

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	General	2
1.2.2	Específicos	2
2	Revisión de antecedentes	3
2.1	Intrusión salina y formación de acuíferos costeros en islas	3
2.1.1	Procesos dispersivos en la zona de mezcla	4
2.1.2	Impacto de fluctuaciones de nivel del mar	5
2.1.3	Procesos hidroquímicos	5
2.2	Caracterización conceptual del problema	5
2.2.1	Teoría de interfaz abrupta	5
2.2.2	Teoría de interfaz dispersa	7
2.2.3	Soluciones analíticas desarrolladas	8
2.2.4	Evolución temporal de un lente de agua dulce	12
2.3	Trabajos experimentales previos	13
2.4	COMSOL Multiphysics	14
3	Metodología	17
3.1	Modelo físico	17
3.2	Diseño del montaje experimental	18
3.2.1	Recipiente principal	18
3.2.2	Sistema de recarga superficial y lateral	19
3.3	Elección y propiedades de los medios permeables	21
3.3.1	Elección de granulometrías	21
3.3.2	Conductividad hidráulica	21
3.3.3	Porosidad	22
3.4	Propiedades del agua de mar	22
3.5	Captura y análisis de imágenes	23
3.6	Construcción del modelo numérico	26
3.6.1	Geometría	26
3.6.2	Construcción de la malla de elementos	27
3.6.3	Parámetros de entrada	28
3.6.4	Condiciones iniciales y de borde	29
3.6.5	Balance de masa	30
3.7	Propagación de errores	31

4 Resultados y Análisis	33
4.1 Descripción de las experiencias	33
4.2 Interfaz de densidad en régimen permanente	35
4.3 Evolución temporal de la profundidad máxima de la interfaz	43
4.4 Validez de las soluciones analíticas en base a las razones de aspecto	50
5 Aplicación de la solución analítica al caso de la isla de Rapa Nui	54
6 Conclusiones y recomendaciones	57
6.1 Montaje experimental	57
6.2 Análisis de imágenes	58
6.3 Modelo numérico	58
6.4 Relevancia de K y R en la profundización de la interfaz	59
Bibliografía	59
Anexos	62
Anexo A Fotografías del montaje experimental	63
Anexo B Medición de conductividad hidráulica	66
Anexo C Resultados experimentales en régimen permanente	70
Anexo D Resultados modelo numérico en régimen permanente	72
Anexo E Datos de precipitaciones en Rapa Nui, Chile	74
Anexo F Análisis adimensional del tiempo característico de recarga en islas	75

Índice de tablas

3.1	Comparación resultados permeámetro y Método de Shepherd.	22
3.2	Porosidades obtenidas	22
3.3	Intensidades de filtro	25
3.4	Parámetro de entrada utilizados en el modelo para la matriz de suelo	28
3.5	Parámetros de entrada agua dulce y de mar utilizados en el modelo numérico	29
3.6	Rangos medidos y errores experimentales de instrumentos utilizados	32
3.7	Errores asociados a los parámetros relevante del montaje	32
4.1	Experiencias de laboratorio y simulaciones realizadas.	33
4.2	Transformación o escala de pixeles a cm según cada experiencia realizada	34
4.3	Balance de masa de cada simulación realizada.	38
4.4	Resumen profundidad máxima alcanzada.	38
4.5	Resumen profundidad de inicio de bordes de la interfaz	39
4.6	Comparación longitud l_e experimental y teórica	40
4.7	Comparación de tiempos a estado estacionario.	50
4.8	Resumen de errores relativos de las observaciones experimentales respecto a las soluciones analíticas y resultados numéricos de la profundidad máxima en régimen permanente.	51
4.9	Relaciones de aspecto entre la profundidad máxima de la interfaz en régimen permanente y el ancho total del montaje, para los resultados experimentales y teóricas.	53
B.1	Datos medición conductividad hidráulica	67
B.2	Resumen K calculados.	68
E.1	Precipitación media anual en Rapa Nui periodo 1983 - 2015.	74
F.1	Tiempos de recarga para cada zona de permeabilidad según el nivel de infiltración.	76

Índice de figuras

2.1	a) Antes de los bombeos excesivos; b) Después del bombeo excesivo de varios pozos. Elaboración propia.	4
2.2	Mecanismo generación zona de mezcla. Modificada de (García-Huidobro Covarrubias, 2007)	4
2.3	Corte vertical de un acuífero costero. Modificado de (Todd & Mays, 2005)	6
2.4	Carga hidráulica en agua de densidad variable, donde FW representa agua dulce, DW agua difusa de mezcla y SW agua salada. Modificado de (Luszczynski, 1961)	7
2.5	Volumen de control. Modificado de (Fetter, 1972)	9
2.6	Diagrama en corte que define el esquema conceptual. Modificado de (Vacher, 1988)	10
2.7	Esquema conceptual modificado del planteamiento de Van der Veer (1977).	12
2.8	Esquema del modelo físico utilizado en sus experimentos. Modificado de Stoeckl & Houben (2012).	13
2.9	Interfaz gráfica COMSOL.	16
3.1	Modelo físico a simular.	17
3.2	Esquema recipiente prismático.	18
3.3	Esquema montaje inicial.	19
3.4	Sistema de distribución de caudal.	20
3.5	(a) Densímetro marca Ambrus Gamma; (b) Medidor multiparámetro W340i	23
3.6	(a) Comparación de intensidades de color en un perfil vertical para una experiencia con Granulometría 1; (b) Comparación de intensidades de color en un perfil vertical para una experiencia con Granulometría 2. Notar que para ambos casos la línea negra segmentada representa la posición de la interfaz de densidad en los perfiles.	24
3.7	(a) Imagen binaria sin suavizado; (b) Imagen binaria con suavizado; (c) Interfaz detectada originalmente y luego filtrada de la imagen (b).	25
3.8	Geometría modelo numérico. Se especifica los taludes y el origen del sistema de referencia.	27
3.9	Distribución de la malla de elementos en la geometría.	28
3.10	(a) Condiciones de borde de no flujo (rojo), recarga (azul) y carga constante de nivel del mar (verde); (b) Área de salida del flujo de agua dulce	30
3.11	Interfaz de COMSOL para calcular el balance. A la izquierda el menú del modelo, a su lado, primero la zona de entrada de agua dulce, luego, la zona de salida a los costados, destacadas en azul en la parte superior y a la derecha la superficie del modelo donde se calcula el almacenamiento.	31

4.1	Imagen estado inicial de experimento 3, se destaca el sistema de referencia utilizado y se enmarca la zona de análisis de las imágenes.	34
4.2	(a) Captura del estado permanente de la experiencia 5 a los 240 [min]; (b) Distribución de la densidad promedio dentro del dominio de modelación. La solución corresponde al régimen permanente de la experiencia 5. La barra de color representa la densidad promedio en la matriz de suelo.	35
4.3	(a) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_1R_1 ; (b) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_1R_2 ; (c) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_1R_3	36
4.4	(a) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_1 ; (b) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_2 ; (c) Forma de la interfaz en régimen permanente para K_2R_3	37
4.5	Relación entre el ancho l_e experimental y el cociente R/K	40
4.6	(a) Resultados experimentales régimen permanente para la granulometría 1; (b) Resultados experimentales régimen permanente para la granulometría 2.	41
4.7	Interfaz a partir de análisis de imágenes (líneas continuas) y solución analítica de Fetter (1972) (líneas segmentadas) para (a) $R = 1.85[m/d]$; (b) $R = 1.38[m/d]$; (c) $R = 0.92[m/d]$	42
4.8	(a) 2 [min] Experiencia 2; (b) 30 [min] Experiencia 2.	43
4.9	(a) 120 [min] Experiencia 2; (b) 240 [min] Experiencia 2.	44
4.10	(a) Solución numérica 2 [min] Experiencia 2; (b) Solución numérica 30 [min] Experiencia 2.	44
4.11	(a) Solución numérica 120 [min] Experiencia 2; (b) Solución numérica 240 [min] Experiencia 2.	44
4.12	(a) Profundidad máxima Experiencia 1; (b) Profundidad máxima Experiencia 2; (c) Profundidad máxima Experiencia 3.	46
4.13	(a) Profundidad máxima Experiencia 4; (b) Profundidad máxima Experiencia 5; (c) Profundidad máxima Experiencia 6.	47
4.14	(a) Observaciones experimentales del régimen impermanente Granulometría 1;(b) Observaciones experimentales del régimen impermanente Granulometría 2.	48
4.15	(a) Comparación régimen impermanente para $R = 1.85[m/d]$;(b) Comparación régimen impermanente para $R = 1.32[m/d]$; (c) Comparación régimen impermanente para $R = 0.92[m/d]$	49
4.16	(a) Granulometría 1; (b) Granulometría 2.	51
4.17	Comparación de la diferencia de profundidades máximas en régimen permanente de cada granulometría según recarga.	52
4.18	Relación de los adimensionales relevantes del montaje experimental.	53
5.1	Sección de estudio. Se señalan los pozos que poseen información de niveles cerca de la zona de análisis a partir del informe de (Errol L. Montgomery, inc, 2011).	55

5.2	Forma de la interfaz y nivel freático estimada para Rapa Nui sin bombeos. $x = 0$ corresponde al centro de la sección de análisis.	56
A.1	Montaje experimental.	63
A.2	(a) Bomba conectada a agua dulce y salada; (b) Bomba conectada sólo a agua dulce	64
A.3	Sistema de recarga superficial.	65
B.0	(a) Permeámetro de carga constante; (b) Equipo utilizado: permeámetro conectado a piezómetro, abastecido por el flujo de una bomba peristáltica.	67
B.1	Ajuste para obtención de K según granulometría.	68
B.2	Relación tamaño medio del grano y conductividad hidráulica (Shepherd,1989).	69
C.0	(a) Estado permanente Experiencia 1; (b) Estado permanente Experiencia 2; (c) Estado permanente Experiencia 3; (d) Estado permanente Experiencia 4; (e) Estado permanente Experiencia 5; (f) Estado permanente Experiencia 6.	71
D.0	(a) Estado permanente Experiencia 1; (b) Estado permanente Experiencia 2; (c) Estado permanente Experiencia 3; (d) Estado permanente Experiencia 4; (e) Estado permanente Experiencia 5; (f) Estado permanente Experiencia 6.	73
F.1	Relación entre $\frac{Z_t}{Z_\infty}$ y $\frac{t}{T}$. Notar que el comportamiento tiende a una relación logarítmica.	76