puente La Noria se cuenta con información de los pozos 37F y 37P, que perforan el acuífero freático (Postpampeano) y el acuífero Puelche, respectivamente. Ambos pozos se encuentran a 52 m de la costa del Riachuelo. En la Fig. (4.9) se ilustra la señal mareográfica y su espectro de amplitud en función del período para identificar las componentes características predominantes. Como se observa en la figura, las componentes características de la marea que predominan son la M2 y O1. El resto de las componentes características no se

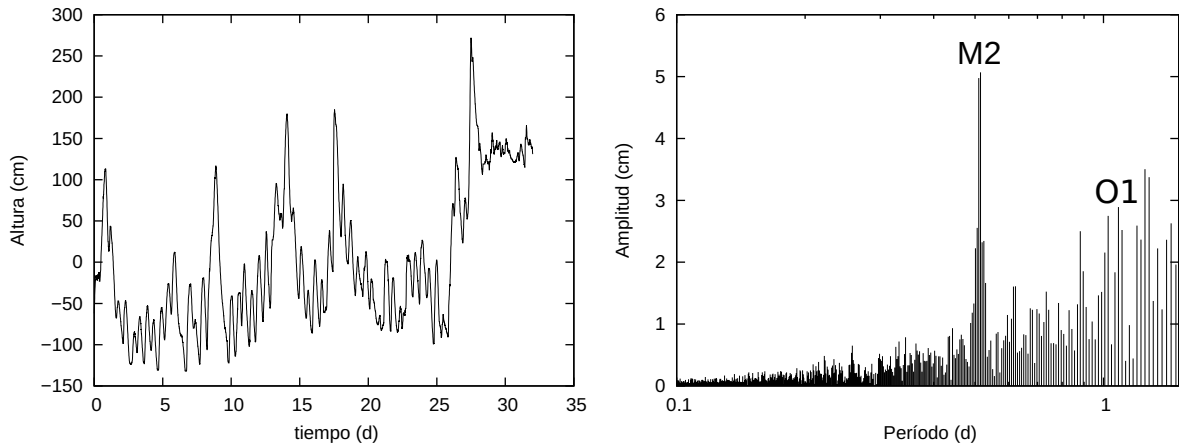


Figura 4.9. Señal mareográfica correspondiente a la locación Puesto La Noria y su espectro de amplitud.

destacan por encima de las demás. En la Tabla (4.9) se listan la amplitud y la fase de la marea correspondiente a las componentes mencionadas.

Componente	Frec. [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
M2	12.141	5.1	2
O1	5.84	2.9	0.4

Tabla 4.9. Amplitud y fase de las componentes M2 y O1 de la marea en la locación Puesto La Noria.

Las Figs. (4.10) y (4.11) ilustran las señales correspondientes a los pozos 37P y 37F, respectivamente, y sus espectros de amplitud en función del período.

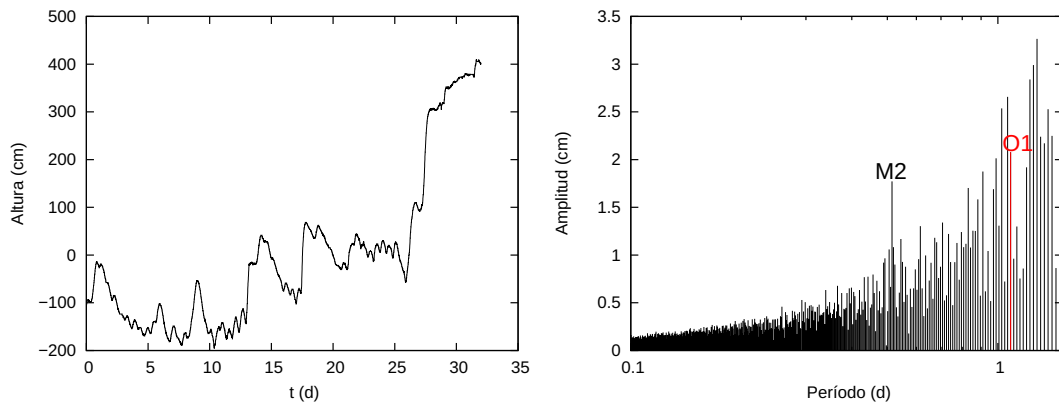


Figura 4.10. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo 37P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.

Puede observarse en la Fig. (4.10) que la componente M2 se destaca en el espectro. La componente O1 también tiene una amplitud significativa aunque queda enmascarada en el gráfico. En cuanto al acuífero superficial, las componentes M2 y O1 tienen amplitudes importantes aunque esta última componente

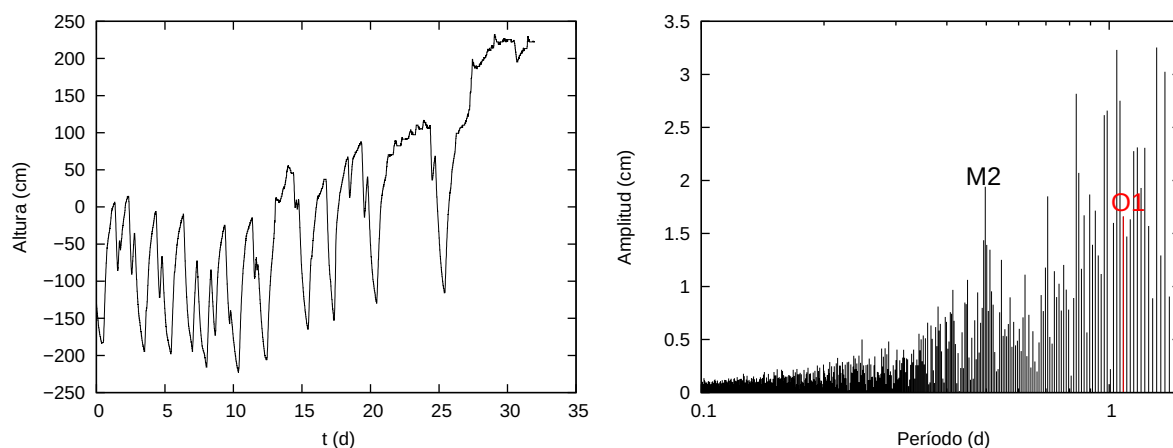


Figura 4.11. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo 37F (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.

tampoco se destaca claramente en la Fig. (4.11). En la Tabla (4.10) se listan las amplitudes y fases de las señales correspondiente a los pozos 37P y 37F para las componentes M2 y O1.

Pozo	Componente	Frec. [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
37P	M2	12.141	1.8	0.72
37P	O1	5.84	2.1	0.76
37F	M2	12.141	0.96	2.01
37F	O1	5.84	1.6	-1.38

Tabla 4.10. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos 37P y 37F.

En la Tabla (4.11) se presentan las estimaciones de difusividad hidráulica realizadas para los pozos 37F y 37P y los valores de factor de heterogeneidad correspondientes a cada pozo y componente. Como puede observarse, los factores

Pozo	Componente	D_{amp} [m ² /d]	D_{ϕ} [m ² /d]	FH [–]
37P	M2	138491.3	10518.2	3.63
37P	O1	56193.5	60489.9	0.96
37F	M2	5916	412.7	3.8
37F	O1	22165.7	2474.3	3

Tabla 4.11. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo 37P) y superficial (pozo 37F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.

de heterogeneidad correspondientes al acuífero superficial son muy altos. Eso significa que, en ambos casos, se estimó mediante atenuación un mayor valor de

difusividad hidráulica que mediante desfasaje. En cuanto al acuífero Puelche, la componente O1 presenta un factor de heterogeneidad muy próximo a la unidad, mientras que el factor de heterogeneidad correspondiente a la componente M2 es bastante mayor a la unidad. En la Tabla (4.12) se listan las estimaciones de conductividad hidráulica para cada una de las componentes y su correspondiente factor de heterogeneidad.

Pozo	Componente	K_s [m/d] (Atenuación)	K_s [m/d](Desfasaje)	FH[-]
37P	M2	38.2	2.9	3.63
37P	O1	15.5	16.7	0.96
37F	M2	2.4	0.17	3.8
37F	O1	9.1	1	3

Tabla 4.12. Estimaciones de conductividad hidráulica para la locación Puente La Noria.

Para encontrar un valor de conductividad hidráulica representativo de la marea inducida se procede a utilizar la expresión (4.1) para calcular un promedio pesado de las estimaciones. Para el caso del acuífero Puelche, el valor de conductividad hidráulica promedio es de 17.1 m/d. Este valor se encuentra dentro del rango obtenido por Auge (2001) para las arenas Puelches. En cuanto al acuífero superficial, el valor de conductividad promedio es de 3.4 m/d. Este valor resulta demasiado alto para los sedimentos Postpampeanos en la cuenca Matanza-Riachuelo. De todas formas, según el perfil litológico, este pozo tiene la particularidad de alcanzar la base de conchillas existente en los sedimentos Postpampeanos. Esto produce una estimación de conductividad hidráulica mayor a la que existiría si solo se perforaran arcillas. De todas formas, ambos valores del factor de heterogeneidad para el Postpampeano son muy altos, evidenciando un alto grado de heterogeneidad.

4.2. Región costera del Gran La Plata

Para las locaciones ubicadas en la planicie costera del Río de La Plata (ver Fig. (1.6)) se utiliza la señal mareográfica correspondiente al Puerto La Plata como fuente de marea inducida. En este caso, las señales piezométricas correspondientes a los pozos de monitoreo fueron adquiridas por miembros del grupo perteneciente al Proyecto de Investigación “Dinámica del Acuífero Puelche en la Planicie Costera del Río de La Plata”.

En la Fig. (4.12) se ilustra el registro mareográfico correspondiente a la estación Puerto La Plata junto a su espectro de amplitud en función del período. Con el objetivo de visualizar más claramente la información que brinda el espectro, el eje de las abscisas está en escala logarítmica. Las componentes de la

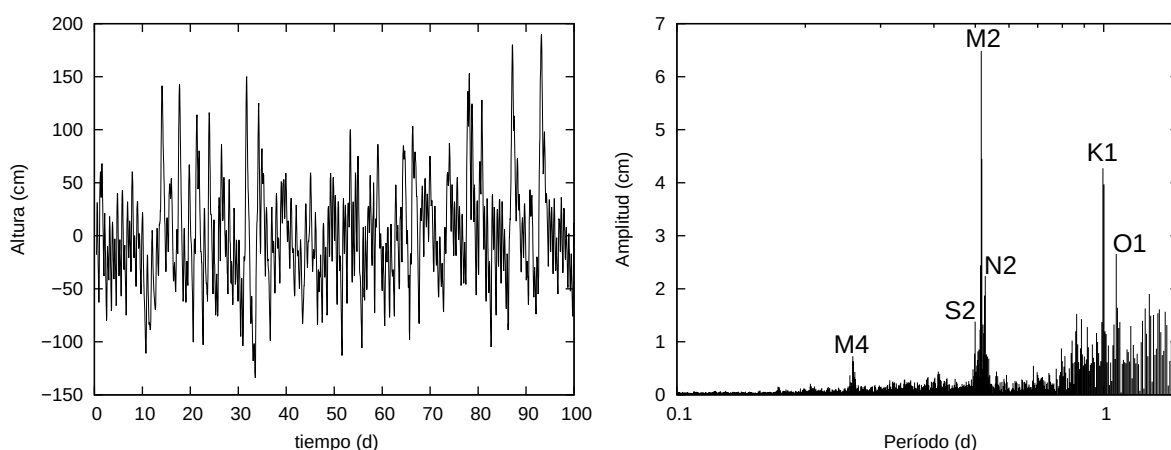


Figura 4.12. Señal mareográfica correspondiente a la estación Puerto La Plata y su espectro de amplitud.

marea M2, N2, K1, O1, M4 y S2 son las que más se destacan en el espectro. En la Tabla (4.13) se presentan las amplitudes y fases de la marea para estas componentes principales.

Componente	Frec. [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
M2	12.141	6.5	2.68
N2	11.911	2.24	1.44
K1	3.302	4.3	-2
O1	5.84	2.66	0.25
M4	24.283	0.73	-3
S2	12.566	1.4	-2

Tabla 4.13. Amplitud y fase de las componentes M2, N2, K1, O1, M4 y S2 de la marea en Puerto La Plata.

La señal mareográfica será extrapolada a las distintas locaciones teniendo en

cuenta la velocidad de la onda de marea de 20 Km/h calculada mediante las estaciones mareográficas Puerto de Buenos Aires y San Fernando. En este caso, no se tiene un segundo registro mareográfico para efectuar una corrección de amplitud.

4.2.1. Locación Parque Industrial Berisso

En esta locación se cuenta con dos pozos, PIB-P y PIB-F que perforan el acuífero Puelche y el acuífero superficial, respectivamente. En las Figs. (4.13) y (4.14) se ilustran las señales de ambos pozos y sus espectros de amplitud en función del período para identificar las componentes predominantes.

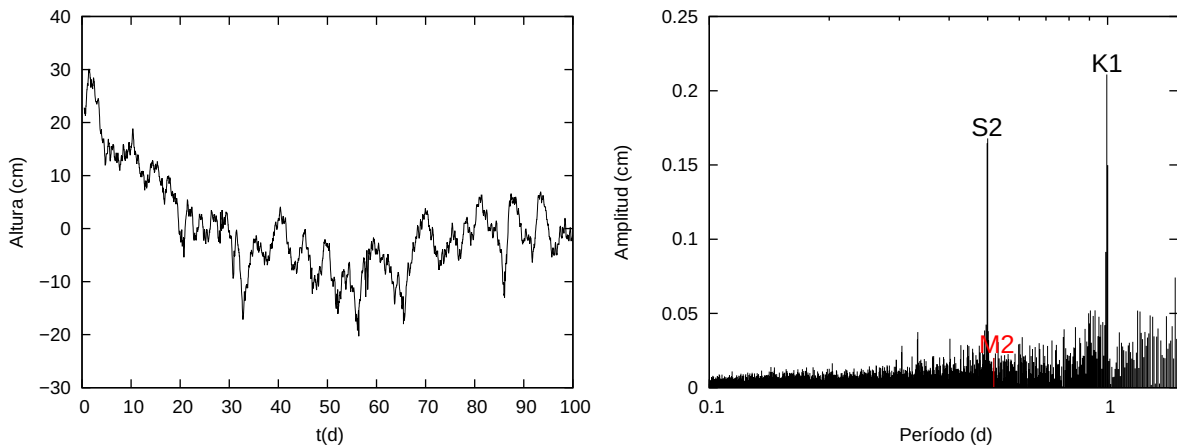


Figura 4.13. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo PIB-P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.

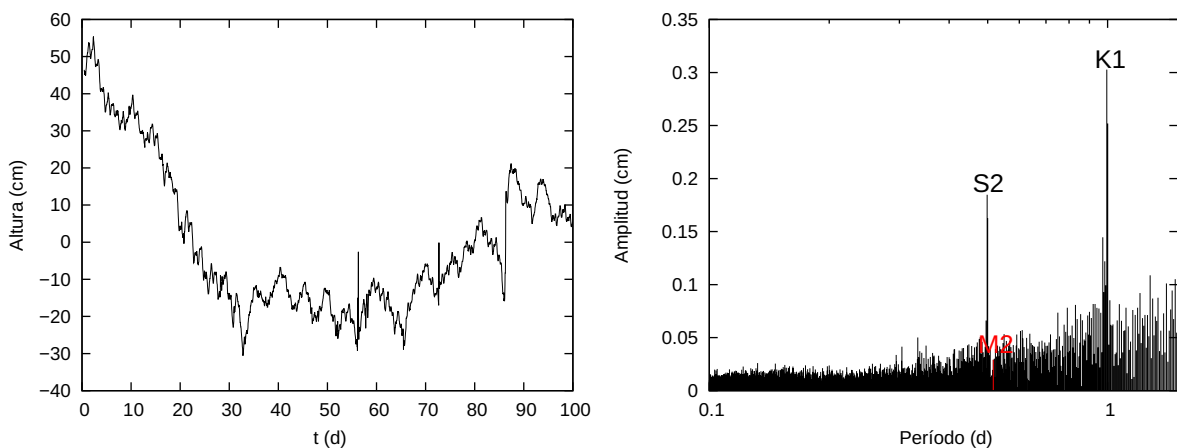


Figura 4.14. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo PIB-F (acuífero superficial) y su espectro de amplitud.

En esta locación vemos que las componentes de marea que predominan en los espectros de ambos pozos son la S2 y la K1. A pesar de estar enmascaradas,

en las figuras se resalta en rojo la componente M2, que es la componente predominante de la marea. En la Tabla (4.14) se muestran las amplitudes y las fases de las señales piezométricas correspondientes a los pozos PIB-P y PIB-F para las componentes mencionadas. Un elemento a tener en cuenta en esta locación

Pozo	Componente	Frec.[rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
PIB-P	S2	12.566	0.017	-0.6
PIB-P	M2	12.141	0.02	-0.72
PIB-P	K1	5.84	0.21	-0.024
PIB-F	S2	12.566	0.016	-0.76
PIB-F	M2	12.141	0.03	1.27
PIB-F	K1	5.84	0.3	-0.26

Tabla 4.14. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos PIB-P y PIB-F.

es que los pozos se encuentran a unos 440 m aproximadamente de dos arroyos que bordean la Av. Río de La Plata y a 3.5 Km del Río de La Plata. Es fácil comprobar que la marea inducida observada en esta locación no podría deberse a la marea en el Río de La Plata ya que la distancia que separa el río de los pozos es muy grande. Si se tomara como distancia los 3500 m que separan los pozos del Río de La Plata, obtendríamos valores de conductividad hidráulica extremadamente altos, del orden de 1000 m/d. Este simple análisis permite concluir que la marea inducida observada es debido al arroyo que bordea la Av. Río de La Plata.

En la Tabla (4.15) se presentan las estimaciones de difusividad hidráulica realizadas para los pozos PIB-P y PIB-F y los valores del factor de heterogeneidad utilizando las componentes de marea mencionadas. Para realizar las estimaciones correspondientes al acuífero Puelche se utilizaron las expresiones (2.12) y (2.13). Puede observarse en la Tabla (4.15) que las difusividades hidráulicas son del mismo orden en las tres componentes de ambos pozos y se obtienen valores de factor de heterogeneidad que no se apartan demasiado de 1. Las difusividades obtenidas para los sedimentos Postpampeanos (PIB-F) difieren significativamente de las obtenidas en la cuenca Matanza-Riachuelo. Esta discrepancia se atribuye a que, como se mencionó anteriormente, en esta locación el acuífero Postpampeano está constituido por sedimentos de tipo areno-gravosos que poseen mayor permeabilidad (ver Fig. (1.2)).

En la Tabla (4.16) se listan las estimaciones de conductividad hidráulica obtenidas mediante atenuación y desfase y los correspondientes valores de factor de heterogeneidad. Las conductividades hidráulicas estimadas para el acuífero

Pozo	Componente	D_{amp} [m ² /d]	D_{ϕ} [m ² /d]	FH
PIB-P	S2	594894.2	281326	1.45
PIB-P	M2	45548.3	84321.7	0.73
PIB-P	K1	113962.7	178353.6	0.8
PIB-F	S2	570390	242561.9	1.53
PIB-F	M2	40753.7	57116.1	0.84
PIB-F	K1	86678.5	28076.6	1.76

Tabla 4.15. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo PIB-P) y superficial (pozo PIB-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.

superficial fueron realizadas con el valor de almacenamiento específico correspondiente a una mayor granulometría, como se especificó en el Capítulo 2.

Pozo	Componente	K_s [m/d] (Atenuación)	K_s [m/d] (Desfase)	FH
PIB-P	S2	164.2	77.6	1.45
PIB-P	M2	12.6	23.3	0.73
PIB-P	K1	31.5	49.2	0.8
PIB-F	S2	157.4	66.9	1.53
PIB-F	M2	15.6	21.9	0.84
PIB-F	K1	33.3	10.8	1.76

Tabla 4.16. Estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Puelche (pozo PIB-P) y superficial (pozo PIB-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.

Para obtener un valor representativo de conductividad hidráulica para cada formación utilizamos la Ec. (4.1). Para el acuífero Puelche la conductividad hidráulica promedio resulta de 57.9 m/d y se encuentra cercana al límite superior obtenido por Auge (Auge, 2005). En cuanto al acuífero superficial, la conductividad hidráulica toma un valor de 49.2 m/d. Este valor resulta alto debido a que los Sedimentos Postpampeanos presentan una granulometría gravosa en esta zona.

4.2.2. Locación Astillero

En la locación Astillero se tienen datos de los pozos AS-F y AS-P que perforan respectivamente los acuíferos superficial y Puelche. En esta locación el acuífero Postpampeano está conformado por sedimentos limo-arenosos, más finos que en Parque Industrial Berisso (ver Fig. (1.2)). En las Figs. (4.15) y (4.16) se ilustran las señales y sus correspondientes espectros de amplitud.

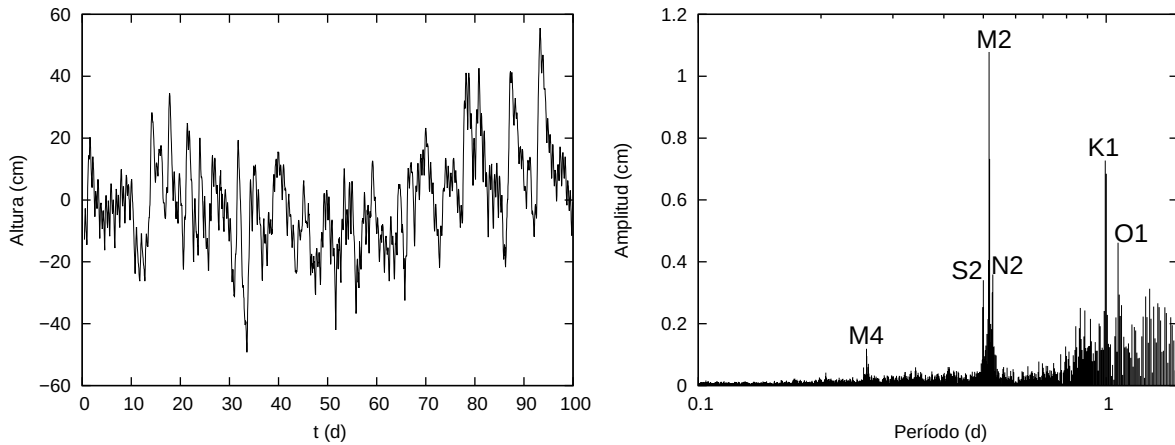


Figura 4.15. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo AS-P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.

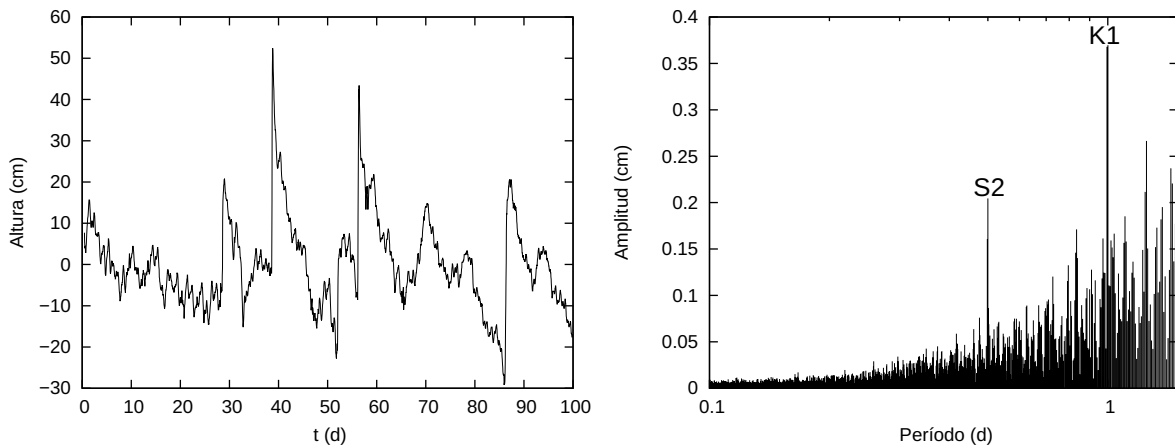


Figura 4.16. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo AS-F (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.

En el espectro correspondiente al acuífero Puelche (AS-P) ilustrado en la Fig. (4.15), todas las componentes características predominantes en la marea también se destacan en la marea inducida. En cuanto al espectro correspondiente a los sedimentos Postpampeanos (AS-F) se destaca una componente semi-diurna (S2) y una componente diurna (K1). En la Tabla (4.17) se presentan las amplitudes y fases de los pozos involucrados.

Las difusividades hidráulicas se calculan considerando los 60 m que separan los pozos del canal interno del río Santiago. En la Tabla (4.18) se listan las estimaciones de difusividad hidráulica y los factores de heterogeneidad para las componentes correspondientes a cada pozo de la locación Astillero. Los valores de factor de heterogeneidad son menores a la unidad en todas las componentes del pozo AS-P, exceptuando a M4, y en ambas componentes del pozo AS-F. Valores del factor de heterogeneidad menores a uno indican que las estimacio-

Pozo	Componente	Frec. [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
AS-P	M2	12.141	1.1	2.9
AS-P	N2	11.911	0.36	1.7
AS-P	O1	5.84	0.46	0.58
AS-P	K1	3.302	0.73	-1.5
AS-P	M4	24.283	0.12	-0.7
AS-P	S2	12.566	0.34	-1.31
AS-F	S2	12.566	0.2	-0.8
AS-F	K1	3.302	0.37	-0.1

Tabla 4.17. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos AS-P y AS-F.

Pozo	Componente	D_{amp} [m ² /d]	D_{ϕ} [m ² /d]	FH[-]
AS-P	M2	18853.6	366068.6	0.23
AS-P	N2	16752	313610.5	0.23
AS-P	O1	9510.3	97060.1	0.31
AS-P	K1	9927.2	37358.8	0.52
AS-P	M4	35570.1	8262.3	2.1
AS-P	S2	43754.7	47509.9	0.96
AS-F	S2	5973.6	16201.2	0.61
AS-F	K1	1900	3351.5	0.75

Tabla 4.18. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo AS-P) y Postpampeano (pozo AS-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.

nes efectuadas mediante atenuación son menores que las realizadas mediante desfase. El hecho de considerar que el canal interno del río Santiago presenta las mismas amplitudes que las observadas en la estación mareográfica Puerto La Plata podría conducir a una subestimación de la difusividad hidráulica mediante amplitud. En la Tabla (4.19) se presentan las estimaciones de conductividad hidráulica realizadas para las componentes estudiadas. Para obtener un valor representativo de conductividad hidráulica para cada acuífero se realiza un promedio pesado utilizando la Ec. (4.1). Para el acuífero Puelche, el valor de conductividad hidráulica resultante es de 16.7 m/d. Este valor es consistente con el rango de valores determinado por Auge (2001) de 9-57 m/d para las arenas Puelches. Si se realiza un promedio de los valores de conductividad hidráulica obtenidas mediante desfase, se obtiene una estimación de 40 m/d, algo más cercana al promedio de 33 m/d obtenido por Auge (2001). En cuanto al acuífero Postpampeano, se obtiene un valor promedio de 2.5 m/d. Este valor es menor de lo encontrado en Parque Industrial Berisso, pero es consistente con la granu-

Pozo	Componente	K_s [m/d] (Atenuación)	K_s [m/d] (Desfasaje)	FH[-]
AS-P	M2	5.2	101	0.23
AS-P	N2	4.6	86.6	0.23
AS-P	O1	2.6	26.8	0.31
AS-P	K1	2.7	10.3	0.52
AS-P	M4	9.8	2.3	2.1
AS-P	S2	12.1	13.1	0.96
AS-F	S2	2.3	6.2	0.61
AS-F	K1	0.73	1.3	0.75

Tabla 4.19. Estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Puelche (pozo AS-P) y Postpampeano (pozo AS-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad ya presentado.

lometría limo-arenosa que presenta la formación Postpampeano en esta locación (Latorre y Moret-Fernández, 2019).

4.2.3. Locación ATULP

En la locación ATULP se tiene información de dos pozos, ATULP-P y ATULP-F, que perforan el acuífero Puelche y superficial, respectivamente. Estos pozos se encuentran a 60 m del Río de La Plata. En las Figs. (4.17) y (4.18) se ilustran las señales medidas en los pozos y sus respectivos espectros de amplitud. Como

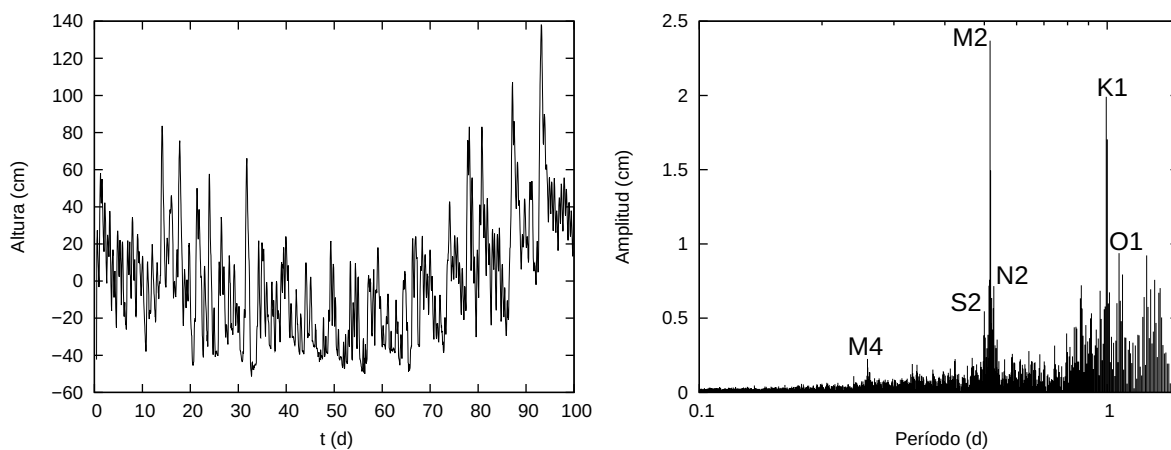


Figura 4.17. Señal de altura piezométrica correspondiente al pozo ATULP-P (acuífero Puelche) y su espectro de amplitud.

puede observarse, el espectro correspondiente al acuífero Puelche ilustrado en la Fig. (4.17) posee amplitudes significativas en las 6 componentes características identificadas en la marea. En cuanto al acuífero superficial, sólo las componentes M2, K1, O1 y M4 se pueden identificar en el espectro. En la Tabla (4.20) se

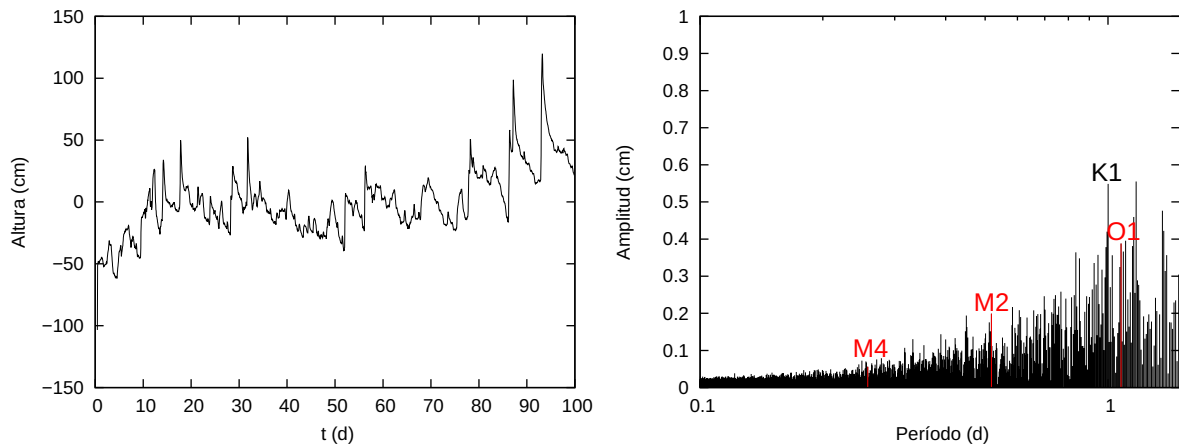


Figura 4.18. Señal de altura hidráulica correspondiente al pozo ATULP-F (sedimentos Postpampeanos) y su espectro de amplitud.

listan las amplitudes y fases de las componentes de marea inducida identificadas en ambos pozos.

Pozo	Componente	Frec. [rad/d]	Amplitud [cm]	Fase [rad]
ATULP-P	M2	12.141	2.37	2.87
ATULP-P	N2	11.911	0.72	1.64
ATULP-P	O1	5.84	0.94	-1.45
ATULP-P	K1	3.302	1.99	-1.76
ATULP-P	M4	24.283	0.23	0.68
ATULP-P	S2	12.566	0.54	-1.65
ATULP-F	M2	12.141	0.2	-2.1
ATULP-F	O1	5.84	0.39	1.5
ATULP-F	K1	3.302	0.55	0.03
ATULP-F	M4	24.283	0.06	0.23

Tabla 4.20. Amplitud y fase de las componentes principales de marea inducida correspondientes a los pozos ATULP-P y ATULP-F.

En la Tabla (4.21) se detallan las estimaciones de difusividad hidráulica realizadas para las componentes listadas en la Tabla (4.20) incluyendo los valores del factor de heterogeneidad correspondiente. Como puede observarse, los valores de factor de heterogeneidad son mayores a 1, exceptuando la componente O1 del pozo ATULP-F. Esto significa que las estimaciones realizadas con datos de desfase son menores a las obtenidas con datos de atenuación. En la Tabla (4.22) se listan los valores de conductividad hidráulica estimados para esta locación.

Para obtener un valor representativo de conductividad hidráulica de las distintas formaciones integrando la información de las componentes destacadas se utiliza la Ec. (4.1). La componente K1 correspondiente al acuífero Puelche se

Pozo	Componente	$D_{amp}[\text{m}^2/\text{d}]$	$D_{\phi}[\text{m}^2/\text{d}]$	FH[-]
ATULP-P	M2	227570.5	76305.9	1.73
ATULP-P	N2	111509.3	75694.9	1.21
ATULP-P	O1	89362.6	4470.5	4.5
ATULP-P	K1	2064635.8	52343	6.3
ATULP-P	M4	208356.7	25105.9	2.9
ATULP-P	S2	344133.7	46497.3	2.7
ATULP-F	M2	1809.7	1095.5	1.29
ATULP-F	K1	2706.2	2234.1	1.1
ATULP-F	O1	2867.4	5298.8	0.74
ATULP-F	M4	7021.1	4197.6	1.29

Tabla 4.21. Difusividades hidráulicas estimadas mediante atenuación y desfase para los acuíferos Puelche (pozo ATULP-P) y superficial (pozo ATULP-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad correspondiente.

Pozo	Componente	$K_s[\text{m}/\text{d}]$ (Atenuación)	$K_s[\text{m}/\text{d}]$ (Desfase)	FH[-]
ATULP-P	M2	62.8	21.1	1.73
ATULP-P	N2	30.8	20.9	1.21
ATULP-P	O1	24.7	1.23	4.5
ATULP-P	K1	569.8	14.4	6.3
ATULP-P	M4	57.5	6.9	2.9
ATULP-P	S2	95	20.9	2.7
ATULP-F	M2	0.7	0.4	1.29
ATULP-F	K1	1	0.9	1.1
ATULP-F	O1	1.1	2	0.74
ATULP-F	M4	2.7	1.6	1.29

Tabla 4.22. Estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Puelche (pozo ATULP-P) y superficial (pozo ATULP-F) para las componentes características. Se incluye el factor de heterogeneidad ya presentado.

excluye del promedio porque presenta un valor de conductividad hidráulica mediante atenuación extremadamente alto. De esta forma, se obtiene una estimación de conductividad hidráulica de 32.8 m/d para el Puelche. Este valor es prácticamente igual al valor medio de 33 m/d determinado por Auge (2001) mediante ensayos de bombeo. En cuanto al acuífero Postpampeano, el valor promedio calculado es de 1.3 m/d, lo que resulta consistente con la litología de los sedimentos que conforman el acuífero superficial en esta zona (Latorre y Moret-Fernández, 2019).

4.3. Variante del método de marea inducida

En esta sección se presenta una variante del método de marea inducida para la estimación de difusividad hidráulica. Esta variante consiste en la utilización de señales de marea inducida medidas en dos pozos, de manera que se prescinde del dato mareográfico. El hecho de no utilizar una señal mareográfica constituye una importante ventaja en relación al método convencional de marea inducida. Por un lado, se evita la instalación de una estación mareográfica o, en caso de existir un mareógrafo en la región, se evita la extrapolación del dato mareográfico. Además, en la variante propuesta no es necesario medir la distancia a la línea de costa, cuyo valor resulta difícil de determinar ya que puede variar con la marea.

En la Fig. (4.19) se presenta el modelo conceptual considerado que consiste en un acuífero en contacto hidráulico con un cuerpo de agua superficial en el que se encuentran dos perforaciones ubicadas a distintas distancias de la costa, alineadas de manera perpendicular a la línea de costa.

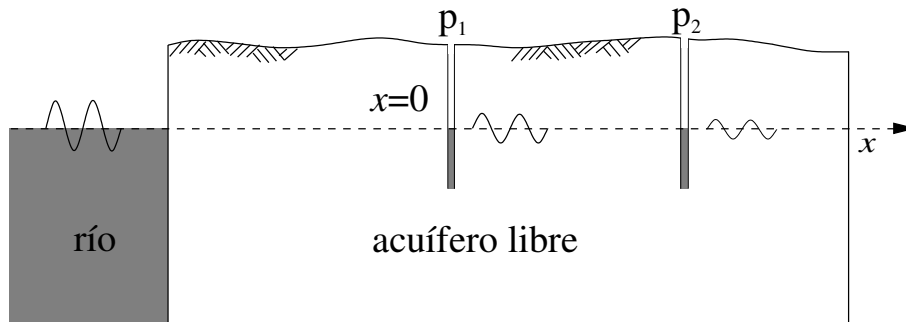


Figura 4.19. Representación esquemática de un acuífero libre con dos perforaciones y sus niveles freáticos.

El problema diferencial que debe resolverse está dado por las Ecs. (1.1) y (1.2). Como condición de borde se utilizan las siguientes expresiones:

$$h(0, t) = P_1(t), \quad (4.3)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad (4.4)$$

donde $P_1(t)$ representa la señal de variación hidráulica medida en el pozo P_1 . El sistema diferencial considerado es análogo al presentado en la introducción [(1.1)-(1.5)], con la salvedad de que, en este caso, se considera como origen del eje x el pozo más cercano a la costa (P_1) siendo la condición de borde la marea inducida en dicho pozo. Para utilizar la variante propuesta es necesario considerar la distancia que existe entre los dos pozos. La estimación de difusividad

hidráulica puede realizarse extrayendo la amplitud y la fase correspondiente a una componente predominante de la marea en las señales medidas en ambos pozos, tal como se hizo en este Capítulo, o considerando algún evento particularmente influyente en el registro temporal de las señales hidráulicas.

Esta metodología alternativa fue aplicada a las señales medidas en los pozos 8C y 8D de la locación Viñedos para la estimación de la difusividad hidráulica del acuífero freático. En estos pozos las componentes características de marea están fuertemente atenuadas (ver Figs. 4.4 y 4.5). El hecho de no poder comparar los espectros de amplitud de los pozos con el espectro de amplitud de la señal mareográfica fue la motivación para diseñar esta nueva metodología. Teniendo en cuenta que, como se analizó en el Capítulo 3, el acuífero superficial es sensible a fenómenos extremos como bajantes o Sudestadas que se manifiestan a lo largo de algunos días, pueden utilizarse registros de estos eventos para realizar una estimación de difusividad hidráulica. La ventaja que presenta la utilización de eventos extremos es que, al tener componentes de menor frecuencia, se propagan a mayor distancia de la costa.

A partir de la resolución numérica del problema diferencial mediante un procedimiento híbrido mixto de elementos finitos implementado en lenguaje Fortran (Cuello, 2014; Cuello *et al.*, 2014b; Guarracino *et al.*, 2014) es posible representar las variaciones de altura hidráulica producidas por una señal de borde con un amplio contenido espectral. La representación numérica de la señal generada por el pozo P_1 a una determinada distancia es comparada con la marea inducida medida en el pozo P_2 . Mediante una búsqueda exhaustiva puede estimarse el valor de difusividad hidráulica que minimiza la norma L2 entre la señal observada en P_2 y la señal numérica generada por las fluctuaciones medidas en P_1 .

Para realizar la estimación de difusividad hidráulica se utiliza un evento de Sudestada ocurrida los primeros días de abril del año 2016, registrado en los pozos 8C y 8D de la locación Viñedos, que se encuentran separados 37 m. Las series temporales comienzan el 31 de marzo de 2016 y tienen una longitud de 14 días. En la Fig. (4.20) podemos observar las señales correspondientes a los pozos 8C, 8D y el ajuste realizado. El valor de difusividad hidráulica que minimiza la norma L2 entre la señal numérica y la señal del pozo 8C es $D_h = 2056 \text{ m}^2/\text{d}$.

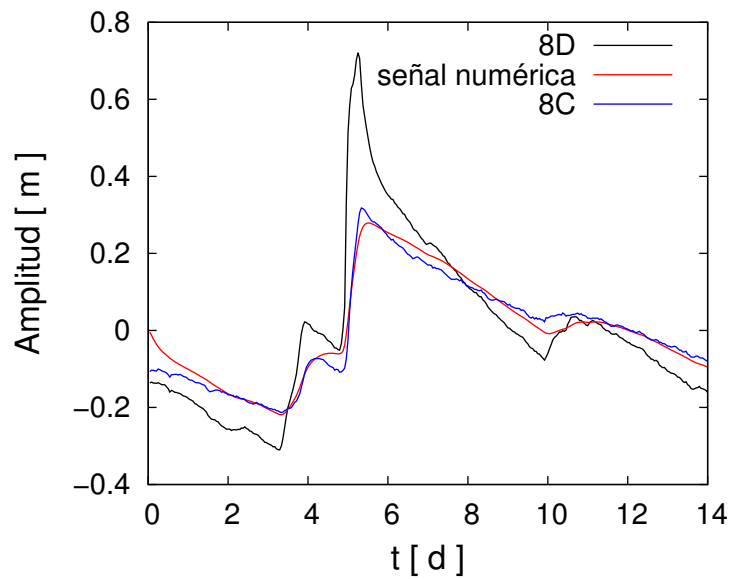


Figura 4.20. Registro de Sudestada que comienza el día 31 de marzo de 2016 y ajuste realizado para una difusividad hidráulica de $2056 \text{ m}^2/\text{d}$.

Como puede observarse, el ajuste resulta muy bueno y permite representar satisfactoriamente los datos observados en el pozo 8C. Considerando el valor de almacenamiento específico correspondiente al acuífero superficial en la cuenca Matanza-Riachuelo ($4.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$), se puede estimar un valor de conductividad hidráulica. El valor estimado es $K_s = 0.84 \text{ m/d}$ y se aproxima al límite superior del rango de valores determinado por Auge (2004) para los sedimentos Postpampeanos. La metodología propuesta en esta sección fue presentada en la XXVIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas (AAGG 2017) (Cuello y Guarracino, 2017).

4.4. Integración de resultados

En esta sección se realiza una breve integración de los resultados obtenidos aplicando el método de marea inducida a los datos presentados en el Capítulo 3. Las caracterizaciones hidráulicas efectuadas en los acuíferos de la región han sido satisfactorias, obteniéndose estimaciones de conductividad hidráulica para los acuífero Paraná, Puelche y los sedimentos Postpampeanos en la región costera de Ensenada-Berisso y en la región de la cuenca Matanza-Riachuelo. En estas dos zonas los sedimentos Postpampeanos que constituyen el acuífero freático presentan litologías marcadamente distintas lo que conduce a comportamientos hidrogeológicos diferentes. En la Tabla (4.23) se listan las estimaciones de las conductividades hidráulicas obtenidas para el acuífero Postpampeano en las locaciones Parque Industrial Berisso, Astillero y ATULP.

Locación	K_s promedio [m/d]
PIB	49.2
Astillero	2.5
ATULP	1.3

Tabla 4.23. Estimaciones de conductividad hidráulica promedio para el acuífero superficial en la planicie costera del Gran La Plata.

Estos valores resultan consistentes con la información geológica de cada locación. Como se observa en las Figs. (1.2) y (1.6), la locación Parque Industrial Berisso se encuentra emplazada sobre sedimentos areno-gravosos por lo que su conductividad hidráulica es mayor que la estimada en las locaciones ATULP y Astillero, que se encuentran sobre sedimentos limo-arenosos. En esta región, los sedimentos Postpampeanos se comportan como un acuífero de baja y media productividad. El promedio de estimaciones arroja un valor de 17.7 m/d.

En cuanto a los sedimentos Postpampeanos en la cuenca Matanza-Riachuelo, los valores de conductividad hidráulica estimados se sintetizan en la Tabla (4.24).

Locación	K_s promedio [m/d]
Viñedos	0.84
Club Regatas Avellaneda	0.16
Puente La Noria	3.4

Tabla 4.24. Estimaciones de conductividad hidráulica promedio para el acuífero superficial en la cuenca Matanza-Riachuelo.

Los valores correspondientes a Viñedos y Club Regatas Avellaneda corresponden a sedimentos limo arcillosos, mientras que el valor correspondiente a Puente

La Noria es mayor. El pozo que perfora el acuífero superficial en la locación Puente La Noria (37F) alcanza las conchillas que se encuentran en la base de los sedimentos Postpampeanos, produciendo una estimación de conductividad hidráulica más alta de lo esperado para sedimentos limoarcillosos. Los sedimentos Postpampeanos se comportan como un acuitardo en esta región, exceptuando el valor obtenido en Puente La Noria. El valor promedio de las estimaciones obtenidas para el Postpampeano en la cuenca Matanza-Riachuelo es de 1.47 m/d.

En cuanto al acuífero Puelche, que es el de mayor relevancia por ser la principal fuente de abastecimiento de toda la región, los valores de conductividad hidráulica obtenidos en las distintas locaciones se resumen en la Tabla (4.25).

Locación	K_s promedio [m/d]
Viñedos	37.5
Puente La Noria	17.1
PIB	57.9
Astillero	16.7
ATULP	32.8

Tabla 4.25. Estimaciones de conductividad hidráulica promedio para el acuífero Puelche en ambas regiones de estudio.

Los valores estimados de conductividad hidráulica son satisfactorios. El promedio general de los valores es de 32.4 m/d, lo que resulta una excelente estimación representativa de las arenas Puelches en la región. Recordemos que Auge (2001) calculó mediante ensayos de bombeo valores de conductividad hidráulica de entre 9 y 57 m/d para las arenas Puelches.

El valor estimado para el acuífero Paraná es de 16.2 m/d lo que resulta consistente con la información litológica ya que dicho acuífero presenta una mayor proporción de limos (Auge, 2005), dando lugar a una conductividad algo menor que la correspondiente a las arenas Puelches.

4.5. Conclusiones

En este Capítulo se realizaron estimaciones de los parámetros hidráulicos a partir de datos adquiridos durante el desarrollo de los Proyectos de Investigación “Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo” y “Dinámica del Acuífero Puelche en la Planicie Costera del Río de La Plata”. Para llevar a cabo la estimación de la conductividad hidráulica en cada locación se calcularon los espectros de amplitud y fase de las señales mareográficas y piezométricas, y se identificaron las componentes predominantes en cada pozo. En primer lugar se promediaron los valores estimados mediante amplitud y desfase para cada componente. Luego, se realizó un promedio ponderado entre los valores de conductividad hidráulica correspondientes a cada componente utilizando el factor de heterogeneidad como peso. Cabe destacar que se obtuvieron valores de factor de heterogeneidad mayormente distintos a 1, lo que implica que los acuíferos presentan algún apartamiento de las condiciones de homogeneidad consideradas. A pesar de la dificultad que conlleva el trabajo con datos reales, se han podido caracterizar hidráulicamente los acuíferos Postpampeano y Puelche, obteniéndose valores de conductividad hidráulica dentro del rango determinado por Auge para dichas formaciones (Auge, 2001; Auge *et al.*, 2002; Auge, 2004, 2005). También se ha obtenido un valor de conductividad hidráulica para el acuífero Paraná, lo que constituye en sí una novedad y un aporte a la hidrogeología de la región. Cabe remarcar que esto ha sido realizado utilizando una metodología no invasiva que permite estudiar los parámetros hidráulicos de acuíferos costeros utilizando señales naturales, sin perturbar el flujo de los acuíferos y sin necesidad de extraer grandes volúmenes de agua. Estas características hacen del método de marea inducida una excelente alternativa a los ensayos de bombeo. Otra ventaja que presenta el método de marea inducida es que los valores obtenidos tienen un carácter regional, más representativo del acuífero.

Asimismo, se ha presentado una variante del método de marea inducida para la estimación de difusividad hidráulica que utiliza dos pozos de monitoreo pero que nos permite prescindir de los datos mareográficos, lo que resulta una gran ventaja debido a que la instalación de estaciones mareográficas es una tarea compleja y la medición de la distancia a la línea de costa acarrea errores debido a su variabilidad. La alternativa presentada se aplicó en la locación Viñedos donde se tienen señales de marea meteorológica (Sudestada) inducida en el acuífero superficial. La motivación surgió al analizar la atenuación que presentaban las componentes de alta frecuencia en los pozos y la dificultad que suponía la comparación de sus espectros con el de la señal mareográfica. Para estos pozos se

realizó entonces una estimación de difusividad hidráulica utilizando el registro temporal completo de una Sudestada, a diferencia del resto de los pozos en donde se trabajó con componentes predominantes. El valor de conductividad hidráulica estimado se encuentra próximo al límite superior obtenido por Auge (2004) y permite representar adecuadamente la señal de marea inducida observada en el pozo más alejado de la costa.

Capítulo 5

Nuevas Soluciones Analíticas

Las soluciones analíticas presentadas en el Capítulo 2 sentaron las bases del estudio de la marea inducida y han sido profusamente utilizadas para la estimación de los parámetros hidráulicos de acuíferos costeros. A partir de dichos trabajos han surgido un gran número de soluciones analíticas que tuvieron como objetivo analizar el fenómeno de marea inducida en modelos más complejos que los utilizados por Jacob (1950) y van der Kamp (1972).

La mayoría de las soluciones analíticas presentes en la bibliografía asumen una única capa acuífera o un sistema de acuíferos compuestos por dos o más capas de geometría simple. Li y Jiao (2001) estudiaron el efecto del almacenamiento en un sistema acuífero conformado por un acuífero confinado cubierto por una capa semi-permeable que termina en la costa. Li *et al.* (2008) resolvieron el mismo problema para un sistema acuífero que se extiende infinitamente debajo del mar. Geng *et al.* (2009) consideraron un acuífero confinado que se extiende debajo del mar una distancia finita y está cubierto en esa zona por una delgada capa. Guarracino *et al.* (2012) analizaron el efecto mecánico de la marea inducida en acuíferos costeros que se extienden una distancia finita debajo del mar. En cuanto a la introducción de heterogeneidades en el acuífero, se han utilizado básicamente tres enfoques (Cuello *et al.*, 2017). El primer enfoque consiste en dividir al acuífero en regiones homogéneas dando lugar a un acuífero heterogéneo. Este enfoque se denomina “modelo de sub-regiones” (Wang *et al.*, 2015). Por ejemplo, Trefry (1999) presentó una solución para un acuífero que consiste en un número arbitrario de zonas homogéneas y contiguas sujetas a una condición de borde sinusoidal. Guo *et al.* (2010) derivaron una solución analítica para un acuífero constituido por dos zonas homogéneas contiguas y ajustó una serie de datos observados correspondientes a un acuífero costero heterogéneo en Dongzhai Harbor, China. El segundo enfoque consiste en la utilización de una función continua para describir la variación espacial de las propiedades hidráu-

licas del acuífero. Por ejemplo, Monachesi y Guarracino (2011) y Guarracino y Monachesi (2014) derivaron soluciones analíticas para acuíferos aluviales donde la conductividad hidráulica aumenta linealmente y cuadráticamente con la distancia a la costa. El tercer enfoque considera campos aleatorios estadísticamente estacionarios y puede proporcionar estimaciones de la correlación y varianza de la transmisividad del acuífero o de las distribuciones de conductividad (Trefry *et al.*, 2011).

Todos los trabajos mencionados asumen que el acuífero (o el sistema acuífero) posee un espesor constante. Esta hipótesis no es siempre válida, ya que en numerosos trabajos se han reportado variaciones en el espesor de los acuíferos (Masterson *et al.*, 2015; Refsgaard, 1997; Okuyama *et al.*, 2002; Leray *et al.*, 2012; Rotzoll *et al.*, 2013; Masterson *et al.*, 2015) y se ha demostrado que el efecto de la variación de espesor puede ser significativo (Hantush, 1962a,b,c). Cabe destacar que no existen soluciones analíticas para el estudio de la marea inducida que contemplen variaciones en el espesor del acuífero. Esta característica se da en numerosos escenarios ya que el patrón depositacional de sedimentos, la topografía predeposicional y la erosión post-deposicional puede dar lugar a un aumento o disminución en el espesor del acuífero. Por ejemplo, en islas volcánicas o en costas con basamento cristalino a poca profundidad, los sedimentos pueden depositarse cerca de la costa formando acuíferos acuñaos. Estos acuíferos tienen una longitud finita y un espesor que aumenta con la distancia a la costa (Rotzoll *et al.*, 2013; Trapp, 1992)).

En este Capítulo se presentan soluciones analíticas para describir el fenómeno de marea inducida que introducen la novedad de considerar variaciones en el espesor del acuífero. En primer lugar se deriva una solución analítica para estudiar la marea inducida en un acuífero costero y confinado cuyo espesor presenta un decrecimiento cuadrático con la distancia a la línea de costa. La ley cuadrática constituye un escenario intermedio entre las leyes lineal y exponencial propuestas por Hantush (1962a). En segundo lugar se deriva una solución analítica general para acuíferos acuñaos siendo la primera solución presentada un caso particular de esta solución. Para definir el acuñaamiento se establece el espesor del acuífero en la costa y el espesor del acuífero en el extremo opuesto, considerando una transición cuadrática entre ambos extremos. De esta manera es posible modelar acuíferos cuyo espesor aumenta o disminuye con la distancia a la costa, pudiendo así representar un amplio espectro de geometrías complejas para el estudio de la marea inducida. La primera solución ha sido publicada en la revista *Hydrogeology Journal* (Cuello *et al.*, 2017), así como en un Congre-

so de Hidrogeología (Cuello y Guarracino, 2018), y la segunda solución está en proceso de revisión en Hydrological Processes (Cuello y Guarracino, 2020).

5.1. Acuñaamiento tierra adentro

Para estudiar el efecto de la variación del espesor de los acuíferos costeros en la marea inducida, se considera el modelo conceptual que se ilustra en la Fig. (5.1). El acuífero está confinado, en contacto hidráulico con el cuerpo de agua superficial, y se encuentra acuñaado en dirección tierra adentro. Tiene una longitud finita y su espesor decrece hasta anularse a una distancia L de la costa.

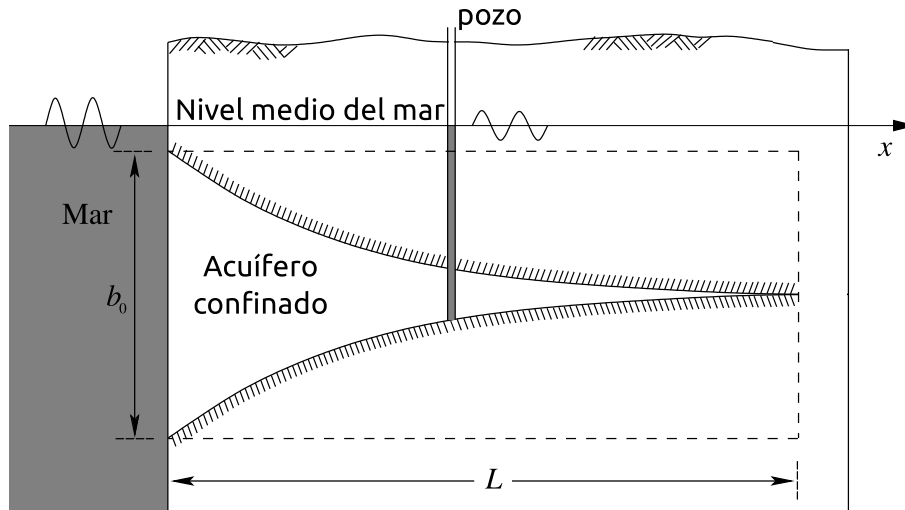


Figura 5.1. Perfil esquemático de un acuífero costero acuñaado y de un acuífero de espesor constante.

Para derivar la solución analítica, se asume que la variación del espesor del acuífero sigue una ley cuadrática que se expresa de la siguiente forma:

$$b(x) = b_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \quad x \in (0, L), \quad (5.1)$$

donde b_0 es el espesor del acuífero en la costa ($x = 0$).

Con el objetivo de derivar una solución analítica, se consideran las siguientes hipótesis: a) el flujo en el acuífero es horizontal y obedece a la ley de Darcy; b) el efecto de las variaciones de densidad del agua es despreciable y c) la conductividad hidráulica K_s [LT^{-1}] y el almacenamiento específico S_s [L^{-1}] son constantes. Conforme a estas hipótesis, las fluctuaciones de marea inducida se describen mediante la siguiente ecuación (Bear, 1972):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T(x) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S(x) \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (5.2)$$

donde $h(x, t)$ es la altura piezométrica, t el tiempo, $T(x) = K_s b(x)$ la transmisividad hidráulica [$L^2 T^{-1}$] y $S(x) = S_s b(x)$ el almacenamiento [-]. Asumiendo que la marea puede ser descrita por una función cosenoidal (Kosuth *et al.*, 2009), la condición de borde en la interfase mar-acuífero ($x = 0$) puede ser expresada como:

$$h(0, t) = A \cos(\omega t), \quad (5.3)$$

donde A es la amplitud de la marea [L] y ω es su frecuencia angular [T^{-1}]. Es importante remarcar que el problema diferencial es lineal, por lo tanto, mediante el principio de superposición, pueden obtenerse soluciones para señales de marea con un amplio espectro de frecuencias. En el extremo del acuífero alejado de la costa ($x = L$) se impone una condición de borde de flujo nulo:

$$\lim_{x \rightarrow L} \left(T(x) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0. \quad (5.4)$$

La solución analítica exacta para el problema definido por las Ecs.(5.2)-(5.4) se puede obtener reescribiendo las ecuaciones en forma compleja y utilizando los métodos de separación de variables y cambio de variable, como se detalla en la siguiente sección.

5.1.1. Solución analítica

Sea $H(x, t)$ una función compleja que satisface el siguiente problema diferencial de valores de contorno:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T(x) \frac{\partial H}{\partial x} \right) = S(x) \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (5.5)$$

$$H(0, t) = A e^{i\omega t}, \quad (5.6)$$

$$\lim_{x \rightarrow L} T(x) \frac{\partial H}{\partial x} = 0. \quad (5.7)$$

Comparando el problema diferencial definido por las Ecs. (5.2)-(5.4) y el problema diferencial definido por las Ecs. (5.5)-(5.7), se deduce que $h(x, t) = \Re[H(x, t)]$, siendo \Re la parte real de la expresión compleja. Aplicando el método

de separación de variables, se sustituye $H(x, t) = y(x)e^{i\omega t}$ en las ecuaciones (5.5)-(5.7) y se obtiene el siguiente problema diferencial:

$$\left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2}{L} \frac{dy}{dx} - 2ia^2 \left(1 - \frac{x}{L}\right) y = 0, \quad (5.8)$$

$$y(0) = A, \quad (5.9)$$

$$\left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \frac{dy}{dx} = 0, \quad (5.10)$$

$$a = \sqrt{\frac{\omega S_s}{2K_s}}, \quad (5.11)$$

siendo $y(x)$ una función compleja que describe la dependencia espacial de la solución.

Con el objetivo de derivar la solución general de la Ec. (5.8), se propone el siguiente cambio de variable:

$$v(x) = \left(1 - \frac{x}{L}\right) y(x). \quad (5.12)$$

Reemplazando la Ec. (5.12) en el sistema (5.8)-(5.10) se obtiene:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} - 2ia^2 v = 0, \quad (5.13)$$

$$v(0) = A, \quad (5.14)$$

$$\lim_{x \rightarrow L} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{dv}{dx} - \frac{v(x)}{L} = 0. \quad (5.15)$$

Como puede observarse, la ecuación diferencial (5.13) resulta más simple de resolver que la Ec. diferencial (5.8). A partir de la resolución del sistema (5.13)-(5.15), se obtiene la siguiente expresión para $v(x)$:

$$v(x) = \frac{A}{(1 - e^{2(1+i)aL})} \left[e^{(1+i)ax} - e^{(1+i)a(2L-x)} \right]. \quad (5.16)$$

Finalmente se construye la solución $H(x, t) = \frac{v(x)}{(1-x/L)} e^{i\omega t}$ y, tomando su parte real, se obtiene $h(x, t)$ que puede expresarse de la siguiente forma:

$$h(x, t) = \frac{Ap}{1 - x/L} \left[e^{ax} \cos(\omega t + ax) - e^{a(2L-x)} \cos(\omega t + a(2L - x)) \right] - \frac{Aq}{1 - x/L} \left[e^{ax} \operatorname{sen}(\omega t + ax) - e^{a(2L-x)} \operatorname{sen}(\omega t + a(2L - x)) \right], \quad (5.17)$$

donde

$$p = \frac{1 - e^{2aL} \cos(2aL)}{1 - 2e^{-2aL} \cos(2aL) + e^{4aL}}, \quad (5.18)$$

$$q = \frac{e^{2aL} \operatorname{sen}(2aL)}{1 - 2e^{-2aL} \cos(2aL) + e^{4aL}}. \quad (5.19)$$

En la siguiente sección se realiza un análisis de la solución derivada.

5.1.2. Análisis de la solución

Para explorar el efecto del acuñamiento propuesto en la marea inducida se diseñan y analizan distintos ejemplos. Como primer ejemplo, se compara la respuesta del modelo propuesto con la marea inducida en un acuífero de misma longitud (L) pero de espesor constante (b_0). Un esquema del perfil del acuífero de sección rectangular se muestra en la Fig. (5.1). La solución exacta para este caso es la siguiente:

$$h(x, t) = Ap \left[e^{-ax} \cos(\omega t - ax) + e^{-a(2L-x)} \cos(\omega t - a(2L - x)) \right] - Aq \left[e^{-ax} \operatorname{sen}(\omega t - ax) - e^{-a(2L-x)} \operatorname{sen}(\omega t - a(2L - x)) \right], \quad (5.20)$$

siendo:

$$p = \frac{1 + e^{-2aL} \cos(2aL)}{1 + e^{-2aL} \cos(2aL) + e^{-4aL}}, \quad (5.21)$$

$$q = \frac{e^{-2aL} \operatorname{sen}(2aL)}{1 + e^{-2aL} \cos(2aL) + e^{-4aL}}. \quad (5.22)$$

Para realizar una comparación entre las Ecs. (5.17) y (5.20), se asume que ambos acuíferos tienen una longitud $L = 150$ m, conductividad hidráulica $K_s = 50$ m/d, almacenamiento específico $S_s = 10^{-3}$ m⁻¹ y difusividad hidráulica $D = K_s/S_s = 5 \times 10^4$ m²/d. Se considera que la marea es semi-diurna (período de 12.4 hs) con amplitud $A = 1$ m.

La Fig. (5.2) muestra las variaciones de las alturas piezométricas calculadas para distintas distancias a la costa: $x = 30$ m, $x = 75$ m, $x = 120$ m. En el gráfico se puede observar que, en los tres casos, la marea inducida en el acuífero acuñado tiene mayores amplitudes que la marea inducida en el acuífero de espesor constante. El efecto en el desfase temporal de estas señales es menos significativo, resultando imperceptible o nulo para $x = 10$ m. Se puede notar que la diferencia de desfases entre ambos modelos aumenta con la distancia a la línea de costa, resultando el acuífero acuñado con un menor desfase temporal que el acuífero de espesor constante.

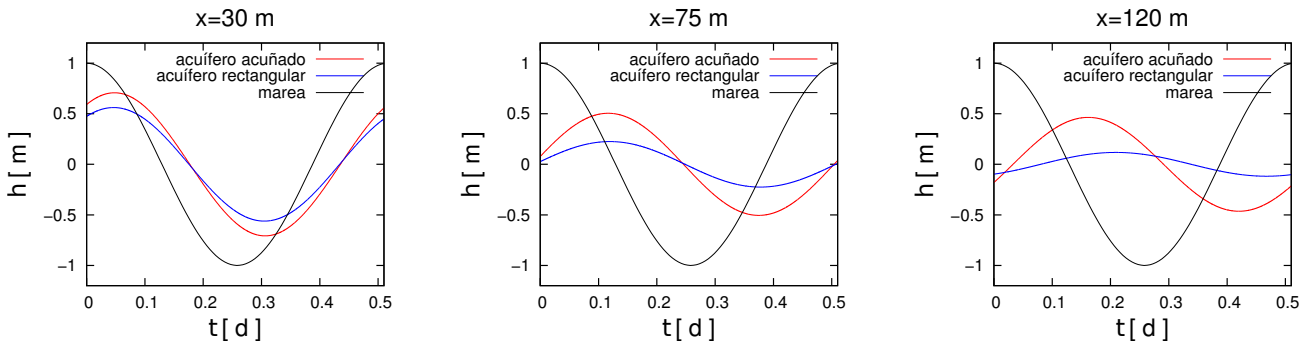


Figura 5.2. Marea inducida estimada para tres distancias a la línea de costa. La marea se incluye en los gráficos.

El ejemplo anterior demuestra que el efecto de la variación de espesor del acuífero en la marea inducida podría ser importante y debería considerarse para evaluar correctamente el comportamiento hidráulico del acuífero. Para un mejor análisis de este fenómeno se calcula la amplitud máxima h_{max} y el desfase temporal t_{lag} como funciones de la distancia x a la costa:

$$h_{max}(x) = \sqrt{y_r^2(x) + y_i^2(x)}, \quad (5.23)$$

$$\tau_{lag}(x) = -\frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(\frac{y_i(x)}{y_r(x)} \right), \quad (5.24)$$

donde $y_r(x)$ e $y_i(x)$ son la parte real e imaginaria de la función compleja $y(x)$ respectivamente.

Para incluir en el análisis el efecto de la longitud del acuífero se calcularán las atenuaciones (5.23) y desfases (5.24) de la marea inducida en acuíferos acuñaos de distinta longitud. La Fig. (5.3) muestra la caída de amplitud y el desfase temporal para 6 longitudes distintas de acuífero y, como referencia, en la figura se incluyen las curvas correspondientes al modelo de Jacob-Ferris, que corresponde a un acuífero de espesor constante y longitud infinita (Ec. 2.5).

Como puede observarse en la Fig. 5.3(a), cuanto menor es la longitud del acuífero, mayor es la amplitud de la marea inducida. Las curvas de atenuación tienden progresivamente al modelo de Jacob a medida que la longitud del acuífero aumenta. Por otro lado, las curvas de desfase temporal ilustradas en la Fig. 5.3(b) convergen en todos los casos al modelo de Jacob cerca de la costa. El rango de convergencia aumenta con la longitud del acuífero.

Es importante remarcar que, aunque las curvas de desfase temporal coinciden con las correspondientes al modelo de Jacob cerca de la costa, las curvas de

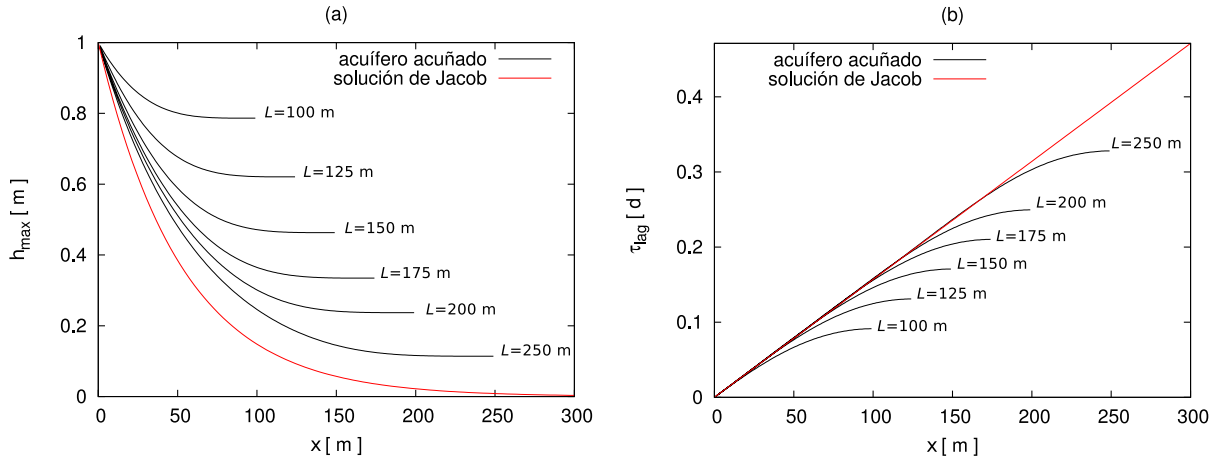


Figura 5.3. (a) Amplitud y (b) Desfasaje temporal de la marea inducida para 6 longitudes distintas de acuífero.

caída de amplitud de ambos modelos difieren significativamente. Este comportamiento podría conducir a inconsistencias en la determinación de parámetros hidráulicos mediante atenuación y desfasaje si se utilizan las Ecs. (2.10) y (2.11) para estimar la difusividad hidráulica.

Como se mencionó anteriormente, para un acuífero homogéneo, las difusividades hidráulicas D_{amp} y D_{ϕ} son iguales, por lo tanto el factor de heterogeneidad descrito en la Ec. (2.14) es constante e igual a 1, mientras que para un acuífero no homogéneo el factor de heterogeneidad es distinto a 1. La Fig. (5.4) ilustra los factores de heterogeneidad para las seis longitudes de acuíferos acuñaados consideradas. Como referencia, la figura incluye el factor de heterogeneidad correspondiente al modelo de Jacob ($FH(x) = 1$).

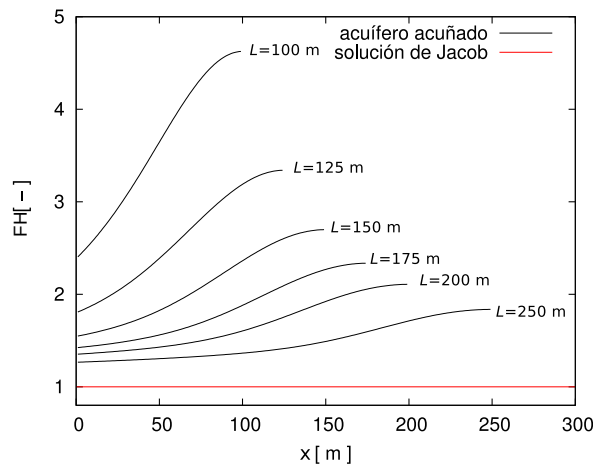


Figura 5.4. Factor de heterogeneidad en función de la distancia a la costa para 6 longitudes de acuífero distintas. La solución de Jacob está representada por la línea roja.

Para la solución propuesta, el factor de heterogeneidad FH toma valores

mayores a 1 en todos los casos, y aumenta con la distancia a la costa. El FH tiende gradualmente al valor correspondiente al modelo de Jacob a medida que la longitud del acuífero aumenta. El análisis de esta solución analítica nos permite concluir que el acuñaamiento tiene un efecto significativo en la marea inducida y no considerarlo puede conducir a errores en la estimación de la difusividad hidráulica.

5.2. Solución general para acuíferos acuñados

La solución analítica que se deriva en esta sección constituye una generalización de la primer solución analítica presentada, permitiendo representar acuíferos con un espesor que aumenta o disminuye con la distancia a la línea de costa. Una representación esquemática de estos acuíferos se ilustra en la Fig. (5.5). Consideremos un acuífero costero confinado de longitud L cuyo espesor $b(x)$ ($0 < x < L$) varía de acuerdo a la siguiente ley:

$$b(x) = b_0(1 + \alpha x)^2 \quad x \in (0, L), \quad (5.25)$$

donde α es el parámetro de acuñaamiento definido como:

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\sqrt{\frac{b_L}{b_0}} - 1 \right), \quad (5.26)$$

siendo b_L y b_0 los espesores del acuífero en la costa ($x = 0$) y en el extremo alejado de la costa ($x = L$) respectivamente. Notar que si $b_L = 0$ entonces $\alpha = -1/L$, de manera que las expresiones que definen la variación de espesor del acuífero para la primera solución (5.1) y la solución general (5.25) son iguales. El parámetro de acuñaamiento permite representar acuíferos acuñados con un espesor que crece ($\alpha > 0$ o acuñaamiento positivo) o decrece ($\alpha < 0$ o acuñaamiento negativo) con la distancia a la costa, como se muestra en la Fig. (5.5). La ley cuadrática que se utiliza para describir la variación del espesor del acuífero permite obtener una solución analítica cerrada y, como se mencionó anteriormente, representa un comportamiento intermedio entre las variaciones lineal y exponencial propuestas por Hantush (Hantush, 1962a,b,c).

Para esta solución se consideran las mismas hipótesis utilizadas para la solución anterior: a) el flujo en el acuífero confinado es horizontal y obedece a la ley de Darcy; b) el efecto de las variaciones de densidad del agua es despreciable y c) la conductividad hidráulica K_s [LT^{-1}] y el almacenamiento específico S_s

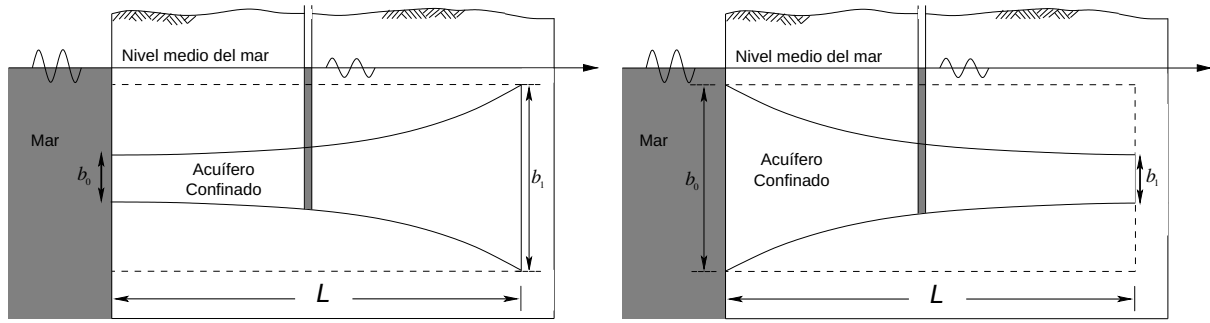


Figura 5.5. Perfil esquemático de dos acuíferos costeros acuñados. El acuífero izquierdo posee un acuñamiento positivo ($\alpha > 0$) y el acuífero derecho posee un acuñamiento negativo ($\alpha < 0$).

$[L^{-1}]$ son constantes. Bajo estas hipótesis, la ecuación de flujo resulta idéntica a la propuesta en la sección anterior:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T(x) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S(x) \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (5.27)$$

Como condición de borde se utiliza nuevamente una función trigonométrica, asumiendo que la marea puede considerarse como una función cosenoidal:

$$h(0, t) = A \cos(\omega t). \quad (5.28)$$

En el extremo alejado de la costa se impone una condición de flujo nulo:

$$\lim_{x \rightarrow L} \left(T(x) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0. \quad (5.29)$$

La solución exacta para el sistema (5.25)-(5.29) puede obtenerse utilizando los métodos de separación de variables y cambio de variable, de manera similar a como se derivó la solución anterior.

5.2.1. Solución analítica

Sea $H(x, t)$ una función compleja que satisface el siguiente problema diferencial de valores de contorno:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T(x) \frac{\partial H}{\partial x} \right) = S(x) \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (5.30)$$

$$H(0, t) = A e^{i\omega t}, \quad (5.31)$$

$$\lim_{x \rightarrow L} T(x) \frac{\partial H}{\partial x} = 0. \quad (5.32)$$

Comparando los problemas diferenciales dados por (5.27)-(5.29) y (5.30)-(5.32) se deduce que $h(x, t) = \Re(H(x, t))$. Mediante el método de separación de variables, sustituyendo $H(x, t) = y(x)e^{i\omega t}$ en (5.30)-(5.32) se obtiene el siguiente problema diferencial:

$$(1 + \alpha x) \frac{d^2 y}{dx^2} + 2\alpha \frac{dy}{dx} - 2ia^2(1 + \alpha x)y = 0, \quad (5.33)$$

$$y(0) = A, \quad (5.34)$$

$$(1 + \alpha x)^2 \frac{dy}{dx} = 0, \quad (5.35)$$

donde $y(x)$ es una función compleja. Notar que el sistema definido por las ecuaciones (5.33)-(5.35) es similar al sistema (5.8)-(5.10). Con el objetivo de obtener la solución general de la Ec. (5.33), se realiza el siguiente cambio de variable:

$$v(x) = (1 + \alpha x)y(x). \quad (5.36)$$

Reemplazando la Ec. (5.36) en las Ecs. (5.33)-(5.35) se obtiene:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} - 2ia^2 v = 0, \quad (5.37)$$

$$v(0) = A, \quad (5.38)$$

$$\lim_{x \rightarrow L} (1 + \alpha x) \frac{dv}{dx} - \alpha v(x) = 0. \quad (5.39)$$

El cambio de variable propuesto facilita la resolución del problema diferencial. A partir del sistema (5.37)-(5.39), se obtiene la siguiente expresión para $v(x)$:

$$v(x) = \frac{A}{(1 - e^{2(1+i)aL} F)} \left[e^{(1+i)ax} - e^{(1+i)a(2L-x)} F \right], \quad (5.40)$$

donde

$$F = \frac{\alpha - (1 + i)a(1 + L)}{\alpha + (1 + i)a(1 + \alpha L)}. \quad (5.41)$$

Luego, se construye $H(x, t)$ y al tomar su parte real se obtiene la siguiente expresión como solución del problema diferencial inicial:

$$\begin{aligned} h(x, t) = & \frac{Ae^{ax}}{(1 + \alpha x)} \left[p \cos(\omega t + ax) + q \operatorname{sen}(\omega t + ax) \right] - \\ & - \frac{Ap}{(1 + \alpha x)} \left[e^{a(2L-x)} (\cos(\omega t + a(2L - x))s_1 - \operatorname{sen}(\omega t + a(2L - x))s_2) \right] \\ & - \frac{Aq}{(1 + \alpha x)} \left[e^{a(2L-x)} (\cos(\omega t + a(2L - x))s_2 + \operatorname{sen}(\omega t + a(2L - x))s_1) \right], \end{aligned} \quad (5.42)$$

donde:

$$p = \frac{1 - e^{2aL}(\cos(2aL)s_1 + \operatorname{sen}(2aL)s_2)}{[1 - e^{2aL}(\cos(2aL)s_1 + \operatorname{sen}(2aL)s_2)]^2 + e^{4aL}(\cos(2aL)s_2 + \operatorname{sen}(2aL)s_1)^2}, \quad (5.43)$$

$$q = \frac{e^{2aL}(\operatorname{sen}(2aL)s_1 + \cos(2aL)s_2)}{[1 - e^{2aL}(\cos(2aL)s_1 + \operatorname{sen}(2aL)s_2)]^2 + e^{4aL}(\cos(2aL)s_2 + \operatorname{sen}(2aL)s_1)^2}, \quad (5.44)$$

y

$$s_1 = \frac{\alpha^2 - 2a^2(1 + \alpha L)^2}{[\alpha + a(1 + \alpha L)]^2 + a^2(1 + \alpha L)^2}, \quad (5.45)$$

$$s_2 = \frac{-2\alpha a(1 + \alpha L)}{[\alpha + a(1 + \alpha L)]^2 + a^2(1 + \alpha L)^2}. \quad (5.46)$$

Notar que la solución (5.42) está en función de los siguientes parámetros físicos y geométricos: la amplitud y frecuencia de la condición de borde (A, ω); la conductividad hidráulica y el almacenamiento específico del acuífero (K_s, S_s); y el parámetro de acuñamiento α , que define la geometría del acuífero (b_0, b_L, L). Notar que, si L tiende a infinito (α tiende a cero), la solución (5.42) se reduce a:

$$h(x, t) = Ae^{-ax} \cos(\omega t - ax), \quad (5.47)$$

que es la expresión obtenida por Jacob (1950).

5.2.2. Análisis de la solución

Como en el caso anterior, para explorar el efecto del acuñamiento en la marea inducida se comparan las respuestas predichas por el modelo propuesto con las alturas inducidas en un acuífero de espesor constante. Para llevar a cabo esta comparación se utilizaron los siguientes parámetros para los acuíferos: $L = 100$ m, $\alpha = 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ ($b_L = 4b_0$), $\alpha = -5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ($b_L = b_0/4$) y $\alpha = 0$ ($b_L = b_0$). La geometría de estos acuíferos, que tienen el mismo acuñamiento pero en sentido opuesto, se esquematiza en la Fig. (5.5). Se asumen las siguientes propiedades hidráulicas: $K_s = 50 \text{ md}^{-1}$ y $S_s = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, obteniéndose una difusividad hidráulica $D = K_s/S_s = 1.67 \cdot 10^4 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$. Se considera que la marea tiene un período 12.4 horas y amplitud $A = 1$ m.

La Fig. (5.6) muestra las variaciones de marea inducida a tres distancias distintas de la costa para los acuíferos definidos anteriormente. Puede observarse que el acuñamiento positivo ($\alpha = 10^{-2}\text{m}^{-1}$) produce una disminución en la amplitud de la marea inducida al compararla con la amplitud del acuífero de espesor constante. Por otro lado, el acuñamiento negativo produce un aumento

en la amplitud de la marea inducida al compararla con la amplitud del acuífero de espesor constante ($\alpha = 0$). Puede también observarse que el desfase temporal de la señal de marea inducida respecto a la condición de borde (marea oceánica) no presenta diferencias en los tres modelos para una distancia de $x = 10$ m. Para $x = 50$ m comienza a notarse que la marea inducida del acuífero con acuñamiento positivo presenta un mayor desfase temporal, comportamiento que se manifiesta más claramente para $x = 90$ m.

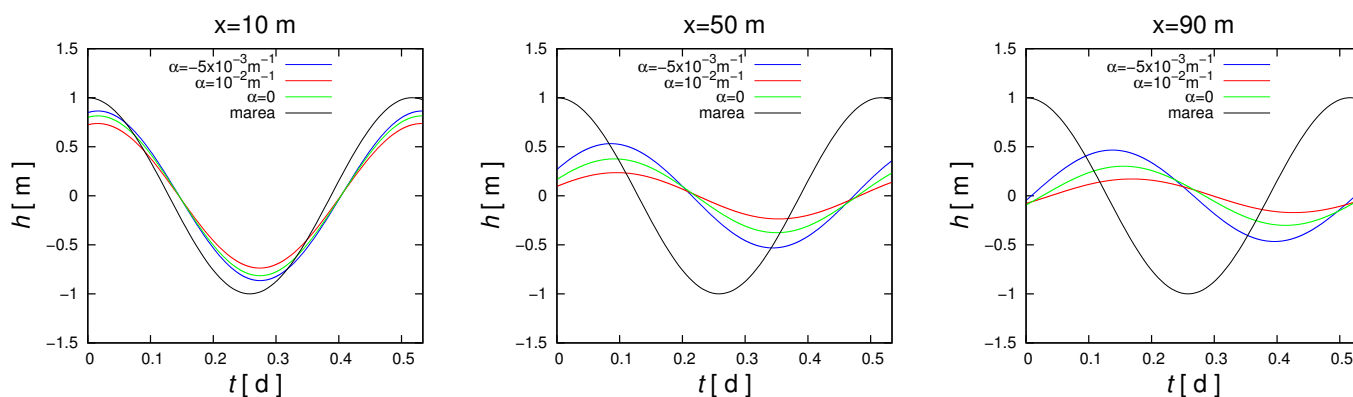


Figura 5.6. Variación temporal de la marea inducida calculada para tres valores de α a tres distancias de la costa, $x=100, 50$ y 90 m. La marea se incluye en los gráficos.

Para un mejor análisis del efecto del acuñamiento en la atenuación y desfase de la marea inducida se utilizan las expresiones de h_{max} y τ_{lag} definidas por las Ecs. (5.23) y (5.24). La Fig. (5.7) ilustra las amplitudes y desfases temporales como función de la distancia a la línea de costa x . Puede observarse claramente

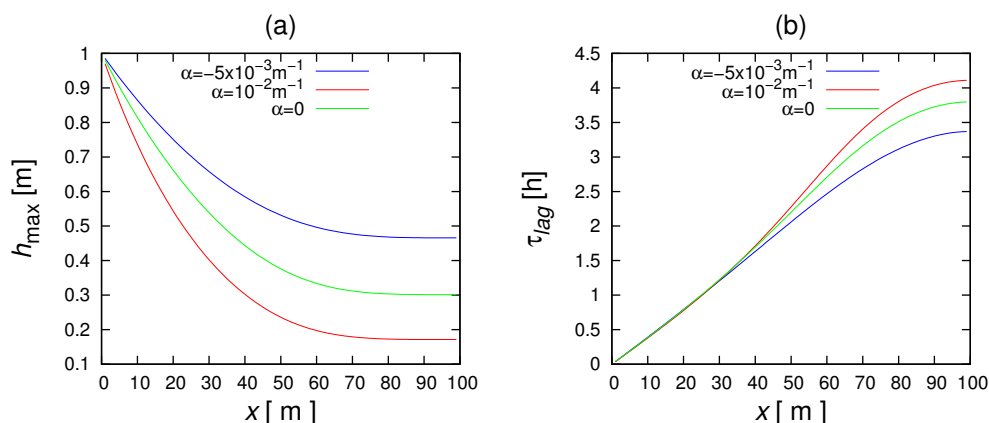


Figura 5.7. (a) Amplitudes máximas y (b) Desfases temporales en función de la distancia a la línea de costa para los valores de acuñamiento definidos.

en la Fig. 5.7(a) que el acuñamiento positivo genera una disminución en la

amplitud de la marea inducida y el acuñaamiento negativo produce un aumento de la amplitud de la marea inducida. Este comportamiento se mantiene para todo el rango de valores de x . Por otro lado la Fig. 5.7(b) muestra que el acuñaamiento no produce un efecto significativo en el desfase temporal cerca de la costa. Para valores de x mayores a 40 m comienza a notarse el efecto del acuñaamiento en el desfase temporal de la marea inducida. Un acuñaamiento positivo produce un aumento en el desfase temporal mientras que un acuñaamiento negativo produce una disminución del mismo.

Con el objetivo de validar las expresiones de las difusividades para acuíferos acuñaados se calculan D_{amp} y D_{ϕ} mediante las expresiones (2.10) y (2.11) y se las compara con la difusividad hidráulica real del acuífero. La Fig. (5.8) muestra los valores de difusividad hidráulica estimados mediante atenuación y desfase para acuíferos acuñaados y la difusividad hidráulica real del acuífero $D = K_s/S_s = 1.67 \cdot 10^2 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ en función de la distancia x a la costa. El análisis de esta figura

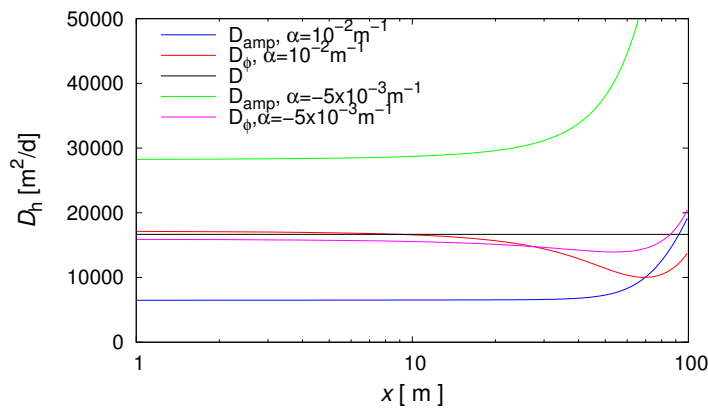


Figura 5.8. Difusividades hidráulicas obtenidas mediante atenuación y desfase temporal y difusividad hidráulica real.

permite realizar observaciones interesantes: (a) la difusividad hidráulica calculada mediante atenuación D_{amp} sobrestima significativamente el valor real para un acuífero cuyo espesor disminuye con la distancia a la costa; (b) la difusividad hidráulica calculada mediante atenuación D_{amp} subestima significativamente el valor real para un acuífero cuyo espesor aumenta con la distancia a la costa y (c) cerca de la costa, D_{ϕ} obtenida a partir del desfase de la marea inducida provee mejores estimaciones de la difusividad hidráulica real tanto para acuíferos cuyo espesor aumenta o disminuye con la distancia a la costa. Esta última observación tiene una importante implicancia práctica. En caso de estar utilizando el método de marea inducida en un acuífero del que no se tenga información a priori de su espesor, los datos de desfase resultan más confiables que los de atenuación para

estimar la difusividad hidráulica. De este análisis puede concluirse que debería utilizarse la Ec. (2.11) para estimar la difusividad hidráulica cuando no se tiene información previa de una posible variación del espesor del acuífero.

Para cuantificar las inconsistencias producidas en la estimación de difusividad hidráulica mediante atenuación y desfasaje se calcula el factor de heterogeneidad de Trefry-Bekele como función de la distancia a la línea de costa. La Fig. (5.9) muestra el factor de heterogeneidad para los acuíferos estudiados.

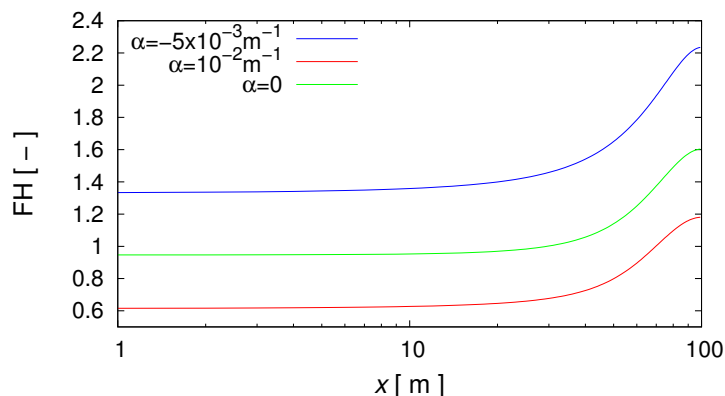


Figura 5.9. Factor de heterogeneidad en función de la distancia a la costa para acuíferos con acuñamiento positivo y negativo. Se incluye el FH correspondiente al acuífero de espesor constante ($\alpha=0$).

Del análisis de la Fig. (5.9) se observa que, cerca de la costa, un acuñamiento negativo produce un FH mayor a 1. Un resultado similar se obtuvo con la solución analítica presentada para un acuífero cuyo espesor se anula en el borde alejado de la costa. Por el contrario, para un acuífero con acuñamiento positivo, el FH resulta mayor a 1. El análisis del factor de heterogeneidad puede utilizarse como un posible indicador del tipo de acuñamiento que podría tener un acuífero costero.

Otro elemento a analizar es el efecto de la longitud del acuífero en la marea inducida. En la Fig. (5.10) se calculan las caídas de amplitud, desfasajes temporales y factores de heterogeneidad de la marea inducida para acuíferos de longitud $L = 100$ m, $L = 150$ m y $L = 200$ m y acuñamientos positivo ($\alpha = 10^{-2} \text{ m}^{-1}$) y negativo ($\alpha = -5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$). La Fig. 5.10(a) muestra al efecto que produce la variación de la longitud del acuífero acuñado en la atenuación de la marea inducida. Cerca de la costa, la variación de la longitud no produce un cambio significativo en el comportamiento de la caída de amplitud h_{max} de la señal inducida. A medida que nos alejamos de la costa comienza a aumentar la diferencia entre las atenuaciones de los acuíferos de mismo acuñamiento, producto de la condición impuesta de flujo nulo en el borde externo. De

manera similar puede notarse en la Fig. 5.10(b) que cerca de la costa no existen diferencias en el desfase temporal τ_{lag} de la marea inducida. Finalmente, los factores de heterogeneidad se ilustran en la Fig. 5.10(c). El efecto de la longitud del acuífero en el FH sólo es significativo lejos de la costa.

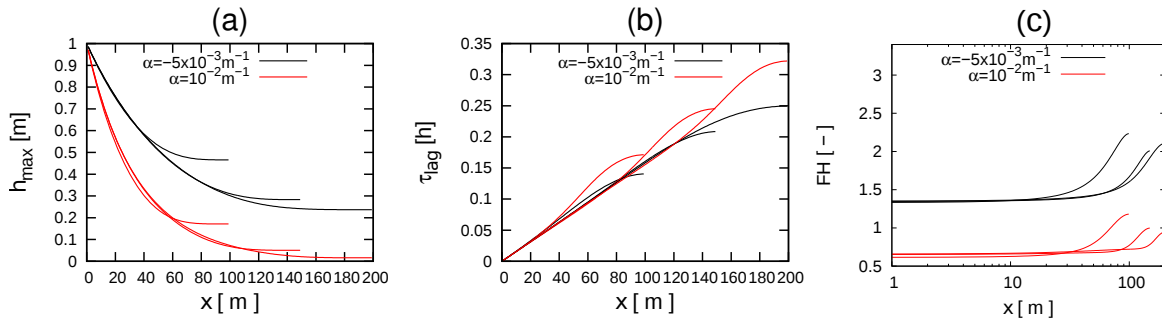


Figura 5.10. (a) Atenuación, (b) Desfase temporal y (c) Factor de heterogeneidad en función de la distancia a la costa para distintas longitudes de acuífero $L=100$ m, $L=150$ m y $L=200$ m.

5.3. Análisis de los factores de heterogeneidad calculados en el Capítulo 4

En esta sección se utilizan los resultados obtenidos a partir de la derivación de las soluciones analíticas con el objetivo de realizar una interpretación de los valores de factor de heterogeneidad calculados en el Capítulo 4. Considerando que la estimación de los parámetros hidráulicos se realizó utilizando las componentes de marea predominantes y que asociado a cada componente se calculó un valor de factor de heterogeneidad, podría inferirse la existencia de acuíferos en los acuíferos estudiados si los factores de heterogeneidad presentaran valores sistemáticamente mayores o menores a 1.

En la locación Club Regatas Avellaneda, los factores de heterogeneidad calculados para las arenas Puelches presentaron valores bastante menores a 1. Esto podría indicar un posible aumento del espesor del acuífero con la distancia al Riachuelo en esta zona. De todas formas, en esta locación se utilizó una señal mareográfica extrapolada a partir de considerar una caída lineal de la amplitud en el Riachuelo obteniéndose valores de conductividad hidráulica significativamente bajos. Es por esto que se desestimó el cálculo de conductividad hidráulica para el acuífero Puelche.

En la locación Puente La Noria se calcularon para el acuífero superficial factores de heterogeneidad mucho mayores a la unidad. Esto podría indicar una

posible disminución del espesor del acuífero con la distancia al Riachuelo en esta locación.

En la locación Parque Industrial Berisso se obtuvieron factores de heterogeneidad menores a 1 para el acuífero Puelche. Esto podría indicar la existencia de un acuñaamiento positivo de las arenas Puelches en esta zona.

En la locación Astillero se computaron valores del factor de heterogeneidad menores a 1 para las dos componentes identificadas en el acuífero superficial y para 5 de las 6 componentes identificadas en el acuífero Puelche. Esto podría indicar un posible acuñaamiento positivo de los acuíferos en esta locación.

En la locación ATULP se obtuvieron factores de heterogeneidad mayores a la unidad en todas las componentes correspondientes al acuífero Puelche y en 3 de las 4 componentes identificadas en los sedimentos Postpampeanos. Esto podría indicar un posible acuñaamiento negativo de los acuíferos en esta locación.

Cabe destacar que el análisis realizado utilizando los factores de heterogeneidad constituye una hipótesis que debería ser verificada con la aplicación de otras técnicas. Si bien se demostró que el aumento y la disminución del espesor de los acuíferos producen respectivamente FH menores y mayores a 1, el cálculo de factores de heterogeneidad distintos a 1 puede deberse al incumplimiento de otras hipótesis consideradas por los modelos clásicos.

5.4. Conclusiones

En este Capítulo se presentaron dos soluciones analíticas para el estudio del fenómeno de marea inducida en acuíferos costeros acuñaados. En la primera solución analítica se asume un acuífero cuyo espesor disminuye cuadráticamente con la distancia a la línea de costa hasta anularse. El decrecimiento en el espesor del acuífero produce un aumento en la amplitud de la marea inducida, mientras que el efecto en el desfase no es significativo cerca de la costa. El factor de heterogeneidad, que cuantifica las inconsistencias en la determinación de la difusividad hidráulica mediante atenuación y desfase, arroja valores mayores a uno. Este comportamiento puede considerarse un indicador de un posible acuñaamiento del acuífero. Esta solución y su correspondiente análisis fue publicado en “Hydrogeology Journal” (Cuello *et al.*, 2017). Posteriormente, se presentó una solución analítica que constituye una generalización de la primer solución presentada. Esta nueva solución confirma que el efecto del acuñaamiento en la marea inducida es significativo y debe considerarse a la hora de analizar apropiadamente el comportamiento hidráulico de un acuífero costero. Los acuíferos cuyo espesor aumenta con la distancia a la costa presentan una disminución en la amplitud de la marea inducida, mientras que los acuíferos cuyo espesor disminuye con la distancia a la costa presentan un aumento en la amplitud de la marea inducida. Un posible indicador de acuñaamiento del acuífero es el factor de heterogeneidad. Se han calculado valores del factor de heterogeneidad mayores a la unidad para acuíferos con acuñaamiento negativo y valores del factor de heterogeneidad menores a la unidad con acuñaamiento positivo. Comparando las estimaciones de difusividad hidráulica realizadas mediante atenuación y desfase y la difusividad hidráulica verdadera, se pudo concluir que los datos de desfase proveen mejores estimaciones de difusividad hidráulica que los datos de atenuación. La segunda solución analítica y su correspondiente análisis se encuentra en revisión en la revista “Hydrological Processes” (Cuello y Guarracino, 2020). Finalmente, se utilizaron las conclusiones surgidas en el estudio de las soluciones analíticas derivadas para analizar los valores del factor de heterogeneidad calculados en el Capítulo 4, infiriendo posibles acuñaamientos de los acuíferos.

Capítulo 6

Conclusiones

Uno de los aportes al conocimiento más relevantes en toda investigación científica es la medición del fenómeno que se desea estudiar. Es por ello que en este trabajo de Tesis se comenzó por medir el fenómeno de marea inducida en acuíferos costeros en la cuenca Matanza-Riachuelo y en la planicie costera del Río de La Plata. El análisis cualitativo de las señales y la información geológica de la zona permitieron establecer el grado y tipo de conexión existente entre los acuíferos costeros y los cuerpos de agua superficial (Río de La Plata y Riachuelo). En la cuenca Matanza-Riachuelo se tuvo acceso, a través de ACUMAR, a perforaciones a los acuíferos Puelche, Paraná y a los sedimentos Postpampeanos. Las señales de marea inducida en los acuíferos más profundos (Puelche y Paraná) presentaron un alto grado de similitud con las señales mareográficas, indicando una fuerte interacción con el Río de La Plata y el Riachuelo. Teniendo en cuenta que estos acuíferos se extienden por debajo del río y están limitados por sedimentos de baja permeabilidad, la interacción con el Río de la Plata solo puede tener un origen mecánico. Por otra parte, los sedimentos Postpampeanos están en contacto directo con el Río de La Plata y el Riachuelo, por lo que se postula una interacción hidráulica. Debido a la alta disipación de los acuíferos libres, la interacción entre el Postpampeano y los cuerpos de agua superficial se manifestó principalmente en el registro de eventos extremos como Sudestadas o fuertes bajantes, es decir fenómenos vinculados a la marea meteorológica. En la región costera del Gran La Plata se contó con perforaciones al acuífero Puelche y a los sedimentos Postpampeanos, que poseen una mayor granulometría que la observada en la cuenca Matanza-Riachuelo. Las señales de marea inducida correspondientes al acuífero Puelche reforzaron la hipótesis de una conexión mecánica entre el acuífero y el Río de La Plata. Por otra parte, las señales inducidas en el Postpampeano mostraron una mayor similitud con el registro mareográfico de la que se observó en la cuenca Matanza-Riachuelo, lo que se atribuye a la

mayor granulometría.

A partir de las soluciones clásicas que contemplan interacción de tipo hidráulica y de tipo mecánica entre el acuífero y el río, se estimaron valores de difusividad hidráulica para los acuíferos Puelche y Paraná y los sedimentos Postpampeanos. Las estimaciones se llevaron a cabo utilizando la fase y la amplitud de las componentes características de las señales de marea y de las fluctuaciones inducidas en los acuíferos mencionados. En la locación Viñedos, los pozos que perforan el acuífero superficial presentaron señales de marea inducida fuertemente atenuadas, razón por la cual se realizó la estimación de difusividad hidráulica aplicando una variante del método de marea inducida que consiste en utilizar señales piezométricas correspondiente a dos pozos de monitoreo. Mediante la resolución numérica del problema diferencial considerado, se estimó un valor de difusividad hidráulica aprovechando el registro de una Sudestada en ambos pozos. A partir de los valores de almacenamiento específico y eficiencia de carga estimados en función de las propiedades granulométricas de los materiales que conforman los acuíferos estudiados, se realizaron estimaciones de conductividad hidráulica de los acuíferos Puelche y Paraná y los sedimentos Postpampeano. Para el acuífero Puelche se ha obtenido un valor de conductividad hidráulica de 32.4 m/d, que se encuentra en perfecta concordancia con las estimaciones realizadas mediante otras técnicas. Para los sedimentos Postpampeanos en la región de la cuenca Matanza-Riachuelo se ha estimado una conductividad hidráulica promedio de 1.47 m/d, valor que está por encima de lo esperado para sedimentos de textura limoarcillosa. Esta discrepancia podría atribuirse a que la perforación en la locación Puente La Noria alcanza las conchillas existentes en la base de los sedimentos Postpampeanos, dando lugar a una estimación de conductividad hidráulica algo mayor. Para la región costera del Gran La Plata se obtuvo una estimación de conductividad hidráulica promedio de 17.7 m/d para esta misma formación. Este valor resulta mayor al obtenido en la cuenca Matanza-Riachuelo ya que los sedimentos Postpampeanos presentan una granulometría limoarenosa y arenogrosa en la zona de la planicie costera del Gran La Plata. Para el acuífero Paraná se ha obtenido una estimación de conductividad hidráulica de 16.2 m/d. Aunque no se cuenta con otros valores de conductividad hidráulica para efectuar una comparación, la estimación obtenida resulta consistente con la característica que presenta el acuífero Paraná de tener un mayor contenido de limos que el acuífero Puelche. A pesar de la dificultad que conlleva trabajar con datos reales y la simplificación que supone asumir un modelo sencillo de sistema acuífero, se han podido caracterizar satisfactoriamente los acuíferos cos-

teros, obteniéndose valores de conductividad hidráulica consistentes con los que se encuentran en la bibliografía para los acuíferos Puelche y Postpampeano. La caracterización hidráulica realizada en el acuífero Paraná constituye un aporte original al conocimiento hidrogeológico de la región, ya que no se encontraron en la literatura valores de la conductividad hidráulica. Las estimaciones realizadas mediante el método de marea inducida son más representativas del comportamiento del acuífero que los tradicionales ensayos de bombeo, ya que los valores estimados integran grandes porciones de los acuíferos.

En líneas generales, el modelado es un instrumento de investigación teórico que permite reproducir y analizar el fenómeno estudiado. En esta Tesis se derivaron dos nuevas soluciones analíticas para estudiar el fenómeno de marea inducida en acuíferos costeros acuñaos. La primera solución ha sido publicada en la revista *Hydrogeology Journal* y la segunda se encuentra en proceso de revisión en la revista *Hydrological Processes*. Estas soluciones presentan la particularidad de contemplar variaciones continuas en el espesor del acuífero, lo que resulta una novedad ya que en la literatura sobre esta temática, se suele considerar que el acuífero o sistema acuífero posee un espesor constante. El análisis de las soluciones analíticas derivadas permite concluir que el efecto que produce la variación del espesor de un acuífero costero en la marea inducida es significativo. Si el espesor del acuífero aumenta con la distancia a la línea de costa, las amplitudes de la marea inducida son menores a las obtenidas para un acuífero de espesor constante. Por otra parte, si el espesor del acuífero disminuye con la distancia a la línea de costa las amplitudes que se obtienen son mayores a las de un acuífero de espesor constante. Este comportamiento podría conducir a una incorrecta estimación de parámetros hidráulicos mediante el análisis de la amplitud si se ignora una posible variación del espesor del acuífero. Para ambos tipos de acuñaamiento, el desfase de la marea inducida se ve menos afectado por las variaciones de espesor del acuífero, de manera que la utilización de este parámetro provee una estimación de conductividad hidráulica más confiable. De este análisis se concluye que, en caso de no tener información previa sobre una posible variación de espesor del acuífero, es recomendable estimar la difusividad hidráulica con datos de desfase. Cerca de la costa el factor de heterogeneidad, que cuantifica las diferencias en las estimaciones de difusividad hidráulica mediante atenuación y desfase, arroja valores mayores a uno para un acuífero que tiene un espesor que aumenta con la distancia a la costa y valores menores a uno para un acuífero cuyo espesor disminuye con la distancia a la costa. Luego, el factor de heterogeneidad podría ser considerado como un indicador de un posible

acuñamiento del acuífero.

Las conclusiones arribadas en el análisis de las nuevas soluciones analíticas permitieron revalorizar la información que provee el factor de heterogeneidad. En este trabajo de Tesis, el factor de heterogeneidad fue utilizado como peso para realizar las estimaciones de difusividad hidráulica. Por otra parte, el cálculo de este coeficiente nos ha permitido concluir que, en líneas generales, los acuíferos presentan algún tipo de heterogeneidad, ya que se han obtenido mayoritariamente factores de heterogeneidad distintos a uno. La obtención de factores de heterogeneidad que se encuentran sistemáticamente por encima o por debajo de la unidad, podría indicar un acuñamiento del acuífero en la zona de estudio. Este comportamiento se observó en algunas locaciones, lo que permite establecer la hipótesis de un posible acuñamiento (sin descartar otro tipo de heterogeneidad) de los acuíferos que debería verificarse mediante la utilización de otras técnicas.

Bibliografía

- Auge, M. P. (2001). Hidrogeología de La Plata-Argentina. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, 1:1.
- Auge, M. P. (2004). Hidrogeología Ambiental II. *Buenos Aires*.
- Auge, M. P. (2005). Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. En *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*, pp. 293–311. Quick Press La Plata.
- Auge, M. P., Hernández, M., y Hernández, L. (2002). Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. En *XXXII International Hydrogeology Congress*, pp. 624–633.
- Barlow, P. M. y Moench, A. F. (1999). WTAQ—A computer program for calculating drawdowns and estimating hydraulic properties for confined and water-table aquifers. *Water-resources investigations report*, 99:4225.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in Porous Media*. Dover, New York.
- Bear, J. (1988). *Dynamics of fluids in porous media*. Dover, New York, 2da edición.
- Bear, J., Cheng, A. H. D., Sorek, S., Ouazar, D., y Herrera, I. (1999). *Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices*, volumen 14. Springer Science & Business Media.
- Blacksmith, I. (2013). The world's worst polluted places. The top ten of the dirty thirty. The remainder of the dirty thirty, 2007. *Final Report*.
- Carr, P. A. y van der Kamp, G. (1969). Determining aquifer characteristics by the tidal methods. *Water Resources Research*, 5(5):1023–1031.
- Chattopadhyay, P. B., Vedanti, N., y Singh, V. S. (2015). A conceptual numerical model to simulate aquifer parameters. *Water resources manage*, 29:771–784.

- Cuello, J. E. (2014). *Simulación numérica de fluctuaciones de altura piezométrica inducidas por marea en acuíferos costeros heterogéneos*. Tesis de grado en Geofísica. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata.
- Cuello, J. E. y Guarracino, L. (2017). Estimación de propiedades hidráulicas de un acuífero costero mediante la correlación de datos piezométricos. En *XXVIII Reunión Científica de la AAGG y III Simposio sobre Inversión y Procesamiento de Señales en Exploración Sísmica (La Plata, 2017)*.
- Cuello, J. E. y Guarracino, L. (2018). Respuesta del agua subterránea a las fluctuaciones de la marea en acuíferos acuñados, confinados y costeros. En *X Congreso Argentino de Hidrogeología y VIII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea (Salta, 2018)*.
- Cuello, J. E. y Guarracino, L. (2020). Tide-induced head fluctuations in coastal aquifers of variable thickness. *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.13873.
- Cuello, J. E., Guarracino, L., y Monachesi, L. B. (2017). Groundwater response to tidal fluctuations in wedge-shaped confined aquifers. *Hydrogeological Journal*, DOI 10.1007/s10040-017-1579-z.
- Cuello, J. E., Guarracino, L., Monachesi, L. B., y Kruse, E. (2016). Efectos mecánicos inducidos por marea en el acuífero puelche. En *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea (Catamarca, 2016)*.
- Cuello, J. E., Monachesi, L., y Guarracino, L. (2014a). Estimación numérica de parámetros hidráulicos en la cuenca matanza riachuelo. En *Actas del X Encuentro Internacional de Ciencias de la Tierra*.
- Cuello, J. E., Monachesi, L. B., y Guarracino, L. (2014b). Simulación numérica de fluctuaciones de altura piezométrica inducidas por marea en acuíferos costeros heterogéneos. *Actas del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras (Santa Fe, 2014)*.
- Cuello, J. E., Monachesi, L. B., y Guarracino, L. (2015). Aplicación del método de marea inducida en la cuenca Matanza Riachuelo. En *Actas del XXIII Jornada de Jóvenes Investigadores del Grupo Montevideo (La Plata, 2015)*.

-
- Darcy, H. P. G. (1856). *Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau, etc.* V. Dalamont.
- D'Onofrio, E., Fiore, M., y Romero, S. (1999). Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires. *Continental Shelf Research*, 19(13):1681–1693.
- D'Onofrio, E., Oreiro, F., y Fiore, M. (2012). Simplified empirical astronomical tide model—An application for the Río de La Plata estuary. *Computers & Geosciences*, 44:196–202.
- Escobar, G., Vargas, W., y Bischoff, S. (2004). Wind tides in the Río de La Plata estuary: meteorological conditions. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(9):1159–1169.
- Ewing, R. E. (1997). *The need for multidisciplinary involvement in groundwater contaminant simulations*, capítulo 24. SIAM.
- Ferguson, G. y Gleeson, T. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, 2:342–345.
- Ferris, J. G. (1951). Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub.*, 33:148–155.
- Fucks, E. E., D'amico, G. M., Pisano, M. F., y Nuccetelli, G. (2017). Evolución geomorfológica de la región del Gran La Plata y su relación con eventos catastróficos.
- Geng, X., Li, H., y Boufadel, M. C. (2009). Tide-induced head fluctuations in a coastal aquifer: effects of the elastic storage and leakage of the submarine outlet-capping. *Hydrogeology Journal*, 17:1289–1296.
- Guarracino, L., Carrera, J., y Vázquez-Suñé, E. (2012). Analytical study of hydraulic and mechanical effects on tide-induced head fluctuation in a coastal aquifer system under the sea. *Journal of Hydrology*, 450-451:150–158.
- Guarracino, L. y Monachesi, L. B. (2014). An analytical solution of tide-induced head fluctuations in an inhomogeneous coastal aquifer. *Lecture Notes in Earth System Sciences*, pp. 475–480.

- Guarracino, L., Monachesi, L. B., y Cuello, J. E. (2014). Simulación numérica de fluctuaciones de altura piezométrica inducidas por mareas. En *Informe - Proyecto Aguas Subterráneas en la cuenca Matanza Riachuelo, ACUMAR*.
- Guarracino, L., Monachesi, L. B., y Cuello, J. E. (2015). Medición y modelado de la marea inducida en la cuenca Matanza Riachuelo. En *Informe Final - Proyecto Aguas Subterráneas en la cuenca Matanza Riachuelo, ACUMAR*.
- Guo, H., Jiao, J. J., y Li, H. (2010). Groundwater response to tidal fluctuations in a two-zone aquifer. *Journal of Hydrology*, 381:364–371.
- Hantush, M. S. (1962a). Flow of ground water in sands of non-uniform thickness. Part 1. Flow in a wedge-shaped aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 67:703–709.
- Hantush, M. S. (1962b). Flow of ground water in sands of non-uniform thickness. Part 2. Approximate Theory. *Journal of Geophysical Research*, 67:711–720.
- Hantush, M. S. (1962c). Flow of ground water in sands of non-uniform thickness. Part 3. Flow to Wells. *Journal of Geophysical Research*, 67:1527–1534.
- Jacob, C. E. (1950). Flow of groundwater. *Engineering hydraulics*, pp. 321–386.
- Jha, M. K., Kamii, Y., y Chikamori, K. (2003). On the estimation of phreatic aquifer parameters by the tidal response technique. *Water Resources Management*, 17:69–88.
- Kosuth, P., Callède, J., Laraque, A., Filizola, N., Guyot, J. L., Seyler, P., Fritsch, J. M., y Guimarães, V. (2009). Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(22):3141–3150.
- Kruse, E., Deluchi, M., y García, J. M. (2016). Ambientes de sedimentación vinculados al acuífero Puelche en la región de La Plata. En *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea (Catamarca, 2016)*.
- Latorre, B. y Moret-Fernández, D. (2019). Simultaneous estimation of the soil hydraulic conductivity and the van Genuchten water retention parameters from an upward infiltration experiment. *Journal of Hydrology*, 572:461–469.

-
- Leray, S., Dreuzy, J. R., Bour, O., Labasque, T., y Aquilina, L. (2012). Contribution of age data to the characterization of complex aquifers. *Journal of Hydrology*, 464:54–68.
- Li, G., Li, H., y C., B. M. (2008). The enhancing effect of the elastic storage of the seabed aquitard on the tide-induced groundwater head fluctuation in confined submarine aquifer systems. *Journal of Hydrology*, 350:83–92.
- Li, H. y Jiao, J. J. (2001). Analytical studies of groundwater head fluctuation in a coastal confined aquifer overlain by a semi-permeable layer with storage. *Advances in Water Resources*, 24:565–573.
- Lo, W.-C., Yeh, C.-L., y Tsai, C.-T. (2007). Effect of soil texture on the propagation and attenuation of acoustic wave at unsaturated conditions. *Journal of hydrology*, 338(3-4):273–284.
- Martínez, D. y Bocanegra, E. (2002). Hydrogeochemistry and cation-exchange processes in the coastal aquifer of Mar del Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 10(3):393–408.
- Martínez, D., Massone, H., y Bocanegra, E. (2005). Groundwater salinization in the harbour area graben in Mar del Plata, Argentina. Hydrogeochemical perspective. *IGME, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 15:585–595.
- Masterson, J. P., Pope, J. P., Monti, J. J., Nardi, M. R., Finkelstein, J. S., y McCoy, K. J. (2015). Hydrogeology and hydrologic conditions of the northern Atlantic coastal plain aquifer system from Long Island, New York, to North Carolina. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013–5133*.
- Milly, P. C. D., Dunne, K. A., y Vecchia, A. V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438:347–350.
- Monachesi, L. B. y Guarracino, L. (2011). Exact and approximate analytical solutions of groundwater response to tidal fluctuations in a theoretical inhomogeneous coastal confined aquifer. *Hydrogeology Journal*, 19:1443–1449.
- Mooney, H., Cropper, A., y Reid, W. (2005). Confronting the human dilemma. *Nature*, 434(7033):561.
- Nussbaumer, H. J. (1981). The fast Fourier transform. En *Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms*, pp. 80–111. Springer.

- Okuyama, K., Fujiwara, M., Ohnishi, C., Watanabe, H., Tabira, K., y Nishigaki, M. (2002). System for estimating coefficients of permeability in regional ground water survey. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 701:17–28.
- ONU (2003). *Water for People, Water for Life: The United Nations World Water Development Report: Executive Summary*. Unesco Pub.
- Parker, G. (1990). Estratigrafía del Río de La Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 45(3-4):193–204.
- Pizarro, H., Rodríguez, P., Bonaventura, S. M., O’Farrell, I., e Izaguirre, I. (2007). The sudestadas: a hydro-meteorological phenomenon that affects river pollution (River Luján, South America). *Hydrological Sciences Journal*, 52(4):702–712.
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, surges and mean sea level*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY.
- Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198:69–97.
- Reiter, L., Falk, H., Groat, C., y Coussens, C. M. (2004). *From Source Water to Drinking Water: Workshop Summary*. National Academies Press.
- Rinaldi, V. A., Abril, E. G., y Clariá, J. J. (2006). Aspectos geotectónicos fundamentales de las formaciones del delta del Río Paraná y del estuario del Río de La Plata. *Rev. Int. de Desastres Naturales*, 45(3-4):193–204.
- Rotzoll, K., El-Kadi, A. I., y Gingerich, S. B. (2008). Analysis of an unconfined aquifer subject to asynchronous dual-tide propagation. *Ground Water*, 46:239–250.
- Rotzoll, K., Gingerich, S. B., y El-Kadi, A. I. (2013). Estimating hydraulic properties from tidal attenuation in the northern Guam Lens Aquifer, territory of Guam, USA. *Hidrogeology Journal*, 21:643–654.
- Santoro, P. E., Fossati, M., y Piedra-Cueva, I. (2013). Study of the meteorological tide in the Río de La Plata. *Continental Shelf Research*, 60:51–63.
- Torge, W. (2001). Geodesy.
- Trabucchi, M., Carrera, J., y Fernández-García, D. (2018). Generalizing Agarwal’s method for the interpretation of recovery tests under non-ideal conditions. *Water Resources Research*, 54(9):6393–6407.

-
- Trapp, H. (1992). Hydrogeologic framework of the northern Atlantic coastal plain in parts of North Carolina, Virginia, Maryland, Delaware, New Jersey, and New York. *US Geological Survey Professional Paper*, 1404:1–59.
- Trefry, M. G. (1999). Periodic forcing in composite aquifers. *Advances in Water Resources*, 22:645–656.
- Trefry, M. G. y Bekele, E. (2004). Structural characterization of an island aquifer via tidal methods. *Water Resources Research*, 40:21pp.
- Trefry, M. G., McLaughlin, D., Lester, D. R., Metcalfe, G., Johnston, C. D., y Ord, A. (2011). Stochastic relationships for periodic responses in randomly heterogeneous aquifers. *Water Resources Research*, 47.
- van der Kamp, G. (1972). Tidal fluctuations in a confined aquifer extending under the sea. *24th Int. Geol. Congress*.
- van der Kamp, G. y Gale, J. E. (1983). Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains. *Water Resources Research*, 19(2):538–544.
- Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., y Lammers, R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289:284–288.
- Wang, Q., Zhan, H., y Tang, Z. (2015). Two-dimensional flow response to tidal fluctuation in a heterogeneous aquifer-aquitard system. *Hydrological Processes*, 29:927–935.
- Yeh, H.-D. y Huang, Y.-C. (2009). Analysis of pumping test data for determining unconfined-aquifer parameters: Composite analysis or not? *Hydrogeology Journal*, 17(5):1133–1147.
- Zhou, X., Song, C., Li, T., Chen, R., Zhang, H., Zhao, J., y Cao, Q. (2015). Estimation of aquifer parameters using tide-induced groundwater level measurements in a coastal confined aquifer. *Environ Earth Sci*, 73:2197–2204.