



DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y GESTIÓN HÍDRICA  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS DEL PACÍFICO  
CENTRAL, PROVINCIAS DE PUNTARENAS Y SAN JOSÉ, COSTA  
RICA, AMÉRICA CENTRAL**

Realizado por:

Geól. MSc. Marita Alvarado Velas  
Geól. Licda. Magdalena Monge Cordero  
Geól. MSc. Michelle Arias Fernández  
Geól. Lic. Jonathan Chinchilla Cortés  
Geóg. Licda. Katherine Briones Cambronero  
Geól. Lic. Alonso Alfaro Martínez

JUNIO, 2021



ELABORADO POR:

---

MSc. Marita Alvarado Velas  
Unidad de Investigación Hidrogeológica

---

Licda. Magdalena Monge Cordero  
Unidad de Investigación Hidrogeológica

---

MSc. Michelle Arias Fernández  
Unidad de Investigación Hidrogeológica

---

Lic. Jonathan Chinchilla Cortés  
Unidad de Investigación Hidrogeológica

---

Licda. Katherine Briones Cambronero  
Unidad de Investigación Hidrogeológica

---

Lic. Alonso Alfaro Martínez  
Unidad de Investigación Hidrogeológica

REVISADO Y APROBADO POR:

---

MSc. Roberto Ramírez Chavarría  
Director, Investigación y Gestión Hídrica

# TABLAS DE CONTENIDOS

---

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Justificación .....	1
1.2 Propósito del informe .....	2
1.3 Objetivo general.....	2
1.4 Objetivos específicos.....	3
1.5 Ubicación geográfica administrativa .....	3
1.6 Cuencas hidrográficas.....	4
1.7 Escala de trabajo.....	7
1.8 Período de análisis .....	8
1.9 Metodología de trabajo .....	9
1.9.1 Modelo hidrogeológico conceptual .....	11
1.9.2 Recarga Potencial y disponibilidad .....	12
1.9.3 Vulnerabilidad de acuíferos.....	16
1.10 Antecedentes.....	17
1.11 Alcances y limitantes del estudio.....	18
1.11.1 Alcances .....	18
1.11.2 Limitantes.....	19
2. GEOLOGÍA .....	21
2.1 Marco Geológico Regional .....	21
2.1.1 Complejo de Nicoya (Basamento regional) .....	21
2.1.2 Costa Rica Central: Herradura, Turrubares y Candelaria. ....	23
2.1.3 Complejo Básico de Quepos.....	24
2.1.4 Formación Golfito .....	24
2.1.5 Formación Tulín.....	24
2.1.6 Formación Punta Serrucho.....	25
2.1.7 Formación Caótica Punta Quepos.....	26
2.1.8 Formación Fila de Cal .....	27
2.1.9 Formación Térraba .....	27
2.1.10 Formación Puerto Nuevo.....	28
2.1.11 Formación Punta Carballo.....	29

2.1.12 Formación Punta Judas .....	29
2.1.13 Formación Curré .....	29
2.1.14 Formación Paso Real .....	30
2.1.15 Formación Valle de El General .....	31
2.1.16 Depósitos Recientes del Cuaternario .....	31
2.2 Tectónica Regional .....	32
2.2.1 La Fosa Mesoamericana .....	32
2.2.2 La zona Ante Arco .....	33
2.2.3 Sismicidad y neotectónica en el ante arco .....	34
2.2.4 Las cuencas ante arco .....	37
2.3 Geología Local .....	37
2.3.1 Registros litológicos de pozos .....	37
2.3.2 Perforaciones exploratorias .....	38
2.3.3 Exploración geofísica .....	51
2.3.4 Perfiles geológicos .....	52
2.3.5 Mapeo geológico .....	65
3. HIDROGEOLOGÍA .....	69
3.1 Sector Herradura-Jacó .....	69
3.1.1 Inventario de pozos .....	69
3.1.2 Niveles de agua subterránea y dirección del flujo .....	72
3.1.3 Aforos diferenciales .....	73
3.1.4 Modelo hidrogeológico conceptual .....	75
3.2 Sector Hermosa – Esterillos .....	85
3.2.1 Inventario de pozos .....	85
3.2.2 Aforos diferenciales .....	88
3.2.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	89
3.3. Sector Parrita – Quepos .....	92
3.3.1 Inventario de pozos .....	92
3.3.2 Aforos diferenciales .....	95
3.3.3 Modelo Conceptual Hidrogeológico .....	97
3.4 Sector Naranja – Savegre – Matapalo .....	103
3.4.1 Inventario de pozos .....	103
3.4.2 Aforos diferenciales .....	105

3.4.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	108
3.5 Sector Dominical – Ballena .....	112
3.5.1 Inventario de pozos.....	112
3.5.2 Aforos diferenciales .....	115
3.5.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	121
4. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN.....	138
4.1 Herradura – Jacó .....	141
4.1.1 Acuífero Herradura.....	141
4.1.2 Acuífero Jacó. ....	143
4.2 Hermosa – Esterillos .....	145
4.3 Parrita – Quepos.....	148
4.4 Naranjo – Savegre – Matapalo.....	150
4.5 Dominical – Ballena .....	153
5. RECARGA POTENCIAL .....	159
5.1 Clima.....	159
5.2 Balance Hídrico de Suelos .....	162
5.3 Resultados de Recarga Potencial por sectores.....	168
5.3.1 Recarga potencial Herradura – Jacó .....	168
5.3.2 Recarga potencial Hermosa – Esterillos .....	174
5.3.3 Recarga potencial Parrita – Damas - Quepos .....	177
5.3.4 Recarga potencial Naranjo - Savegre – Matapalo .....	181
5.3.5 Recarga potencial Dominical-Ballena.....	189
5.4 Resultados de la recarga por Hidrograma de pozos.....	196
5.4.1 Sector Herradura-Jacó .....	196
5.4.2 Sector Hermosa-Esterillos .....	198
5.4.3 Sector Parrita-Quepos.....	199
5.4.4 Sector Naranjo-Savegre-Matapalo .....	201
5.4.5 Sector Dominical-Ballena .....	203
5.5 Rendimiento sostenible de acuíferos .....	206
5.5.1 Rendimiento sostenible sector Herradura-Jacó.....	207
5.5.2 Rendimiento sostenible sector Hermosa-Esterillos .....	208
5.5.3 Rendimiento sostenible sector Parrita-Quepos.....	208
5.5.4 Rendimiento sostenible sector Naranjo-Savegre-Matapalo.....	210

5.5.5 Rendimiento sostenible sector Dominical-Ballena .....	212
CONCLUSIONES.....	215
RECOMENDACIONES.....	224
BIBLIOGRAFÍA.....	227
ANEXOS.....	233
Anexo 1: Información de los pozos registrados. ....	233
Anexo 2: Descripción detallada de las perforaciones exploratorias.....	233
Anexo 3: Información de los resultados de sondeos eléctricos verticales.....	233
Anexo 4: Registro de afloramientos del Pacífico Central.....	233
Anexo 5: Resultados de los estudios de suelos. ....	233
Anexo 6: Redes de monitoreo. ....	233
Anexo 7: Valores asignados a los parámetros GOD.....	233
Anexo 8: Información meteorológica. ....	233
Anexo 9: Cuadro resumen características de los acuíferos. ....	233

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. ....	4
Figura 2. Cuencas principales y áreas silvestres protegidas. ....	5
Figura 3. Flujograma de relación entre los datos a utilizar y los datos resultantes. ....	15
Figura 4. Marco tectónico de Costa Rica (Tomado de Montero, 2001). ....	33
Figura 5. Contexto morfotectónico de la zona de estudio. Antearco (2.4 Herradura, 2.5 Quepos), cuencas antearco (3.4 Parrita - Quepos) y paleocuenas antearco (4.4 Esparza y 4.5 Térraba) (Recuperado de Denyer et.al., 2003). ....	34
Figura 6. Ubicación de las fallas Barranca (FB), Jesús María (FJM), Tárcoles (FTA), Quepos (FQ) y otras, como parte del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). Nótese además la ubicación de la Falla Longitudinal de Costa Rica (FL) a lo largo de la costa. (Recuperado de Montero 2000 b). ....	36
Figura 7. Ubicación de pozos registrados, perforaciones exploratorias y SEVS. ....	39
Figura 8. Perfil geológico A-B, sector de Herradura. ....	53
Figura 9. Perfil geológico E-F, sector de Herradura. ....	53
Figura 10. Perfil geológico I-J, sector de Herradura. ....	54
Figura 11. Perfil geológico K-L, sector de Herradura. ....	55
Figura 12. Perfil A-A´ y B-B´ en la zona de Hermosa y Esterillos. ....	56
Figura 13. Perfil D-D´ en la zona de Hermosa y Esterillos. ....	57
Figura 14. Perfil transversal A-A´, sector parte baja de Parrita. ....	58
Figura 15. Perfil transversal B-B´, sector parte Parrita - Quepos. ....	59
Figura 16. Perfil transversal a la cuenca Naranjo–Savegre–Matapalo. ....	60
Figura 17. Perfil longitudinal a la cuenca Naranjo–Savegre–Matapalo. ....	62
Figura 18. Perfil A-A´ en la cuenca del río Uvita. ....	63
Figura 19. Perfil B-B´ en la cuenca del río Uvita y C-C´ en el sector de playa Ballena. ....	64
Figura 20. Perfil D-D´ en la zona de Tortuga–Ojochal y perfil E-E´ en el sector de Dominical. ....	65
Figura 21. Mapa geológico local sectores de Herradura, Jacó, Hermosa, Esterillos, Parrita y una porción de Quepos. ....	66
Figura 22. Mapa geológico local sectores de Quepos, Naranjo, Savegre y Matapalo. ....	67
Figura 23. Mapa geológico local sectores de Dominical, Uvita y Ballena. ....	68
Figura 24. Pozos, manantiales y concesiones registrados en las zonas de Herradura y Jacó. ....	70
Figura 25. Ubicación de los aprovechamientos de los acueductos, sector Herradura-Jacó. ....	72
Figura 26. Ubicación de afluentes en el la microcuenca Cañablanca y comportamiento de efluencia – influencia. ....	74
Figura 27. Ubicación de afluentes en el las microcuencas Doña María y Naranjal, comportamiento de efluencia – influencia. ....	75
Figura 28. Mapa hidrogeológico local, sector de Herradura. ....	79
Figura 29. Perfil Hidrogeológico A-B. ....	80
Figura 30. Perfil Hidrogeológico E-F. ....	81
Figura 31. Mapa Hidrogeológico local del sector de Jacó. ....	83
Figura 32. Perfil Hidrogeológico I-J. ....	84
Figura 33. Perfil Hidrogeológico O-P. ....	85
Figura 34. Pozos, manantiales y concesiones registrados en la zona de Hermosa y Esterillos. ....	86
Figura 35. Afluentes realizados en el río Gloria, en la zona de Hermosa y Esterillos. ....	89

Figura 36. Equipotenciales en la zona de Esterillos, asociadas al acuífero ubicado en la Formación Punta Carballo. ....	90
Figura 37. Equipotenciales dibujadas para la zona de playa Hermosa y Pochotal, asociadas al acuífero ubicado en rocas del Complejo de Nicoya. ....	92
Figura 38. Pozos, manantiales y concesiones registrados. ....	93
Figura 39. Red de monitoreo Parrita – Quepos. ....	95
Figura 40. Mapa de aforos puntuales, sector Parrita Quepos. ....	96
Figura 41. Comportamiento influente de los ríos Damas y Damitas. ....	97
Figura 42. Mapa de elementos hidrogeológicos, acuífero Térraba. ....	100
Figura 43. Mapa de elementos hidrogeológicos, Acuífero poroso Aluvial. ....	102
Figura 44. Pozos y manantiales, cuenca Naranjo- Savegre y Matapalo, fuente (SENARA-SINIGIRH, 2020). ....	105
Figura 45. Ubicación de aforos en la zona de estudio Naranjo – Savegre – Matapalo. ....	108
Figura 46. Modelo Hidrogeológico Conceptual. ....	109
Figura 47. Equipotenciales, cuenca Naranjo – Savegre – Matapalo. ....	112
Figura 48. Pozos, manantiales y concesiones registradas en la zona de Hermosa y Esterillos. ....	113
Figura 49. Ubicación de aforos en la zona de Dominical – Ballena. ....	119
Figura 50. Ubicación de aforos en el río Uvita y comportamiento de efluencia – influencia. ....	121
Figura 51. Equipotenciales de la unidad acuífera Térraba, sector Uvita–Ballena. ....	125
Figura 52. Equipotenciales de la unidad acuífera Térraba, sector Dominical–Uvita. ....	126
Figura 53. Equipotenciales de la unidad acuífera Térraba, sector Hatillo-Dominical. ....	127
Figura 54. Equipotenciales para un sector del acuífero aluvial en Dominical. ....	131
Figura 55. Equipotenciales para un sector del acuífero aluvial en Uvita. ....	133
Figura 56. Equipotenciales para un sector del acuífero aluvial en Ballena. ....	135
Figura 57. Equipotenciales para un sector del acuífero aluvial en Punta Mala (barrio Canduchos). ....	137
Figura 58. Categorías de vulnerabilidad, método GOD. ....	139
Figura 59. Clasificación del parámetro G en acuíferos libre a cubierto, según SENARA (2017 a). ....	140
Figura 60. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, acuífero Herradura. ....	142
Figura 61. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y el uso de suelo, acuífero Herradura. ....	143
Figura 62. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, acuífero Jacó. ....	144
Figura 63. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso de suelo, acuífero Jacó. ....	145
Figura 64. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para la zona de Hermosa – Esterillos. ....	147
Figura 65. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso de suelo, Hermosa-Esterillos. ....	147
Figura 66. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para la zona Parrita – Quepos. ....	149
Figura 67. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso del suelo, sector Parrita – Quepos. ....	150

Figura 68. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para la zona de Naranjo – Matapalo – Savegre.....	152
Figura 69. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso del suelo, sector Naranjo – Matapalo – Savegre. ....	153
Figura 70. Mapa de vulnerabilidad intrínseca para algunos sectores entre Hatillo y Puerto Nuevo. ....	154
Figura 71. Mapa de vulnerabilidad intrínseca para algunos sectores entre las playas Hermosa y Ballena. ....	155
Figura 72. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y el uso de suelo, sectores Hatillo y Puerto Nuevo.....	157
Figura 73. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso del suelo entre playa Hermosa y Ballena. ....	158
Figura 74. Estaciones meteorológicas en el área de estudio. ....	159
Figura 75. Comportamiento de la precipitación en los sectores noroeste y central (cuenca baja) del área de estudio. ....	161
Figura 76. Comportamiento de la precipitación en los sectores central (cuenca alta) y sureste del área de estudio. ....	161
Figura 77. Registros de temperaturas para las estaciones de Tinamaste y La Ligia (Parrita). ....	162
Figura 78. Mapa de uso de suelo en las zonas de Herradura, Jacó, Hermosa, Esterillos y Parrita. ....	164
Figura 79. Mapa de uso de suelo en las zonas de Damas, Quepos, Naranjito y Matapalo.....	165
Figura 80. Mapa de uso de suelo en las zonas de Dominical Uvita, Ballena y Punta Mala. ....	166
Figura 81. Mapa de recarga potencial, sectores de Herradura, Jacó, Hermosa, Esterillos y Parrita. ....	173
Figura 82. Mapa de recarga potencial y uso del suelo, sector Herradura y Jacó. ....	174
Figura 83. Mapa de recarga potencial y uso de suelo , sector Hermosa-Esterillos.....	176
Figura 84. Porcentaje de recarga potencial por formación geológica.....	179
Figura 85. Mapa de recarga potencial y uso del suelo, sector Parrita – Quepos.....	181
Figura 86. Precipitaciones promedio mensuales en mm/mes, período 1871-2017. ....	183
Figura 87. Evapotranspiración mensual, período 181-2017, estaciones Damas, Quepos y Barú. ....	184
Figura 88. Porcentaje de recarga según formación geológica.....	185
Figura 89. Mapa de recarga potencial, sector Naranjo – Savegre – Matapalo.....	187
Figura 90. Mapa de recarga potencial y uso del suelo, sector Naranjo – Savegre – Matapalo. ....	188
Figura 91. Hidrograma de precipitaciones, estaciones Tinamaste y Hacienda Barú.....	190
Figura 92. Mapa de recarga potencial, sector Dominical-Ballena.....	194
Figura 93. Mapa de recarga potencial y uso del suelo, sector Dominical – Ballena. ....	195
Figura 94. Variación del nivel de agua subterránea en el pozo HE-183. ....	196
Figura 95. Variación del nivel de agua subterránea en el pozo HE-184. ....	197
Figura 96. Variación del nivel de agua subterránea en el pozo TS-170.....	197

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de la zona de estudio. ....	4
Tabla 2. Microcuencas de la zona de estudio.....	5
Tabla 3. Fases, técnicas y métodos aplicados en la investigación.....	9
Tabla 4. Pozos registrados en SENARA. ....	38
Tabla 5. Resultados de las perforaciones exploratorias. ....	40
Tabla 6. Usos del agua para los pozos registrados en SENARA. ....	69
Tabla 7. Usos del agua en las concesiones registradas en el SINIGIRH. ....	70
Tabla 8. Aprovechamientos de los entes operadores de acueductos en el sector de Herradura-Jacó. ....	71
Tabla 9. Sitios de aforo en quebrada Cañablancal y río Copey. ....	73
Tabla 10. Usos del agua para los pozos registrados en SENARA. ....	87
Tabla 11. Usos del agua para las concesiones mostradas en el SINIGIRH. ....	87
Tabla 12. Sitios de aforo en Hermosa y Esterillos. ....	88
Tabla 13. Usos del agua para los pozos registrados en la base de datos de SENARA. ....	93
Tabla 14. Usos del agua para las concesiones mostradas en el SINIGIRH. ....	94
Tabla 15. Sitios de aforo en Parrita – Quepos. ....	95
Tabla 16. Niveles del agua subterránea en pozos ubicados en Parrita – Quepos.....	98
Tabla 17. Usos para los pozos registrados en el SENARA.....	103
Tabla 18. Pozos y manantiales registrados en el SINIGIRH (2020). ....	104
Tabla 19. Usos del agua para los pozos registrados en el SINIGIRH. ....	104
Tabla 20. Usos del agua para los manantiales registrados en el SINIGIRH. ....	104
Tabla 21. Aforos según la base de datos del SENARA. ....	106
Tabla 22. Aforos elaborados por la UEN, Gestión Ambiental del AyA (2010). ....	106
Tabla 23. Usos del agua para los pozos registrados en SENARA. ....	114
Tabla 24. Usos del agua para las concesiones mostradas en el SINIGIRH. ....	115
Tabla 25. Aforos existentes en la base de datos del SENARA. ....	116
Tabla 26. Aforos elaborados por la UEN, Gestión Ambiental del AyA (2010). ....	117
Tabla 27. Aforos realizados en el cauce del río Uvita y otros cauces tributarios.....	120
Tabla 28. Manantiales registrados en la base de datos de SENARA. ....	122
Tabla 29. Estaciones meteorológicas consultadas en el estudio.....	159
Tabla 30. Uso del suelo en la zona de estudio. ....	163
Tabla 31. Valores de Kv para el Pacífico Central. ....	163
Tabla 32. Valores de profundidad de raíces en el Pacífico Central.....	166
Tabla 33. Valores de Kp en el Pacífico Central.....	167
Tabla 34. Precipitación promedio mensual para las estaciones localizadas en el sector Herradura-Jacó. ....	169
Tabla 35. Datos climáticos utilizados en el sector de Herradura-Jacó.....	170
Tabla 36. Recarga potencial por litología, sector Herradura-Jacó.....	170
Tabla 37. Clases de recarga en función del rango, sector Herradura – Jacó.....	171
Tabla 38. Datos climáticos utilizados en el sector de Hermosa y Esterillos. ....	174
Tabla 39. Recarga potencial por litología.....	175

Tabla 40. Datos climáticos del sector Parrita-Quepos.....	177
Tabla 41. Datos de evapotranspiración de las estaciones Damas y Finca La Ligia, sector Parrita-Quepos.....	178
Tabla 42. Recarga potencial según litología, sector Parrita-Quepos.....	179
Tabla 43. Clases de recarga potencial en función del rango, sector Parrita-Quepos. ....	180
Tabla 44. Precipitación mensual registrada.....	182
Tabla 45. Evapotranspiración mensual, estaciones Damas-Quepos y Barú. ....	183
Tabla 46. Recarga potencial, cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo.....	184
Tabla 47. Clases de recarga potencial en función del rango.....	186
Tabla 48. Datos climáticos, estación Hacienda Barú, sector Dominical-Ballena. ....	191
Tabla 49. Recarga potencial por unidad hidrogeológica, sector Dominical-Ballena. ....	192
Tabla 50. Clases de recarga potencial en función del rango.....	192
Tabla 51. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, acuífero Herradura. ....	198
Tabla 52. Comparación de metodologías para la estimación de recarga, sector Herradura-Jacó. .....	198
Tabla 53. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, sector Hermosa-Esterillos. .....	199
Tabla 54. Comparación de metodologías para estimación de la recarga, sector Hermosa-Esterillos. ....	199
Tabla 55. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, sector Parrita-Quepos... 200	
Tabla 56. Comparación de las metodologías para la estimación de la recarga, sector Parrita-Quepos.....	201
Tabla 57. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, sector Naranjo-Savegre-Matapalo.....	202
Tabla 58. Comparación de las metodologías para la estimación de la recarga, sector Naranjo-Savegre-Matapalo. ....	203
Tabla 59. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, sector Domicical-Ballena. .....	204
Tabla 60. Comparación de las metodologías para la estimación de la recarga, sector Dominical-Ballena. ....	205
Tabla 61. Variables para la estimación de caudal de extracción por pozo, según el uso reportado. ....	207
Tabla 62. Resultados del análisis de rendimiento sostenible, sector de Hermosa-Esterillos. .	208
Tabla 63. Caudales de extracción en Parrita-Quepos. ....	209
Tabla 64. Caudal de los pozos y punteras inventariados en el campo. ....	210
Tabla 65. Resultados del análisis de rendimiento sostenible, sector de Parrita-Quepos.....	210
Tabla 66. Pozos excavados inventariados en el campo.....	211
Tabla 67. Caudales de extracción en el sector Naranjo-Savegre-Matapalo. ....	211
Tabla 68. Resultados del análisis de rendimiento sostenible, sector Naranjo-Savegre-Matapalo. .....	212
Tabla 69. Caudales de extracción en el sector Dominical-Ballena.....	213

## RESUMEN

La presente investigación se genera dentro del marco del Programa de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PROGIRH) – SENARA, en atención a la importancia de los acuíferos del Pacífico Central para generar conocimiento técnico y al deber institucional de proteger e investigar el recurso hídrico subterráneo.

La zona de estudio se localiza en la costa Pacífica de Costa Rica, se extiende desde Herradura, cantón de Garabito hasta la zona de Punta Mala-Fila Marítima al NE de Ojochal-Tortuga en el cantón de Osa, abarcando un área de 1749,5 km<sup>2</sup>. El suministro de agua potable es a través de tomas de agua superficial, pozos (perforados y excavados) de producción, administrados por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y ASADAS. El crecimiento de la población, sumado al desarrollo de las actividades agrícolas, industriales y turísticas, que impactan de manera positiva en la economía costarricense, ha conllevado a la necesidad de caracterizarlo hidrogeológicamente para un mejor aprovechamiento y administración del recurso.

A partir del análisis regional y local de la geología, estructuras, bases de datos de pozos (SENARA, SINIGIRH y AyA), la ejecución de pruebas de infiltración, aforos, construcción de piezómetros, definición de los parámetros de los suelos (capacidad de campo, densidad aparente, punto de marchitez), sondeos eléctricos verticales, redes de monitoreo, se construye el modelo hidrogeológico conceptual por sector (Herradura-Jacó, Hermosa-Esterillos, Parrita-Quepos, Naranjo-Savegre-Matapalo y Dominical-Ballena).

La zona del Pacífico Central está compuesta por rocas de los complejos de Nicoya y Básico de Quepos, así como por las formaciones Golfito, Tulín, Punta Serrucho, Caótica de Quepos, Fila de Cal, Térraba, Puerto Nuevo, Punta Carballo, Punta Judas y los Depósitos Recientes del Cuaternario. Las principales expresiones tectónicas del área de estudio, como la subducción del levantamiento oceánico del Coco, la Falla Longitudinal de Costa Rica (FLCR) y el Cinturón Deformado del centro de Costa Rica constituyen los principales elementos que han dado origen al estado actual de dicha zona.

Se tiene un registro de 566 pozos de producción (Base de Datos SENARA), 35 piezómetros (pozos de monitoreo de SENARA), 63 manantiales y 838 concesiones (SINIGIRH). Los principales acuíferos se han desarrollado en los Depósitos Aluviales Recientes, desde Herradura hasta Ballena, con transmisividades que van desde 1588,40 m<sup>2</sup>/día (Acuífero Jacó) hasta 99 m<sup>2</sup>/día (acuífero aluvial sector Quepos), con conductividades variables en el rango de 1,42-251,72 m/día, aspecto que pone en evidencia la heterogeneidad de las granulometrías captadas. Las rocas acuíferas del Complejo de Nicoya, las Formaciones Tulín y Térraba, se caracterizan por su bajo potencial asociado a una porosidad secundaria desarrollada a través de fracturas, donde las transmisividades no superan los 42,37 m<sup>2</sup>/día y las conductividades hidráulicas son del orden de 1,54x10<sup>-6</sup> m/día a 3,55 m/día. Los acuíferos descritos tienen una recarga directa a partir del agua de lluvia de acuerdo con los cambios estacionales observados en los pozos de monitoreo, así como el aporte lateral de algunos cursos superficiales.

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación se determinó específicamente para los acuíferos desarrollados en los Depósitos Aluviales Recientes, la cual varía desde despreciable hasta alta. En los sectores de Herradura, Jacó, Pochotal (Hermosa-Esterillos), Tigre, Ligia, Nicoya (Parrita), San Rafael (Quepos), Lllamarón, Bartolo (Naranjo), Dominical y Ballena con un predominio de vulnerabilidad baja y media, mientras que se determinó una vulnerabilidad alta en el sector de Colonia (Chaman), El Silencio, Roncador, Portalón, Paquita y Damas.

De acuerdo con el BHS elaborado para el periodo 1981-2017, se determina una recarga potencial anual de 45 503,53 l/s que corresponde con un 21-29,70% de la precipitación promedio anual para el Pacífico Central. A partir del análisis de rendimiento sostenible se determina que con la extracción actual de 2 259,63 l/s, aún se cuenta con un caudal disponible de 23 993,98 l/s en la zona. Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de aplicar una serie de medidas tendientes a la protección del recurso hídrico para garantizar la cantidad y calidad de este.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Justificación

La disponibilidad de agua potable constituye un requisito fundamental para el desarrollo e instalación de cualquier actividad económica en el país, siendo que la demanda del recurso resulta sumamente alta y es amenazada debido a las actividades antrópicas que se derivan de los sectores agrícolas y turismo principalmente. Aunado a la ausencia de planes de ordenamiento territorial que promuevan un desarrollo planificado acorde a la disponibilidad del recurso hídrico.

En ausencia de capacidad de los operadores estatales para atender las necesidades y demandas de los distintos sectores productivos, una parte importante de la población ha optado a tener acceso al agua a través de pozos de producción propios.

En la región del Pacífico Central de Costa Rica existe una importante demanda hídrica, aumentada año con año por la afluencia y desarrollo inmobiliario turístico en las zonas costeras, actividad que constituye un ingreso económico importante para el sector. Alrededor de 600 pozos de producción de agua se localizan desde Herradura hasta Uvita, constituyendo una de las principales fuentes de captación de agua potable para consumo humano y para abastecer a todas las actividades que se desarrollan dentro de esta región. Esta situación contribuye enormemente en el incremento en la demanda por el recurso agua, para cubrir las diferentes necesidades, aspecto que incide directamente en su disponibilidad.

El recurso hídrico para el abastecimiento de las poblaciones humanas debe ser adecuado en cuanto a calidad y cantidad, situación sobre la que actualmente se tienen conocimientos escasos de los acuíferos del Pacífico Central.

El estudio hidrogeológico de los acuíferos del Pacífico Central nace como una necesidad de generar conocimiento técnico en temas relacionados con disponibilidad, calidad y vulnerabilidad del recurso hídrico subterráneo enfocado en una de las zonas costeras de Costa Rica, para que las instituciones tomadoras de decisiones cuenten con mayor información técnico-científica a la hora de velar por la protección del recurso hídrico, garantizar su adecuada gestión y distribución a los habitantes, satisfaciendo su

propia necesidad de consumo y las distintas actividades y procesos generados según el crecimiento económico en la zona.

Esta investigación se generó dentro del marco del Programa de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PROGIRH) – SENARA en atención a la importancia de los acuíferos del Pacífico Central, a la necesidad de generar conocimiento técnico y al deber institucional de proteger e investigar el recurso hídrico subterráneo.

## **1.2 Propósito del informe**

El estudio hidrogeológico en los acuíferos del Pacífico Central abarca aspectos tales como geología, modelación hidrogeológica, flujo del agua subterránea, estimación de la recarga potencial a los acuíferos y vulnerabilidad acuífera. Asimismo, constituye un aporte científico y técnico para el entendimiento de la situación hídrica en la región, con miras a garantizar la protección y gestión adecuada del recurso agua en comunidades que pueden presentar cierta fragilidad ante posibles eventos de sequía o demanda extraordinaria, como puede ser la afluencia turística en épocas vacacionales.

Este conocimiento técnico y científico no solo resulta de interés para las comunidades del área, sino que también representa un insumo importante para las municipalidades de Garabito, Parrita, Quepos y Osa, las cuales pueden tomar este estudio como punto de partida para el desarrollo del componente hidrogeológico en los planes reguladores y de ordenamiento territorial, logrando de esta forma un mejor control y administración adecuada del desarrollo de las actividades que se generan en la cuenca.

A su vez, este estudio puede resultar de interés para diversos grupos ambientalistas u organizaciones no gubernamentales, cuyas operaciones se desarrollan en el área, quienes pueden utilizar la información generada e incorporarla como un insumo importante para el cumplimiento y manejo de sus programas educativos y de protección de especies y ecosistemas.

## **1.3 Objetivo general**

Determinar el potencial hídrico de los acuíferos existentes en las partes bajas de las cuencas Herradura-Jacó, Hermosa-Esterillos, Parrita, Damas-Quepos, Naranjo-

Savegre-Matapalo y Dominical-Ballena, con miras en la protección del recurso y la gestión adecuada para el abastecimiento de poblaciones en la zona.

#### **1.4 Objetivos específicos**

- Elaborar el modelo hidrogeológico conceptual para las partes bajas de las cuencas Herradura-Jacó, Hermosa-Esterillos, Parrita, Damas-Quepos, Naranjo-Savegre-Matapalo y Dominical-Ballena y establecer las características hidráulicas de los acuíferos.
- Estimar la recarga potencial de agua a los acuíferos y la disponibilidad hídrica para el abastecimiento poblacional.
- Estimar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos existentes en las partes bajas de las cuencas Herradura-Jacó, Hermosa-Esterillos, Parrita, Damas-Quepos, Naranjo-Savegre-Matapalo y Dominical-Ballena.

#### **1.5 Ubicación geográfica administrativa**

La zona de estudio se extiende desde el sector de Herradura en el promontorio del sector de Cerro Chiqueros (zona de Villa Caletas) al NW de Herradura (cantón de Garabito); hasta la zona de Punta Mala-Fila Marítima al NE de Ojochal-Tortuga (cantón de Osa) en la zona sur de la costa Pacífica de Costa Rica; abarcando segmentos de las partes medias y bajas de las sub-cuencas de la gran cuenca costera del Pacífico Central, esto entre los cantones de Garabito, Parrita, Aguirre y Osa en la provincia de Puntarenas y los cantones de Turrubares, Puriscal y Pérez Zeledón en la provincia San José.

El área de estudio corresponde a 1749,5 km<sup>2</sup>, con una longitud de 135 km de NW a SE y la elevación máxima de la zona de estudio es de 2116 m.s.n.m. en el Cerro San Jerónimo y la elevación mínima es de 0 m.s.n.m. en la costa de toda el área.

Geográficamente se sitúa entre las coordenadas 1000740-1078350N y 425300-545950W de la cuadrícula CRTM05 de las hojas cartográficas Herradura, Tárcoles, Candelaria, Parrita, Dota, Quepos, Savegre, Dominical, Repunta y Coronado, escala 1:50000, los cuales son editadas por el Instituto Geográfico Nacional.

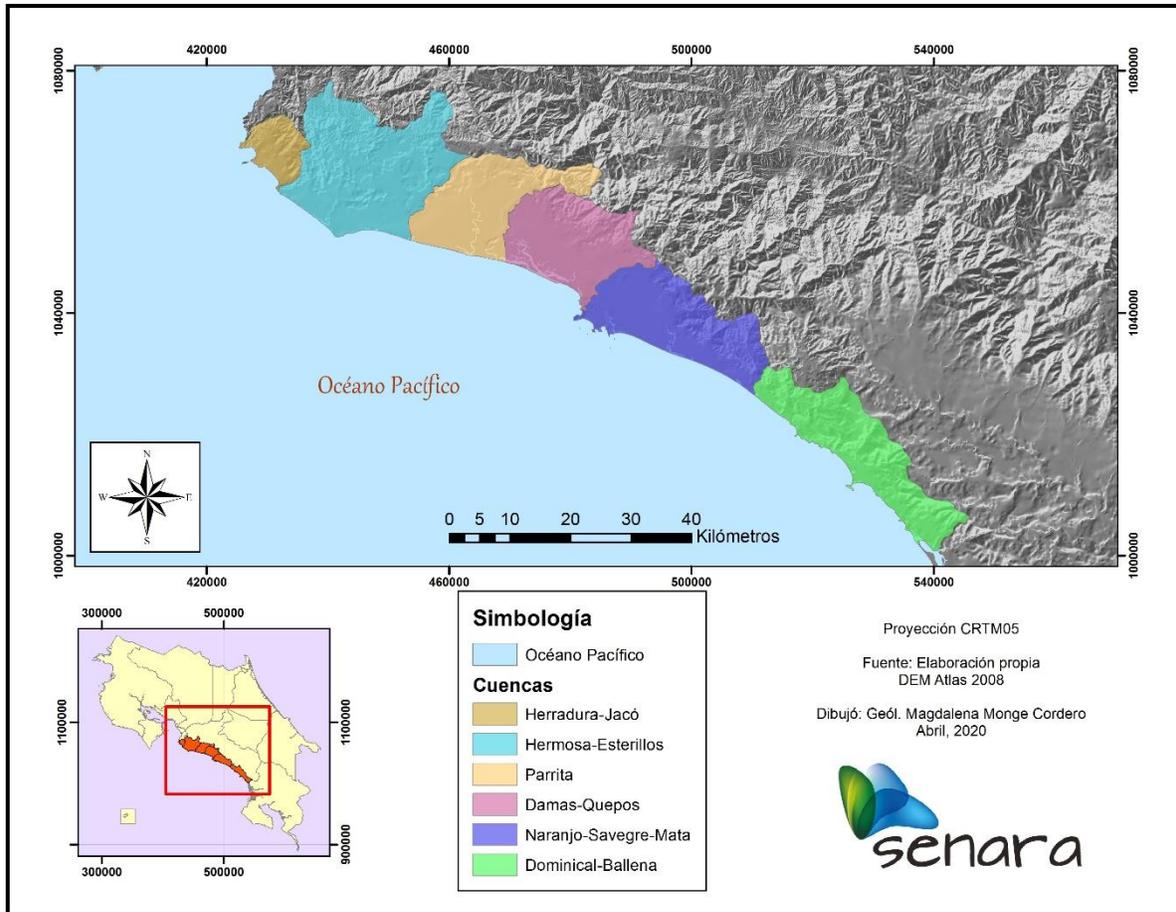


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

### 1.6 Cuencas hidrográficas

La zona del Pacífico Central se encuentra en la gran cuenca Costera Pacífico Central (Figura 2), para efectos de este estudio se divide el área en 6 sectores, los cuales se enumeran en la tabla 1.

Tabla 1. Distribución de la zona de estudio.

Sectores	Área (km <sup>2</sup> )	Cantones que abarca
Herradura-Jacó	77,9	Garabito
Hermosa-Esterillos	467,4	Garabito, Turrubares, Puriscal, Parrita
Parrita	281,3	Parrita, parte de Acosta
Damas-Quepos	225,8	Parrita, Aguirre
Naranjo-Savegre-Matapalo	376,3	Aguirre
Dominical-Ballena	320,8	Aguirre, Pérez Zeledón, Osa
<b>TOTAL</b>	<b>1749,5</b>	

La zona de estudio del Pacífico Central está conformada por seis principales cuencas, las que a su vez, presentan parches de áreas silvestres protegidas (Figura 2).

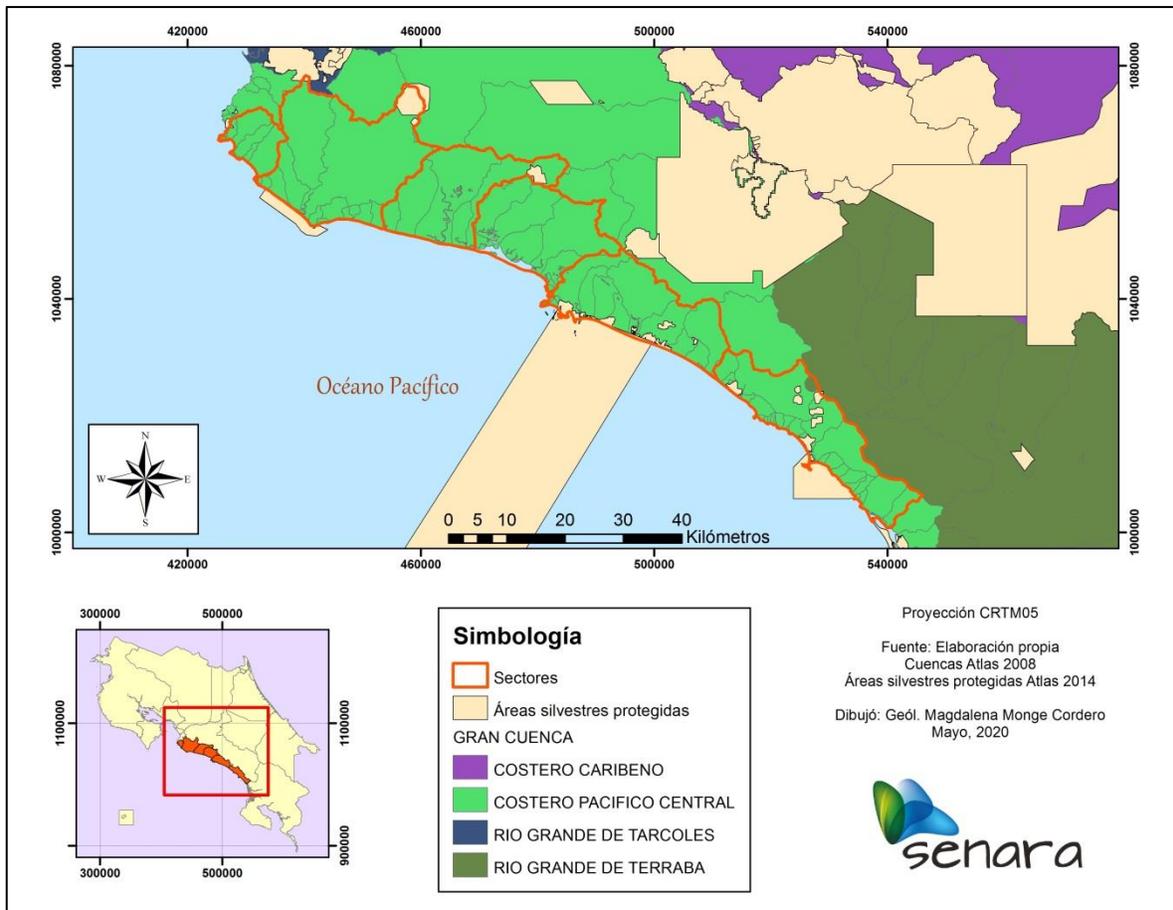


Figura 2. Cuencas principales y áreas silvestres protegidas.

En la tabla 2 se detalla el nombre y área de las principales microcuencas que se encuentran en la zona de estudio.

Tabla 2. Microcuencas de la zona de estudio.

Sector	Microcuenca	Area ( km <sup>2</sup> )
Herradura-Jacó	Quebrada Mata Palo Sur	0,207
	Quebrada Playa Matapalo	0,599
	Quebrada Punta Conejo	0,713
	Quebrada Camaronal	4,736
	Quebrada Cañablancal	22,08
	Quebrada Bonita	14,22
	Quebrada Playa Herradura Sur	0,391
	Quebrada Playa Balsal	0,700
	Quebrada Doña María	3,319
	Río Naranjal	30,29

Hermosa-Esterillos	Quebrada Colorada	1,364
	Quebrada Ganado	3,354
	Quebrada Santa Elena-Laguna Pochotal	12,25
	Río Gloria	30,14
	Río Seco-Río Turrubaritos	112,1
	Río Tusubres	266,8
	Quebrada Punta Judas	4,720
	Quebrada Playa Punta Mala	1,582
	Quebrada Aserradero	12,81
	Quebrada Playa Esterillos Oeste	2,594
	Estero Tigre	3,060
	Quebrada Playa Esterillos Este	7,970
	Quebrada Bejuco	8,132
	Parrita	Quebrada Visita-Estero Bejuco
Quebrada Palma		56,38
Río Parrita		118,3
Río Barbudal		21,11
Río Palo Seco		75,99
Damas-Quepos	Río Seco-Pocarito	47,14
	Río Damas-Río Sucio	57,12
	Quebrada Bonita-Estero Damas	34,56
	Río Canas-Río Paquita	99,5
	Quebrada Boca Vieja	20,07
	Quebrada Estero Boca Vieja	1,795
	Quebrada Quepos	1,012
Naranjo-Savegre-Matapalo	Quebrada Playa Macha	0,646
	Quebrada Punta Quepos	1,334
	Quebrada Playa Espadilla	1,841
	Quebrada Camaronera	1,6690
	Quebrada Playa Espadilla Sur	1,711
	Quebrada Punta Catedral	0,077
	Quebrada Manuel Antonio	0,213
	Quebrada Bahía Puerto Escondida	0,605
	Quebrada Playa Playita	0,367
	Río Naranjo	46,5
	Quebrada Pastora-Estero Negro	21,87
	Quebrada Cacao-Quebrada Hule	24,97
	Quebrada Lagartera-Laguna Negraforral	16,9
	Río Savegre	79,4
	Río Portalón	41,82
	Quebrada Matapalo	13,67
	Río Hatillo Nuevo	50,93
	Quebrada Platanillo-Estero Juanilla	11,18
Dominical-Ballena	Río Hatillo Viejo	14,59
	Quebrada Playa Guapil	2,947
	Quebrada Playa Barú	2,519
	Río Barú	88,5
	Quebrada Playa Dominical	2,196
	Quebrada Poza Azul-Quebrada Playa Dominicalito	9,660

Quebrada Cambutal	0,914
Quebrada Roca Playa Blanca	0,705
Quebrada Roca Escaleras	0,689
Quebrada San Martín	1,016
Quebrada Diablo	0,453
Quebrada Punta Mostradores	0,308
Quebrada Peje	3,075
Quebrada Puerto Nuevo	2,983
Quebrada Playa Puerto Viejo	0,418
Quebrada Playa Hermosa-Quebrada Sargento	5,705
Quebrada Playa Hermosa	3,489
Río Higuerón	37,29
Río Uvita	50,97
Estero Negro	1,551
Quebrada Villegas	1,995
Quebrada Colonia	6,134
Quebrada Grande	4,501
Quebrada Ballena-Quebrada Simón	7,705
Quebrada Mercado	3,045
Quebrada Piñuela	4,993
Quebrada Punta Piñuela	0,779
Quebrada Ventanas	2,217
Quebrada Playa Ventanas Sur	0,247
Río Balsa-Río Tortuga	34,37
Estero Chacara	1,154
Río Punta Mata	16,11

## 1.7 Escala de trabajo

La base cartográfica que se ha utilizado para la elaboración de este estudio corresponde con las capas de ríos, caminos y curvas de nivel a escala 1: 50 000 en la proyección CRTM05.

Como una mejora en la precisión de la información de relieve, el modelo de elevación digital (MED) del terreno también ha utilizado las curvas de nivel disponibles a escala 1:25 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2020). Los datos de campo y los levantamientos geológicos han sido georreferenciados mediante la utilización de GPS etrex Summit, GPS Trimble Juno SD y GPS Garmin 60csx.

Por otra parte, para la elaboración de los mapas raster asociados con el balance hídrico de suelos, se ha optado por utilizar un tamaño de celda de 100x100 al tomar en consideración que la base geológica a utilizar es el Mapa Geológico de Costa Rica elaborado por Denyer y Alvarado (2007), cuya escala es 1:400.000.

## 1.8 Período de análisis

Como parte de este estudio las actividades ejecutadas en la parte baja de las cuencas Herradura-Jacó, Hermosa-Esterillos, Parrita, Damas-Quepos, Naranjo-Savegre-Matapalo y Dominical-Ballena se extienden desde el año 2011 hasta el 2020, iniciando con la delimitación de las cuencas de estudio en el año 2011.

En el año 2013 se realizan aforos en algunos ríos de la zona de estudio. Durante los años 2015-2016 se lleva a cabo una primera campaña de muestreo de suelos y pruebas de infiltración, ejecución de sondeos geofísicos y perforación de piezómetros exploratorios.

Desde el año 2014 hasta el 2020 se mantiene un registro de niveles en pozos seleccionados de la red de monitoreo y se ejecutan otras actividades para caracterización del modelo hidrogeológico conceptual.

En el año 2018 se ejecuta una segunda campaña de muestreo de suelos y pruebas de infiltración como insumos básicos para la estimación de la recarga potencial de los acuíferos.

Durante el 2019-2020 se desarrollan ciertas actividades puntuales de la investigación, como la elaboración de mapas de uso de suelo, mapeo geológico en sitios específicos y se continúa con la medición de control de niveles en pozos y piezómetros. Adicionalmente, se trabaja durante este año en el análisis y procesamiento de la información recopilada.

Paralelo a las actividades de campo desarrolladas en las cuencas, se administraron los procesos de contratación correspondientes a las licitaciones: No. 2013-LN-000008-OC “Pruebas de infiltración, tipos de suelos e investigación Geofísica en: parte media del río Tempisque, cuenca del río Arío y zonas costeras del Pacífico Central”; No. 2013-LN-000009-OC “Perforación exploratoria del subsuelo y armado de piezómetros para investigación de los acuíferos del Pacífico Central, Puntarenas-San José” y No. 2018-LN-000002-OC “Pruebas de infiltración y estudio de suelos en la zona del Pacífico Central de Costa Rica”, sin cuya ejecución no se podría haber desarrollado esta investigación.

## 1.9 Metodología de trabajo

La investigación realizada es del tipo exploratoria y descriptiva, que involucra el desarrollo de un modelo conceptual a través del cual se dará respuesta a de la procedencia del agua, cómo ocurre su almacenamiento, características de las formaciones acuíferas, así como otros aspectos cualitativos y hasta cuantitativos del sistema de flujo tales como zonas de recarga y descarga.

A continuación, de manera breve, en la tabla 3 se describen las variables que forman parte del presente estudio con las respectivas técnicas y materiales utilizados, como aplicados. Posteriormente, se detallan las fases desarrolladas a lo largo del estudio.

Tabla 3. Fases, técnicas y métodos aplicados en la investigación.

Fases	Técnicas/Métodos	Instrumentos	# sondeos, muestreos ejecutados, productos	Criterios de muestreos	
Fase 1	<b>Recopilación de información.</b>	Definición del área de estudio. Entrevistas, análisis documental, análisis de bases de datos en instituciones, bibliotecas, otros. Solicitud de información a otras instituciones AyA, IMN, DA.	Equipos de cómputo, vehículo, GPS, mapas.	10 entrevistas a personeros del AyA, ICE, SENARA, propietarios de pozos.	Geología Hidrogeología. Accesibilidad a localidades y propiedades privadas.
	<b>Definición de sitios para ejecución de pruebas y muestreos.</b>	Revisión y análisis de puntos potenciales para muestreo y perforación.		Definición de 211 puntos para muestreo y 35 sitios de perforación.	Litología y suelos.
Fase 2	<b>Recolección de datos, trabajo de campo.</b>	Perforación de piezómetros a través de roto-percusión con recuperación de núcleos.	Equipo de perforación, herramientas, lodos.	2602,62 m de perforación.	
		Armado de piezómetros.	Tubería PVC, grava.	35 piezómetros	Litologías. Nivel del agua subterránea.
		Método: doble anillo y Lugeon.	Anillos de hierro, cronómetro, mazo, regla,	211 pruebas de anillos.	Geología: litologías y estructuras presentes.

		recipientes hojas de registro, cronómetro.		Tipo de suelo.
	Medición de niveles.	Sonda.	Medición de 5 redes de monitoreo mensuales por 12 y 24 meses.	Pozos con línea de aire y/o abertura para ingresar sonda.
	Aforos. Medición de caudales con equipo.	Molinete GURLEY L4000, 622 y 625D, cinta métrica.	2 campañas de aforos 11 en Herradura-Jacó y 9 en Uvita.	Tramos de cauces con flujo laminar.
	Sondeos eléctricos verticales, método de Schlumberger.	Equipo de eléctrica.	50 SEV.	Geología: litologías y estructuras presentes.  Geomorfología.  Accesibilidad de la zona.
	Estructuras geológicas Medición de buzamientos, observación de estructuras.	Brújula, cinta métrica, piqueta, bolsas, cinta, hojas cartográficas.	Afloramientos en toda la zona de estudio.	Litología. Estructuras. Pendientes. Grado de meteorización. Accesibilidad.
	Muestreo de capas de suelo.	Muestreador, equipo de laboratorio.	211 muestreos de suelo.	Geología.  Tipo de suelo.
<b>Fase 3</b> Procesamiento y análisis de datos	Ensayos de laboratorio: procedimientos y protocolos específicos	Equipo de laboratorio, reactivos.	5 tipos de ensayos de laboratorio para 211 muestras .	Geología. Tipo de suelo.
	Programas informáticos, hojas electrónicas.	Equipo de cómputo. Programas ARCGIS, SURFER 2000.	-	Disponibilidad. Licencias.
	Geofísica: Aplicación de software.	Equipo de cómputo.	-	-
	Balance Hídrico: método Schosinski, 2000.	Equipo de cómputo.	-	Disponibilidad de hojas electrónicas.

Fase 4 Documento final	Según especificaciones.	Equipo de cómputo.	1 informe.	
---------------------------	-------------------------	--------------------	------------	--

### 1.9.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Se entiende por modelo hidrogeológico conceptual, a la representación simplificada mediante la cual se describen las condiciones hidrogeológicas reales del sistema de flujo del agua subterránea en una cuenca o área de estudio, tomando en consideración la integración de información geológica, estratigráfica, geofísica, hidráulica, hidrológica y propiedades físicas del medio (permeabilidad, transmisividad, otros), (Grijalva, 2011).

Inicialmente para este proyecto se realizó una recopilación bibliográfica sobre los trabajos geológicos e hidrogeológicos que se han realizado en la zona, procediendo a analizarlos e incorporar la información relevante para los fines del estudio. En el campo se identificaron los diferentes tipos de rocas que se ubican en la cuenca y los resultados obtenidos se representaron y ubicaron en mapas topográficos base con ayuda de sistemas de posicionamiento global. Para la construcción de los mapas geológicos, hidrogeológicos u otro tipo de información se ha utilizado los sistemas de información geográfica ArcGIS 10.3.1 y Quantum GIS, en sus versiones 2.18 y 3.10.

A partir de la revisión de las bases de datos existentes en el SENARA y en la Dirección de Aguas del MINAE, así como de recorridos por la cuenca, se han inventariado los pozos existentes en el área y se procedió a establecer una red de monitoreo en la que, de forma periódica mensual o bimensual, se efectuaban mediciones del nivel de las aguas subterráneas.

Entre los años 2015-2016 y a partir de la licitación pública nacional No. 2013-LN-000009-OC, se realizó por parte del SENARA, la perforación de 35 piezómetros de exploración distribuidos en diversos sectores de las cuencas.

Adicionalmente, se ejecutaron aforos diferenciales en la época de estiaje (época seca) para estimación de caudales en los ríos de la zona y comprobar de esta forma si los acuíferos aportan aguas a las corrientes superficiales o si ocurre el proceso contrario (conexión entre aguas superficiales y subterráneas). Para esta labor se utilizaron caudalímetros marca Gurley y los datos de velocidad obtenidos se procesaron mediante

la utilización del software Hcanales desarrollado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

La caracterización de la zona no saturada se realizó en los años 2015-2016 y 2018 mediante la toma de muestras de suelo y pruebas de infiltración en las distintas unidades hidrogeológicas establecidas. El análisis de las muestras e interpretación de resultados fue realizado en laboratorios especializados cuyos costos fueron cubiertos mediante los procesos de licitación No. 2013-LN-000008-OC y No. 2018-LN-000002-OC. Mediante esta primera licitación también fueron realizados 64 sondeos eléctricos verticales para conocer la estratigrafía del terreno en diversos sectores y de esta forma complementar el modelo geológico e hidrogeológico del área.

A partir del mapa geológico y con la información de pozos cercanos, sondeos eléctricos verticales, recopilación bibliográfica y piezómetros de investigación que se perforaron, se construyeron perfiles geológicos detallados, a partir de los cuales se realizó una interpretación geológica e hidrogeológica para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio. Las propiedades hidráulicas de los acuíferos se determinaron a partir de pruebas de bombeo ya existentes.

Por otra parte, las aguas subterráneas describen en profundidad una superficie potenciométrica que nos permite identificar la dirección de flujo del agua. La construcción de las equipotenciales de esta superficie potenciométrica, fue generada para los acuíferos a partir de la interpolación de los niveles de agua registrados en los pozos de explotación o piezómetros de investigación.

### **1.9.2 Recarga Potencial y disponibilidad**

La recarga potencial a los acuíferos fue determinada mediante dos metodologías, en primera instancia se utilizó la metodología desarrollada por Schosinsky (2006) que consiste en un balance de humedad en suelos. El segundo método utiliza las variaciones en el nivel de pozos obtenidos a partir de sus hidrogramas. Se describen a continuación estas metodologías.

#### **✓ Balance de humedad en el suelo**

Al agua que se infiltra en los suelos y que logra percolar hasta los acuíferos que se ubican bajo estos, una vez satisfechas las necesidades de evapotranspiración de las

plantas y alcanzada la capacidad de campo de los suelos, se le denomina recarga potencial de los acuíferos (Schosinsky, 2006).

La recarga potencial a los acuíferos puede ser determinada mediante un balance hídrico de las masas de agua que circulan en la superficie, suelo y subsuelo, conociendo ciertos parámetros observables en el campo tales como la precipitación, temperatura, características de los suelos, vegetación y pendientes existentes en la cuenca. (Schosinsky, 2006).

A través de la figura 3 se ilustra claramente el proceso mediante el cual, los parámetros básicos obtenidos en el campo y laboratorio, se interrelacionan y procesan para dar origen a los distintos factores que finalmente se incorporan en la ecuación de balance para obtener la recarga potencial.

Así por ejemplo, a partir de las pruebas de infiltración, mapa de uso del suelo y modelo de elevación digital, se obtienen los factores  $f_c$ ,  $k_p$ ,  $k_v$  y  $k_{fc}$ , que en conjunto con los coeficientes de retención en el follaje y precipitación mensual, permiten la determinación del parámetro  $P_i$  (precipitación que infiltra) de la ecuación de balance.

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR$$

Dónde:

- $R_p$  = Recarga potencial mensual en mm/mes
- $P_i$  = Precipitación que infiltra en mm/mes
- $H_{Si}$  = Humedad del suelo al inicio del mes en mm
- $H_{Sf}$  = Humedad del suelo al final del mes en mm
- $ETR$  = Evapotranspiración real en mm/mes

Por otra parte, al conocer la recarga potencial de los acuíferos y a la vez las extracciones que se realizan en la cuenca mediante pozos o manantiales, es posible determinar entonces mediante una sustracción, cual es la disponibilidad final de agua subterránea para el abastecimiento humano y de sus diversas actividades productivas.

La ejecución de esta metodología inicia con la recopilación de información meteorológica en el Instituto Meteorológico Nacional y SENARA, para calcular la precipitación en el área y estimar la evapotranspiración.

La metodología propuesta por Schosinsky (2006) asume que la evapotranspiración potencial real va a ser proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizará la ecuación de Blaney & Criddle (ONU, 1972 en Schosinsky, 2006) por medio de la siguiente ecuación:

$$ETP \text{ (mm/mes)} = ( 8,10 + 0,46T ) Ps$$

Donde:

- ETP = Evapotranspiración potencial en [mm/mes]
- T = Temperatura media mensual en [grados centígrados] (dato meteorológico)
- Ps = Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año [%]

En el campo se realizan pruebas de infiltración mediante el método de doble anillo y muestreo de suelos para identificar sus características hidráulicas, densidad, textura, capacidad de campo, punto de marchitez. Mediante modelos de elevación digital se estimaron las pendientes del área. Adicionalmente se utilizan fotografías aéreas y comprobaciones de campo para delimitar los distintos usos de suelo que existen en el área de interés.

El área de la cuenca se procedió a dividir en una serie de polígonos de conformidad con sus características, tales como geología, uso y tipo del suelo, pendientes, infiltración, entre otros. Cada uno de estos polígonos tiene asignados los distintos parámetros necesarios para realizar la estimación de la recarga potencial.

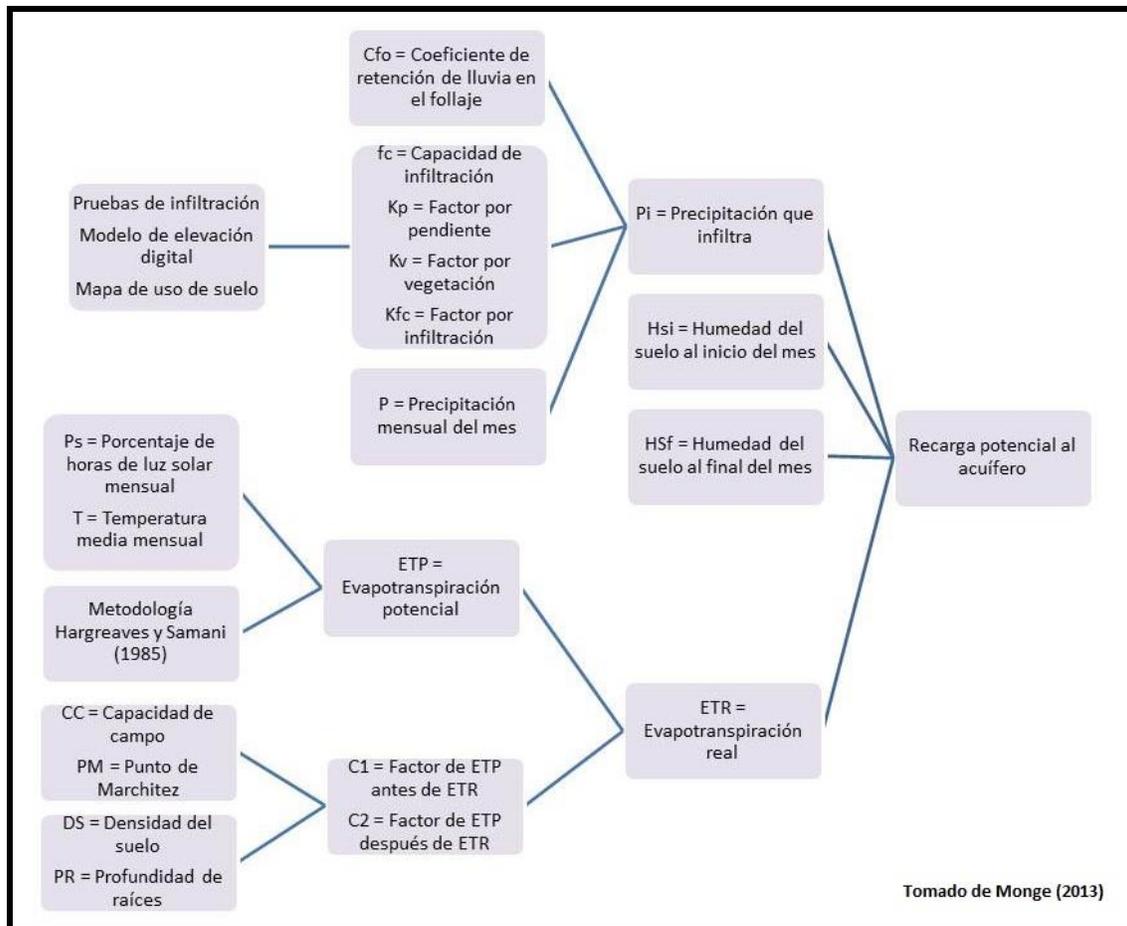


Figura 3. Flujograma de relación entre los datos a utilizar y los datos resultantes.

### ✓ Hidrograma de pozos

Este método consiste en la utilización del intervalo de la variación entre el nivel mínimo y el máximo obtenido de los hidrogramas de pozos, obteniéndose la altura de agua de percolación o sea la recarga como espesor de material saturado, el cual se multiplica por el rendimiento específico de ese material para obtener la recarga como lámina de agua, según las unidades que estemos empleando. La lámina de agua al ser extrapolada al área ocupada por el material nos da el volumen de agua subterránea recargada en el período de tiempo considerado.

Esta metodología se basa en la premisa que el incremento o ascenso del nivel del agua subterránea en un acuífero libre se debe al arribo de la recarga de agua hasta el nivel freático (traducido de Healey, 2010). De esta manera con el supuesto que la cantidad de agua disponible en una columna de área unitaria de superficie es igual a la

capacidad específica del acuífero multiplicada por la altura de agua en la columna, la recarga se puede calcular con la siguiente fórmula (traducido de Healey, 2010):

$$R = S_y \Delta H / \Delta t \text{ (ecuación 6)}$$

Donde:

- R = Recarga de agua subterránea.
- $S_y$  = Rendimiento específico del acuífero.
- $\Delta H$  = cambio en la altura de la tabla de agua en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

### 1.9.3 Vulnerabilidad de acuíferos

Se aplica la metodología de análisis de vulnerabilidad GOD descrita por Foster et al. (2002), que toma en consideración el tipo de acuífero, las características de la zona no saturada y la profundidad a la que se encuentra el agua.

La profundidad del agua se obtiene a partir de los niveles en los pozos existentes en cada unidad hidrogeológica (tanto de la base de datos como los inventariados en campo), el tipo de acuífero se obtiene del análisis del modelo hidrogeológico, y finalmente las características de la zona no saturada se describen a partir del modelo hidrogeológico y pruebas de campo. Adicionalmente, la asignación del parámetro G de la metodología GOD, se ha realizado según los términos de referencia para estudios hidrogeológicos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA, 2017a), que toman en consideración la conductividad hidráulica y espesor de la zona no saturada para asignar el valor correspondiente.

Los parámetros recopilados G, O y D en cada unidad hidrogeológica se procesan posteriormente en un programa de interpolación para generar los mapas de contornos respectivos. Estos mapas de contornos posteriormente se rasterizan utilizando un sistema de información geográfica.

Con los mapas raster de cada parámetro se realiza el álgebra de mapas  $G \times O \times D$  a partir del cual se obtiene el mapa de vulnerabilidad GOD. Finalmente, el mapa GOD se reclasifica en los rangos de vulnerabilidad establecidos por Foster et al. (2002).

### 1.10 Antecedentes

En el área de estudio, se han realizado varios estudios geológicos, así como también tres mapas geológicos a diferentes escalas con un carácter regional; mientras que la información hidrogeológica es más específica a ciertas zonas (acuíferos). Ya sea por el alcance, el contenido, área de cobertura e importancia de la información destacan los siguientes trabajos:

- ✓ Para el año 1997 se publica el Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:500.000, (Tournon & Alvarado, 1997).
- ✓ También, en el año 1997 se divulga el Mapa Geológico de Costa Rica elaborado por el Ministerio de Ambiente y Energía, la Dirección de Geología y Minas- Dirección de Hidrocarburos y la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) a una escala de 1:750.000.
- ✓ Arias y Morera, (2000); realizan en el Senara un estudio hidrogeológico-geofísico de la zona del acuífero aluvial de Jacó, el cual consiste de sondeos eléctricos verticales, monitoreo de niveles de agua subterránea en pozos, conductividad, tiempo de tránsito de contaminantes, clasificación hidrogeoquímica de las aguas y definen un modelo hidrogeológico del acuífero, con algunas recomendaciones del manejo de la zona de estudio.
- ✓ Vargas, (2003); en consultoría para el Senara realiza un análisis de los acuíferos costeros de la zona de Parrita, Quepos y Dominical, y define modelos hidrogeológicos preliminares para los acuíferos Parrita, Bejuco, Dominical, Quepos y acuíferos menores como Espadilla, Pirris y Naranjito, realiza un total de 19 pruebas de infiltración, y elabora unos balances hídricos preliminares en las cuencas media y baja del río Barú, depósitos aluviales de Quepos y depósitos aluviales en Parrita.
- ✓ Agudelo, (2005); en consultoría para el Senara desarrolla un diagnóstico de las aguas subterráneas en las hojas Tárcoles, Herradura y Candelaria a escala 1:50.000, con un inventario de pozos, concesiones y sistemas de abastecimiento público así como una caracterización hidrogeológica de los acuíferos Herradura, Jacó, Playa Hermosa y caracteriza las rocas de las formaciones Punta Carballo, Complejo de Nicoya y Punta Judas.

- ✓ En el año 2007, se publica el Mapa Geológico de Costa Rica, (Denyer & Alvarado, 2007); a escala 1:400.000; en el cual se definen las unidades geológicas formales, a nivel regional, para la zona de estudio.
- ✓ Castro (2010), define que el acuífero aluvial Naranjito es una de las tres fuentes de abastecimiento de agua potable de la comunidad de Quepos y alrededores, describiendo la geología, los parámetros hidrogeológicos e hidrogeoquímicos de la cuenca baja del río Naranjo en el sector NE de Quepos.
- ✓ Matamoros (2012), realiza una delimitación y una caracterización hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica del acuífero Parrita, efectuando mapas hidrogeológicos, balances hídricos y mapas de vulnerabilidad.
- ✓ La Dirección de Agua del MINAE en el año 2016 por medio de una contratación con el Centro de Investigaciones de Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica realiza el Estudio Hidrogeológico del acuífero aluvial de Bahía Ballena: Comprendido en la cuenca del río Uvita y río Higuierón hasta la quebrada Tibia, en el cantón de Osa en la provincia de Puntarenas.
- ✓ Arias (2018) realiza la delimitación de la microcuenca media y baja del río Barú, desarrolla el modelo conceptual hidrogeológico y lleva a cabo el balance hídrico de suelos.

## **1.11 Alcances y limitantes del estudio**

### **1.11.1 Alcances**

Se ha logrado actualizar el modelo y cartografiado geológico del área de estudio a una escala más detallada ya que para esta zona de Costa Rica solo existen mapas geológicos con escalas más regionales como es el elaborado por Denyer y Alvarado (2007).

Adicionalmente, con la información disponible se identificaron y caracterizaron las distintas unidades hidrogeológicas, con las cuales se estableció el modelo hidrogeológico conceptual del área y se construyeron los mapas y perfiles hidrogeológicos para los sectores estudiados.

Se determinó la recarga potencial de los acuíferos y se generó el mapa de recarga potencial para cada cuenca estudiada. Por otra parte, con la información de recarga

potencial y los caudales de extracción reportados en la base de datos del SENARA, se determinó el caudal utilizable para las distintas actividades de la población.

Finalmente, se elaboraron los mapas de vulnerabilidad hidrogeológica por el método GOD y se elaboraron los mapas de vulnerabilidad en las zonas de estudio que cuentan con suficiente información hidrogeológica, específicamente para los acuíferos que se originan en los depósitos cuaternarios aluviales.

### **1.11.2 Limitantes**

En campo la principal limitante correspondió con la falta de caminos o el mal estado de estos. Esto ocasionó que no se pudieran realizar ensayos, mediciones de niveles o perforaciones exploratorias en ciertas áreas. Adicionalmente, algunos propietarios de terrenos se negaron a la ejecución de ensayos o perforaciones exploratorias, por lo que la densidad y distribución óptima de los ensayos se tuvo que variar.

El no contar con información hidrogeológica de pozos en la cantidad y densidad adecuada para las distintas unidades, también limitó el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual y ciertos productos, tal es el caso del mapa de vulnerabilidad hidrogeológica el cual solamente se pudo desarrollar en la unidad aluvial y para zonas específicas de cada sector dentro del presente estudio. Así como la obtención de la recarga a través de la metodología de fluctuación de niveles, cuyo análisis se limita a los pozos disponibles y accesibles durante el período de monitoreo.

En el análisis de vulnerabilidad hidrogeológica no se contó con pruebas de conductividad hidráulica ( $k$ ) para todo el espesor de la zona no saturada, por lo que el parámetro  $G$  se asignó únicamente con los valores de  $k$  obtenidos en superficie con pruebas de doble anillo y datos generados en los piezómetros de investigación.

Para el análisis de disponibilidad hídrica existe gran diferencia entre la información de caudales concesionados en la Dirección de Agua del MINAE y los registrados en el SENARA. Además, tampoco se pudo contar para todos los sectores con la información más actualizada de parte de los operadores de agua potable, tales como el AyA o ASADAS, por lo que el resultado obtenido es bastante conservador.

Finalmente, la situación país del año 2020 (pandemia y bloqueos generalizados por la crisis económica), limitó las mediciones mensuales del nivel del agua subterránea

en los pozos de la red de monitoreo, aspecto que incide directamente en la precisión de ciertos productos, tal es el caso de la estimación de recarga por fluctuación de niveles.

## 2. GEOLOGÍA

---

### 2.1 Marco Geológico Regional

La zona de estudio se localiza en la zona Ante-arco de Costa Rica, en las cuencas sedimentarias de Caldera-Parrita y la Fila Costeña-Térraba, donde las formaciones geológicas sedimentarias y volcánicas comprenden desde el Cretácico para las rocas más antiguas del Complejo de Nicoya, hasta el Holoceno con la acumulación de los Depósitos Cuaternarios Aluviales y la formación de los Manglares y Esteros con toda su dinámica marina – fluvial reciente.

Las formaciones geológicas regionales se basaron principalmente en el Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:400.000; (Denyer & Alvarado, 2007); así como también las referencias del Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:500.000, (Tournon & Alvarado, 1997) y el Mapa Geológico de Costa Rica elaborado por el Ministerio de Ambiente y Energía, la Dirección de Geología y Minas y Recope, también en el año 1997. A continuación se describen las formaciones de roca regionales.

#### 2.1.1 Complejo de Nicoya (Basamento regional)

Kussmaul (2000), menciona que típicamente se trata de rocas de fondos marinos, que posteriormente fueron cortadas por rocas ígneas relacionadas con puntos calientes, y levantadas hacia la superficie mediante procesos de origen tectónico. Entre los materiales ígneos predominan los basaltos toleíticos en forma de coladas masivas y almohadillas. Se incluyen dentro de esta unidad sedimentos silíceos de origen pelágico (radiolaritas) con alto contenido de hematita. Kussmaul (2000) señala que los basaltos hacia el sur del país disminuyen en edad con respecto a los localizados en la Península de Nicoya, siendo así que una muestra en Jacó fue datada en 84 Ma (Santoniano) y otra en Quepos en 64 Ma (Paleoceno).

Como parte del Bloque Herradura, se encuentran lavas de plataforma oceánica (Plateau Oceánico Caribe) asociados al Complejo de Nicoya, así como sedimentos pelágicos silíceos, fuertemente tectonizados o incluidos dentro de los basaltos, con pobre contenido microfósilífero (Arias, 2003).

En los alrededores de la zona de estudio (Quepos y Golfo Dulce) Tournon & Alvarado (1997) señalan la presencia de basaltos toleíticos en almohadilla o masivos que anteriormente fueron atribuidos al Complejo de Nicoya, pero que mediante datos paleontológicos se ha determinado que presentan edades más recientes. Estos mismos autores mencionan la presencia de calizas pelágicas intercaladas con las almohadillas basálticas, aunque en general son más escasas hacia las zonas de Golfito. Dataciones K/Ar sugieren edades del Cretácico Tardío, Paleoceno y del Eoceno (Berrangé et al., 1989).

Denyer & Alvarado (2007) mantienen la misma cartografía de basaltos toleíticos en los alrededores de Sierpe y Golfito. Sin embargo para la zona de Golfito se ubican en un rango temporal más antiguo (140 – 88 Ma), mientras que en las cercanías de Sierpe el rango temporal se ubica entre los 70 – 40 Ma, asociado a islas oceánicas acrecionadas (Fm. Tulín y Bloque Rincón).

Alvarado & Gans (2012) resumen la estratigrafía ígnea de Costa Rica en 5 grandes grupos, ubicando hacia las zonas de Quepos y la Península de Osa Complejos ígneos básicos / ultrabásicos oceánicos (ofiolitas) con un rango de edad del Campaniano – Eoceno (83 – 41 Ma).

Alvarado & Gans (2012) señalan que la historia geológica es compleja en el caso de las rocas máficas de origen submarino localizadas en la zona del Complejo ígneo Golfito - Osa – Burica. Denyer et al. (2006) interpretan estas litologías como fragmentos acrecionales de un plateau o parte del CLIP, pero que son diferentes al Complejo de Nicoya, ya que presentan cuerpos básicos intruyendo o intercalados, deformando sedimentos del Campaniano Tardío hasta por lo menos el Eoceno (Berrangé & Thorpe, 1988; Berrangé et al, 1989, Di Marco, 1994), además de la presencia de basaltos vesiculares, picritas y gabros pegmatíticos (Berrangé & Thorpe, 1988; Berrangé et al, 1989), y abundantes vetillas de cuarzo en contraposición con Nicoya, enriquecidas en Au (Berrangé & Thorpe, 1988).

Según Alvarado & Gans (2012), aunque Berrangé & Thorpe (1988) concluyen que en general estas rocas ígneas se formaron en un ambiente de cuenca tras-arco, sí dejan en claro su cercanía o afinidad con una zona de subducción. Más estudios de detalles son requeridos, pero en términos generales se interpretan como fragmentos de

montes submarinos, posiblemente parte de una cordillera asísmica del CLIP, también con presencia de rocas con afinidad N-MORB, E-MORB y OIB (Berrangé & Thorpe, 1998; Hauff et al., 2000; Hoernle et al., 2002; Buchs et al., 2009; Denyer & Gazel, 2009; Tournon & Bellon, 2009).

Según dataciones radiométricas y paleontológicas, la ubicación y el contexto geológico (Tournon, 1984; Di Marco et al., 1995; Hauff et al., 2000; Hoernle et al., 2002; Tournon & Bellon, 2009; Buchs et al., 2009, 2010), la cronología se puede resumir en:

- a. Un magmatismo tipo CLIP pre-Campaniano, en equivalencia con el Complejo de Nicoya, que conformaría el basamento.
- b. Posiblemente un magmatismo de arco de islas incipiente sobre este basamento, de edad del Campaniano Tardío a Maastrichtiano (75-70 Ma).

Un magmatismo de dorsal oceánica con montes submarinos aislados (tipo CLIP, MORB, N-MORB, E-MORB y OIB), del Campaniano al Eoceno Medio (80-76; 64-60; 56,7-54,7 y 47,5-43,5 Ma), que son paulatinamente acrecionados al margen convergente, e incluso desmembrados (mélange) junto con secuencias sedimentarias entre el Paleoceno y el Mioceno.

### **2.1.2 Costa Rica Central: Herradura, Turrubares y Candelaria.**

Para el sector del Pacífico Central de Costa Rica, coladas masivas, en almohadillas y brechas afloran desde el nivel del mar (Herradura) hasta alturas de unos 1500 metros (Cerro Turrubares). El espesor de este conjunto basáltico es entonces considerable pero no se conoce con precisión por falta de datos estructurales. Es conocida desde hace tiempo la importancia de este volcanismo submarino (Dóndoli et al., 1998; en Tournon y Alvarado, 1997), pero los datos geoquímicos conciernen solamente a unos afloramientos costeros en la zona de Herradura.

Los basaltos tienen textura micro-óptica o microlítica con olivino siempre pseudomorfizado, clinopiroxeno, plagioclasa y titanomagnetita. Se destacan basaltos picríticos y basaltos hialoporfíricos con fenocristales de plagioclas y olivino, y escasos microgabros hasta gabros intruyendo lavas almohadilladas, (Tournon y Alvarado, 1997).

Las alternancias de coladas masivas y en almohadillas tienen generalmente buzamientos débiles, pero se han notado buzamientos subverticales. Las formaciones

piroclásticas comprenden hialoclastitas. Delgadas intercalaciones sedimentarias entre las coladas y sedimentos inter-almohadillas son bastante frecuentes. Se trata de radiolaritas y más a menudo calizas pelágicas, (Tournon y Alvarado, 1997).

En la zona de Herradura, Jacó y hasta unos 5 km al nor-este de Parrita; Arias, (1998); propone que el Complejo de Nicoya sea dividido en dos unidades: los basaltos POC y la formación Tulín, la cual está constituida por brechas hialoclásticas, sedimentos epiclásticos, basaltos, piroclastos, gabros y cumulitas de olivino.

### **2.1.3 Complejo Básico de Quepos**

Está constituido por un grupo de cerros aislados, los cuales están conformados por una secuencia paleocena de lavas y brechas basálticas, calizas hemipelágicas y materiales piroclásticos (tobitas), (Bolz & Calvo, 2003). Coladas basálticas en almohadillas o masivas, brechas e hialoclastitas ocurren en el promontorio de Quepos. Las calizas pelágicas inter-almohadilladas tienen microfauna del Daniano, (Tournon y Alvarado, 1997).

### **2.1.4 Formación Golfito**

Obando (1986) indica que esta formación corresponde con calizas silíceas y alternancias rítmicas de areniscas y lutitas silíceas, que se encuentran expuestas en la zona de Golfito. Estos materiales representan sedimentos pelágicos depositados sobre la CCD a partir de materiales planctónicos originalmente en suspensión en la columna de agua. Los sedimentos se depositaron sobre corteza oceánica recién formada, al mismo tiempo había vulcanismo submarino activo, que cubría los sedimentos. Posteriormente, al acercarse la corteza oceánica a un margen continental, hubo gran aporte de materiales originados en el arco volcánico.

Según el mapa de Denyer & Alvarado (2007), estos materiales también se encuentran en el sector entre Jacó y Esterillos. Su edad es de Campaniano Superior (Henningsen, 1965) y tiene un espesor entre 700 y 800 m.

### **2.1.5 Formación Tulín**

Está constituida por brechas hialoclásticas, sedimentos epiclásticos, basaltos, piroclastos, gabros y cumulitas de olivino (Arias, 2003).

Alfaro y Barrantes (2002) cartografiaron al sur del Bloque Herradura una unidad ígnea constituida por basaltos (masivos, columnares y en almohadillas vesiculares),

dioritas y gabros. Asociados con esta unidad, se encuentran pequeñas intrusiones de monzodioritas y depósitos epiclásticos y piroclásticos (ignimbritas) del Paleógeno, las cuales están sobreyacentes e intercaladas con los basaltos.

Los basaltos representan más del 95% de la litología de la Formación Tulín, presentándose como coladas en almohadillas muy bien preservadas, vesiculares, con matriz microcristalina, constituidos por plagioclasas, clinopiroxenos, opacos y olivinos (Arias, 2003).

Los gabros presentan textura porfirítica y dolerítica, se encuentra una mayor concentración en el Cerro San Jerónimo. También se identifican intrusivos de ortocumulados de olivino gabrocumulados de olivino, siendo rocas oscuras y resistentes y se presentan en forma de bloques redondeados o subredondeados, consecuencia de la meteorización esferoidal, con diámetros inferiores al metro (Arias, 2003).

En todo el bloque Herradura se encuentran depósitos piroclásticos, intercalados con los basaltos superiores de la formación y se consideran asociados con las últimas manifestaciones volcánicas de esta. Corresponden a brechas basálticas, principalmente monomícticas, bien consolidadas, constituidas por clastos centimétricos, angulares a subangulares, flotando en una matriz de cenizas finas. Algunas brechas del sur contienen clastos de basaltos vesiculares y xenolitos de calizas de la Formación Golfito, recrystalizadas térmicamente por metamorfismo de contacto (Arias, 2003).

El POC (Plateau Oceánico Caribe), en este caso el Complejo de Nicoya, corresponde con las rocas más antiguas y constituyen el basamento de la Formación Tulín. El contacto entre los sedimentos silíceos y el POC es de tipo tectónico, mientras que con las calizas no fue posible observar ningún contacto (Arias, 2003).

#### **2.1.6 Formación Punta Serrucho**

Se usa el nombre sensu Baumgartner et al. (1984; en Denyer y Arias, 1991) correlacionando una secuencia sedimentaria que aflora en la parte sur de la hoja Candelaria. Consiste de inter-estratificaciones de paquetes con espesor centimétrico y esporádicos decímetros de areniscas de grano fino a grueso, con clastos guijarrosos. Predomina la granulometría fina, la cual a veces contiene materia orgánica diseminada. Las intercalaciones de arenisca gruesa tienen un espesor promedio de 70 cm. Sobreyace al Complejo de Nicoya con un contacto inconforme y se presume una edad

Paleógena (Eoceno?), con base en la correlación litológica y el estilo tectónico; (Denyer y Arias, 1991).

### **2.1.7 Formación Caótica Punta Quepos**

Sobre las lutitas del Paleoceno Superior-Eoceno Inferior yace un olitostromo, la formación Caótica Punta Quepos, cuyos bloques re-trabajados, hasta varios centenares de metros, son basaltos, lutitas y calizas del Cretácico Tardío y Paleoceno, (Baumgartner et.al., 1984 en Tournon y Alvarado, 1997).

Baumgartner et al. (1984) caracterizan el contacto basal de la formación por presentar un cizalle importante, con el cual es posible concluir que esta formación es producto de un emplazamiento por gravedad de sedimentos poco litificados, a partir de la combinación de deslizamientos y flujos de detritos. La edad de los materiales según estos mismos autores es del Eoceno Temprano / Medio.

Está compuesta por clastos del Complejo básico, brechas y conglomerados de la Formación Brecha Puerto Carrillo, lutitas y areniscas silíceas (turbiditas distales de la Formación Lutita–Areniscas Cabo Blanco), areniscas y lutitas calcáreas y calcarenitas someras, las cuales se encuentran mezcladas y deformadas sinsedimentariamente con las “calizas de Quepos”.

Las calizas predominan en esta formación y están dispuestas como bloques métricos hasta cuerpos lentiformes, en una matriz de lutitas silíceas y calcáreas con abundante microfauna de radiolarios y foraminíferos planctónicos (Baumgartner et al., 1984). Debido a las deformaciones tectónicas y sedimentarias ocurridas en este sector del promontorio, estos depósitos turbidíticos se presentan con abundantes fracturas y capas irregulares, por lo que no se visualiza ningún tipo de estratificación ni estructuras sedimentarias.

Para esta formación geológica Soto y Alvarado (2012), describen la presencia de peperitas dentro de esta formación en donde excelentes ejemplos se observan en punta Quepos y en puerto Escondido.

Estratigráficamente, se encuentra sobreyacido por brechas y conglomerados de la Formación Caótica Punta Quepos y por una secuencia sedimentaria del Terciario. Este límite fue interpretado por las mezclas de rocas que se observan al oeste de la Playa Espadilla, como resultado de eventos volcánicos (Schmitd-Effing, 1979). Por otro lado,

Azema et al. (1979) reconocieron microfósiles del Daniano en calizas pelágicas asociadas a lavas que se encuentran en Playa Espadilla – Punta Quepos.

### 2.1.8 Formación Fila de Cal

Constituida principalmente por calizas con macroforaminíferos, cuya depositación ocurrió durante el Eoceno Medio – Superior en condiciones ambientales estables, con aguas turbulentas pero sin turbidez, cálidas y oxigenadas debidas a una disminución en la actividad volcánica durante la época. Los foraminíferos (especialmente Nummulites) y las algas fueron los principales constructores, no obstante, se presentan otros grupos ecológicos funcionales como corales, hidrozoos y gastrópodos (Linkimer & Aguilar, 2000).

Tournon & Alvarado (1997) señalan que la extensión de plataformas carbonatadas durante el Eoceno Superior es un rasgo importante en la historia geológica de Costa Rica, sobreyaciendo en discordancia a la sedimentación detrítica del Paleoceno-Eoceno Medio o directamente sobre el basamento basáltico. Mencionan además, que en la Fila Costeña aparece en una sucesión de escamas tectónicas, sin que se conozca su basamento. Mora (1979) indica que estas calizas presentan un espesor que varía de 100 a 300 metros.

### 2.1.9 Formación Térraba

Originalmente fue definida por Dengo (1953), (1962) a través de los afloramientos localizados a lo largo del río Grande de Térraba, entre Palmar Norte y el río Curré y entre San Isidro de El General y Dominical. Describe las rocas como lutitas gris-negruczas, calcáreo-silíceas y piríticas. A su vez, subdivide esta formación en los miembros Curré, Lagarto y Cajón. Mientras que Henningsen (1965) y Madrigal (1974) incluyen al miembro Cajón dentro de la formación Brito y al miembro Curré le elevan la categoría a formación.

Mora (1979) divide la Formación Térraba en dos subunidades:

- ✓ Unidad Zapote: compuesta por rocas turbidíticas de areniscas, limolitas y arcillolitas con intercalaciones de productos de vulcanismo submarino, como aglomerados y brechas. Presenta estructuras sedimentológicas como ondulitas, *flute cast*, huellas de impacto y escasos fósiles. Esta unidad sobreyace concordantemente a

la Unidad Cajón y subyace a la Unidad Lagarto de la formación Térraba. Mora (1979) le asigna una edad Oligoceno temprano a medio.

✓ Unidad Lagarto: es la facies proximal de la secuencia turbidítica, con abundantes conglomerados y areniscas y depósitos de canales. Tiene un espesor variable de 1200 a 1500 m y está sobreyacida concordantemente por la formación Gatún (Mora, 1979). A su vez, yace concordantemente sobre la formación Brito, Dengo (1962) y Henningsen (1965) consideran que se desarrolló a partir de ésta. Mora (1979) le ha asignado una edad Oligoceno-Mioceno inferior.

#### 2.1.10 Formación Puerto Nuevo

Fue descrita por primera vez por Dengo (1962 b en: Mora, 1979), mientras que los primeros análisis químicos y petrografía fueron realizados por Henningsen (1965) y Tournon (1970) respectivamente. Mora (1979) describe esta formación como un grupo de diques, “*sills*” y un “*stock*” de composición gabrodiorítica.

Alvarado et al. (2009) describen cuerpos hipohabiales pequeños, con forma de diques de aproximadamente 83,4 - 4,8 km de extensión por 0,2-0,4 km de ancho y con rumbos WNW-ESE.

Abratis (1998) describe diques y *stocks* de pequeño tamaño, en los alrededores de Puerto Nuevo y Punta Uvita, los cuales agrupa dentro de un grupo toleítico, el cual comprende basaltos, andesitas basálticas y andesitas, así como gabros. Además, indica que en muestras de mano, las rocas presentan texturas afíricas a porfiríticas, de color gris a gris oscuro, con poca alteración. Microscópicamente predominan las texturas porfiríticas a glomeroporfiríticas, donde los minerales principales son piroxeno y plagioclasa, los minerales opacos, predominantemente magnetita, están siempre presentes como fenocristales. Los gabros son gris oscuro y masivos, con texturas más anhedral-granular que intergranular y los minerales principales son plagioclasa y piroxeno, también se observan olivinos en la mayoría de los gabros, pero con frecuencia corroídos (Abratis, 1998).

Abratis (1998) les asigna una edad de entre 15-11 m.a, a partir de dataciones radiométricas ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ). Mientras que McMillan et al. (2004), a partir de dataciones

radiométricas ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ), elaboradas en muestras de gabro tomadas en los alrededores de Dominical les asigna una edad de 17,50 m.a.

#### **2.1.11 Formación Punta Carballo**

Denominada por Mac Donald (1920) como “serie de arenisca caliza de Punta Carballo”, aflorante en el acantilado de Roca Carballo, en la costa oriental del golfo de Nicoya y entre Esparza y Barranca. Madrigal (1970) divide la formación en dos miembros: el inferior denominado Mata de Limón y el superior Roca Carballo. Fischer (1981) cambia la posición de los miembros indicando que el Miembro Roca Carballo subyace al Miembro Mata de Limón. Posteriormente se define el Miembro Caletas (Campaña Geológica, 1985; Laurito, 1988) y Sprechmann et al. (1994), proponen elevar el Miembro de Mata de Limón al rango de formación. Recientes trabajos realizados en la Escuela de Geología han encontrado que esta formación está compuesta por más miembros (Paires e Icacó) y que las relaciones estratigráficas entre las rocas depositadas en ambiente marino y continental son complejas.

Esta formación está compuesta principalmente por rocas siliciclásticas (areniscas finas, medias y gruesas, lutitas, conglomerados y brechas). Con base en los moluscos y foraminíferos se ha determinado una edad Mioceno (Inferior-Medio y Superior).

#### **2.1.12 Formación Punta Judas**

Se refiere a una secuencia con un espesor cercano a los 300 metros, que aflora en una plataforma de abrasión en Punta Judas, Esterillos Oeste. Está constituida principalmente por areniscas finas, muy fosilíferas, especialmente con moluscos, equinodermos e incnofósiles y en menor proporción lodolitas, lutitas, brechas y conglomerados, depositadas en ambientes marinos de sublitorales a litorales, desarrollados durante el Mioceno (Seyfried et.al., 1985 en Linkimer & Aguilar, 2000).

#### **2.1.13 Formación Curré**

Dengo (1962a) considera estos sedimentos como parte de la Formación Térraba, no obstante, Henningsen (1965) los elevó al rango de formación. Por su parte, Mora (1979) los consideró como parte de la Formación Gatún aledaña al canal de Panamá y Granados & Aguilar (1983) propusieron volver a utilizar el rango de formación para la misma.

Esta formación se compone de areniscas pardas de granulometría media, estratificadas en capas de mediano espesor, con intercalaciones menores de conglomerados y lutitas; toda la secuencia presenta materiales tobáceos o detritos derivados de rocas volcánicas. (Linkimer & Aguilar, 2000).

Mora (1979) considera que el ambiente de depositación de la Formación Curré es típico de manglares, pantanos, playas y deltas, siendo posible separarla en dos unidades según sus características sedimentológicas:

- ✓ *Unidad de conglomerados:* predominan conglomerados y areniscas fosilíferas verde grisáceo depositadas en un ambiente deltaico y de playa. Su espesor varía entre 1000 a 1400 m. Granados & Aguilar (1983) describen en la base de la secuencia areniscas finas a muy finas con presencia de materia orgánica carbonizada. Esta unidad sobreyace concordantemente a la Unidad Lagarto de la Fm. Terraba y es sobreyacida por la Unidad de Lutitas descrita a continuación.
- ✓ *Unidad de Lutitas:* Mora (1979) menciona que fueron depositadas en un ambiente parálico (estero, pantano), siendo de color negro y encontrando intercalaciones ocasionales de areniscas y conglomerados. La cloritización es común en estas rocas. El espesor reportado se ubica entre los 150 a 300 metros. Se encuentra sobreyacida por la Formación Paso Real.

#### **2.1.14 Formación Paso Real**

Descrita originalmente por Dengo (1953, 1962a) como un conjunto de estratos depositados en un ambiente subacuático, asociados con aglomerados y con lavas. Mora (1979) le asigna una edad Plioceno – Pleistoceno Inferior y la divide en las unidades El Brujo (materiales predominantemente sedimentarios) y Mano de Tigre (productos volcánicos). En Linkimer & Aguilar (2000) se describe además la unidad Río Boquilla.

- ✓ *Unidad El Brujo:* Conglomerados, fanglomerados y areniscas de composición variable, depositadas en ambiente continental fluvio-lacustre. Su fuente de sedimentos fue la cordillera de Talamanca, presenta un espesor de 300 a 500 m y su edad se infiere Pliocénica. Sobreyace concordantemente a la Fm. Curré. (Mora, 1979)
- ✓ *Unidad Mano de Tigre:* Conglomerados con indicios de estratificación y a veces imbricación, de composición ígnea intrusiva y extrusiva, redondeados e incluidos

en una matriz arenosa. Se ha interpretado como relictos erosionados de un antiguo cráter.

- ✓ *Unidad Río Boquilla:* Alternancias de areniscas, lodolitas y conglomerados con un espesor de 800 metros, depositados en una ambiente continental de tipo fluvial, debido a la presencia de canales rellenos y materia orgánica vegetal. Se le ha asignado una edad Plio-Pleistocénica.

#### **2.1.15 Formación Valle de El General**

Mora (1979) describe esta formación como abanicos aluviales producto de la destrucción erosiva de la Cordillera de Talamanca y le asigna una edad Pleistocénica. Describe la presencia de bloques de hasta 3 a 4 m en una matriz areno limosa, con espesores de hasta 400 m. y un alto grado de laterización bauxítica en algunos sectores.

Mora (1979) menciona que sobreyace parcialmente a la formación. Paso Real posiblemente en forma discordante, mientras que Linkimer & Aguilar (2000) indican que sobreyace en discordancia angular a la Formación Curré. No posee unidades sobreyacentes además de los depósitos superficiales del Cuaternario.

#### **2.1.16 Depósitos Recientes del Cuaternario**

Constituidos principalmente por aluviones, coluvios y arenas de playa. En general se localizan en zonas deprimidas y planas, de disminución de gradiente y de baja elevación cerca de la costa Pacífica. Son materiales inconsolidados con presencia de gravas, arenas o arcillas que han sido generadas a partir de la erosión de materiales preexistentes. Los aluviones acarreados por ríos o quebradas progresivamente van rellorando diversos sectores del área, y a su vez, las corrientes marinas se encargan de transportar y depositar en las playas los materiales que logran llegar al mar. Al pie de los acantilados costeros o cerros del área, es posible localizar coluvios generados a partir de la caída y acumulación de materiales erosionados.

Destacan por su mayor extensión las planicies aluviales de Jacó, Quebrada Amarilla-Hermosa, Parrita, Damas, Naranjito-Marítima y el sector de Portalón-Matapalo en el sur-este de Quepos.

## 2.2 Tectónica Regional

La zona de estudio se localiza en el litoral pacífico de Costa Rica, en el cual destaca la presencia de varias estructuras y rasgos morfotectónicos importantes asociados con la interacción convergente de las placas tectónicas Coco y Caribe. A continuación se presentan los principales rasgos morfotectónicos asociados con el área de estudio.

### 2.2.1 La Fosa Mesoamericana

Corresponde con una depresión alargada de rumbo NW que va paralela a la costa Pacífica y marca el inicio de la zona de subducción en la que la placa de Coco, que se mueve a una velocidad absoluta de 6,5 cm/año, se dobla para iniciar su proceso de subducción bajo la placa Caribe. En Costa Rica la profundidad del piso de esta fosa es cercana a 4,5 km bajo el nivel de mar frente a la península de Papagayo y va disminuyendo hacia el SE hasta ubicarse a unos 2 km de profundidad en la zona de Osa y Burica (Montero, 2000 a).

Montero (2000 a) menciona que la placa de Coco acarrea varios levantamientos submarinos que eventualmente colisionan y se subducen en la Fosa Mesoamericana, tal es el caso de los levantamientos de Fisher al SE de la Península de Nicoya y el "Plateau de Quepos", ambos se subducen frente a Herradura y Quepos respectivamente. Adicionalmente, el levantamiento oceánico del Coco representa uno de los rasgos más importantes y corresponde con una serie de montañas submarinas que se levantan entre 1 y 2 km por encima del nivel del fondo oceánico, subduciéndose frente a las costas de la península de Osa al sur de Costa Rica (Figura 4).

La subducción del levantamiento oceánico del Coco origina un proceso tectónico, tipo colisión, caracterizado por una fuerte interacción con el sector continental, que tiene importantes implicaciones neotectónicas y sismológicas (Montero, 2000 b). Collins, Coates, Jackson & Obando (1995) consideran que la colisión del levantamiento del Coco, con el sur del país, se originó hace unos 3,6 Ma, lo cual provocó la terminación del vulcanismo en la actual Cordillera de Talamanca hace unos 2 Ma, aspecto que ha generado fuertes levantamientos en la zona, así como el incremento en la erosión, procesos que continúan hasta el día de hoy.

Montero (2000 a), menciona que como consecuencia de la colisión del levantamiento del Coco con el sur del país y la colisión de Panamá con la Placa Suramericana, hace unos 4 a 5 Ma, generó la formación de la microplaca Panamá como un bloque tectónico que se desprendió de la placa Caribe y que tiene un movimiento relativo al este-nor-este con respecto a esta última (Figura 4).

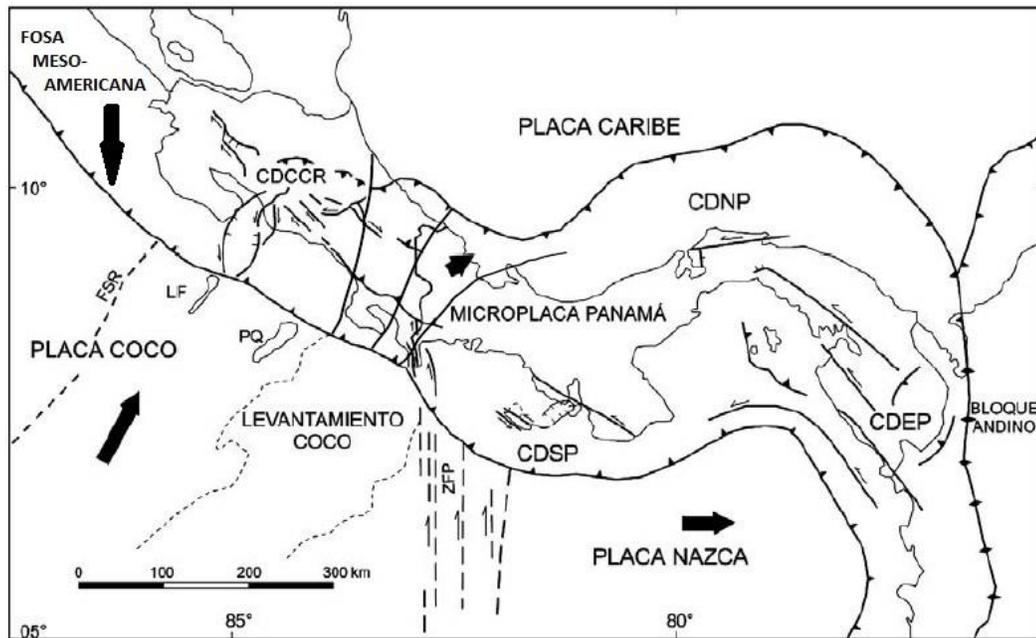


Figura 4. Marco tectónico de Costa Rica (Tomado de Montero, 2001).

### 2.2.2 La zona Ante Arco

Corresponde con la porción intermedia entre la fosa y el arco, se encuentra constituido por rocas ígneas cubiertas por sedimentos (Denyer, Montero y Alvarado, 2003). En esta zona, a partir de la fosa, el piso oceánico se comienza a levantar hacia el continente con una inclinación de 4 a 5 grados en lo que se denomina la ladera interna de la fosa, hasta alcanzar una altura máxima conocida como el quiebre de la ladera interna (Montero, 2000 a).

Entre el extremo SE de la Península de Nicoya y el borde NW de la de Osa, correspondiendo precisamente con el área de estudio (Figura 5), Montero (2000 a) menciona que esta zona de quiebre se ubica debajo del nivel del mar.

El antearco, en las zonas de Herradura y Quepos, incluye las rocas ígneas más antiguas de Costa Rica, Montero (2000 a) indica que en apariencia corresponden con el mismo Complejo de Nicoya y que fueron transportadas tectónicamente a su ubicación actual (Figura 5). Además menciona que, actualmente ciertos sectores del antearco están levantándose, incluso sobre el nivel del mar, como es el caso de Herradura, proponiéndose como principales mecanismo para explicar este ascenso los procesos de acreción o erosión tectónica en la zona de subducción.

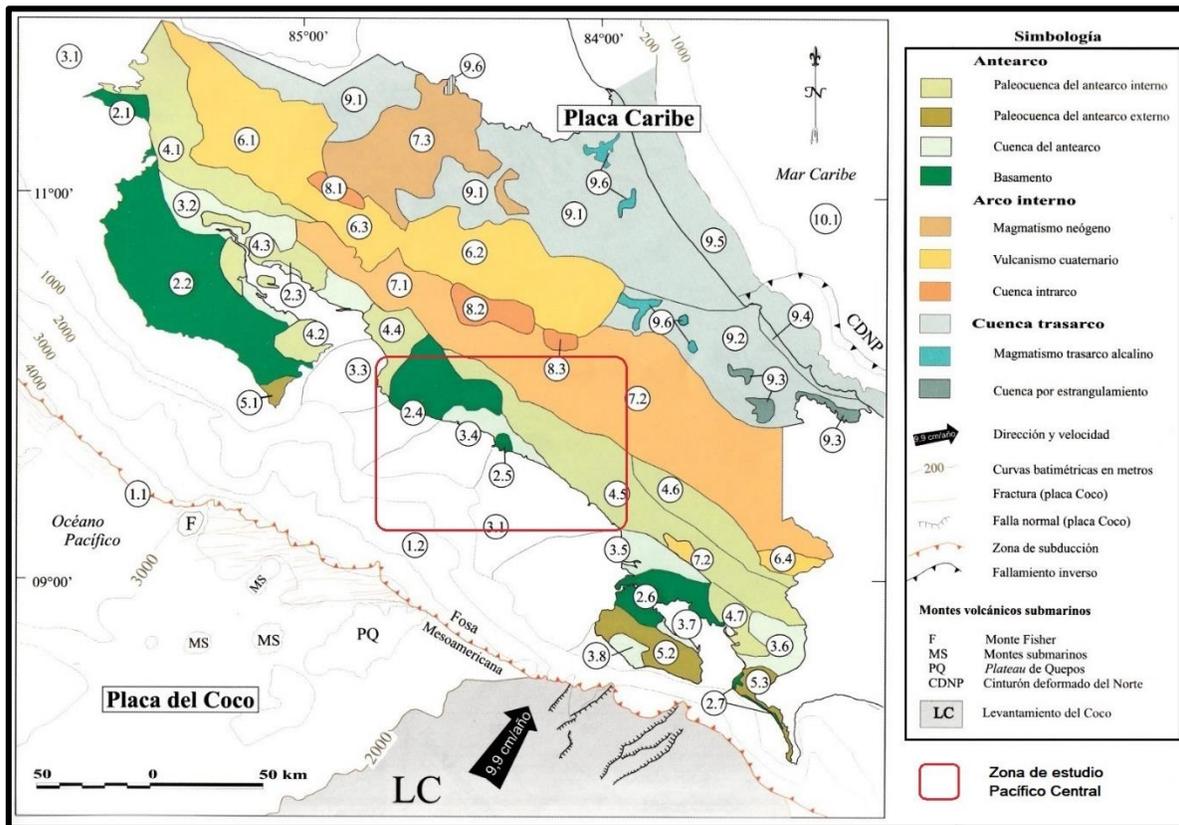


Figura 5. Contexto morfotectónico de la zona de estudio. Antearco (2.4 Herradura, 2.5 Quepos), cuencas antearco (3.4 Parrita - Quepos) y paleocuenas antearco (4.4 Esparza y 4.5 Térraba) (Recuperado de Denyer et.al., 2003).

### 2.2.3 Sismicidad y neotectónica en el ante arco

#### *Antearco central*

Entre Barranca y Dominical existe una serie de fallas neotectónicas de rumbo nor-este a norte, que suelen ser transversales a la costa y que limitan una serie de bloques con diferentes tasas de levantamiento. Destacan fallas como Barranca (FB),

Jesús María (FJM), Tárcoles (FTA), Herradura (FHE), Delicias (FDE), Tulín (FTU), Parrita (FPAR), Paquita (FPQ) y Quepos (FQ) (Montero. 2000 b), (Figura 5).

Montero (2001), considera que estas fallas forman parte del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), que constituye un sistema de fallas corticales que actúan como el límite oeste de la microplaca de Panamá con la placa Caribe y que atraviesa la región central del país. Incorpora fallas de diversos desplazamientos, pero en general son predominantemente de desplazamiento normal en el antearco (sector pacífico). De igual forma, Montero (2001) considera que la deformación neotectónica que ocurre en el CDCCR se debe a los esfuerzos generados a partir de la colisión del levantamiento del Coco con el sureste de Costa Rica (Figura 5).

Otras fallas de rumbo nor-oeste como la Candelaria y la Longitudinal han generado levantamientos recientes en la Fila Costeña, aunque con una tasa menor que en la zona de Osa y Burica. Para la falla Candelaria Rodríguez (2017), determinó un potencial sísmico de hasta 7,3  $M_w$ .

### ***Antearco sur***

Destaca en este sector la presencia de la Falla Longitudinal de Costa Rica (FL). Como se ha mencionado, la subducción de la cordillera submarina del Coco ha provocado diversos efectos geológicos, tectónicos y sismológicos a partir de las fuerzas compresivas generadas. Con el inicio de esta subducción se originaron fuertes levantamientos tectónicos, se dio fin al vulcanismo en Talamanca y además, se han originado una serie de fallas neotectónicas entre el antearco y el trasarco del este de Costa Rica (Montero, 2000 b).

En el sector frontal de la Fila Costeña se ubica la denominada Falla Longitudinal que Denyer et al (2003), describen como una falla activa, por lo menos en el sector sureste y a lo largo de la cual han ocurrido buena parte de los movimientos de levantamiento e inclinación de capas hacia el nor-este, que han afectado esta fila montañosa durante el Cuaternario.

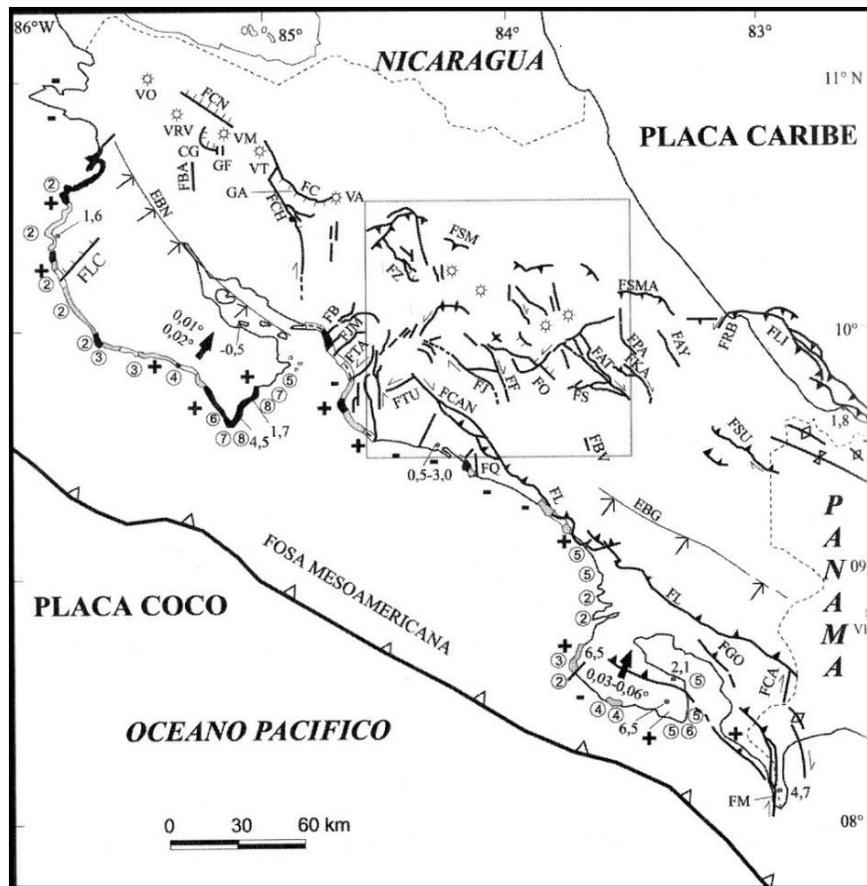


Figura 6. Ubicación de las fallas Barranca (FB), Jesús María (FJM), Tárcoles (FTA), Quepos (FQ) y otras, como como parte del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). Nótese además la ubicación de la Falla Longitudinal de Costa Rica (FL) a lo largo de la costa. (Recuperado de Montero 2000 b).

Corresponde con una falla o sistema de fallas de alto ángulo, posiblemente con una inclinación mayor a  $70^\circ$  orientada N55W e inclinada hacia el nor-este, con un movimiento de tipo inverso que presenta una componente de desplazamiento de rumbo, probablemente dextral (Montero, Denyer, Barquero, Alvarado, Cowan, Machette, Haller & Dart, 1998). Mora (1979), menciona que producto de esta falla son notables los cabalgamientos y repeticiones de estratos a todo lo largo de la Fila Costeña.

Alvarado (2005) indica que esta falla se extiende desde el norte de Parrita hasta el noroeste de Paso Canoas, pero su traza continúa por varios kilómetros en la región panameña. Para Denyer et al. (2003), la traza se ubica a lo largo de la costa (Figura 6), mientras que Alvarado (2005), basado en la observación de un grupo de islas, islotes y salientes rocosos, sitúa la traza mar adentro.

#### 2.2.4 Las cuencas ante arco

Siempre en el contexto de un ambiente convergente entre placas tectónicas, entre la zona de antearco y arco interno se desarrollan cuencas sedimentarias que son rellenadas por sedimentos que provienen predominantemente del arco interno, del antearco cuando este se levanta sobre el nivel del mar o de origen biogénico formado *in situ* (Montero, 2000 a).

Denyer et al. (2003) cartografían gran parte del área de estudio como cuencas relacionadas al antearco, tal es el caso de la zona Parrita-Quepos, mientras que otros sectores han sido catalogados por estos mismos autores como paleocuenas sedimentarias. En ese sentido Montero (2000 a) menciona que hasta hace unos 5 Ma, la cuenca del Térraba fue también una cuenca antearco, dado que era una depresión marina que recibió grandes volúmenes de sedimentos hasta el Mioceno, sin embargo, cuando comenzó la subducción del levantamiento del Coco a principios del Plioceno, se dio una inversión tectónica, es decir por levantamientos tectónicos esta zona de cuenca emergió y se convirtió en montañas, originándose la actual Fila Costeña (Figura 6).

### 2.3 Geología Local

Para la determinación y caracterización de la geología local en la zona del Pacífico Central, se ha tomado como base el mapa geológico de Costa Rica de Denyer & Alvarado (2007). Esta se actualizó y detalló al incorporar información bibliográfica más reciente, los registros de pozos de producción de bases de datos institucionales, los resultados de las campañas de perforación exploratoria, el mapeo geológico con el levantamiento de afloramientos, los sondeos geofísicos y la caracterización de suelos.

A partir de la integración de la información se procedió a elaborar el modelo geológico para las cuencas en estudio. En los siguientes apartados se describe la información existente para la actualización y detalle de la geología local de cada microcuenca que forma parte del área de estudio.

#### 2.3.1 Registros litológicos de pozos

Al año 2020 se tiene registro en la base de datos del SENARA un total de 601 pozos para la zona del Pacífico Central, 566 corresponden con pozos de producción y

35 con pozos exploratorios (piezómetros) que ha realizado el SENARA entre los años 2015 y 2016 (Tabla 4).

Tabla 4. Pozos registrados en SENARA.

Zona del Pacífico Central	Pozos de producción	Piezómetros SENARA	Total de pozos registrados en BD-SENARA
Herradura-Jacó	68	5	73
Hermosa-Esterillos	130	6	136
Parrita	54	2	56
Damas-Quepos	39	3	42
Naranjo-Savegre-Matapalo	72	8	80
Dominical-Ballena	203	11	214
<b>TOTAL</b>	<b>566</b>	<b>35</b>	<b>601</b>

En la figura 7 se muestra la distribución de pozos por área y el anexo 1 contiene la información a detalle de todos los pozos registrados y ubicados en la zona de estudio.

### 2.3.2 Perforaciones exploratorias

A través de los 35 piezómetros armados y distribuidos en las cuencas que conforman el estudio del Pacífico Central (Figura 7), se obtuvo información de los niveles de agua subterránea, espesores de las distintas unidades geológicas con potencial acuífero, parámetros hidráulicos (k), los cuales se consideran como insumos básicos para la construcción de los modelos geológico e hidrogeológico en el área de estudio. En la tabla 5, se muestra la información obtenida en los piezómetros a partir de las pruebas realizadas y en el anexo 2 contiene el detalle de cada perforación exploratoria. Finalmente, todas las perforaciones fueron armadas como piezómetros de monitoreo con tubería PVC de 2 pulgadas, rejilla slot 20, empaque de grava, brocal y candado.

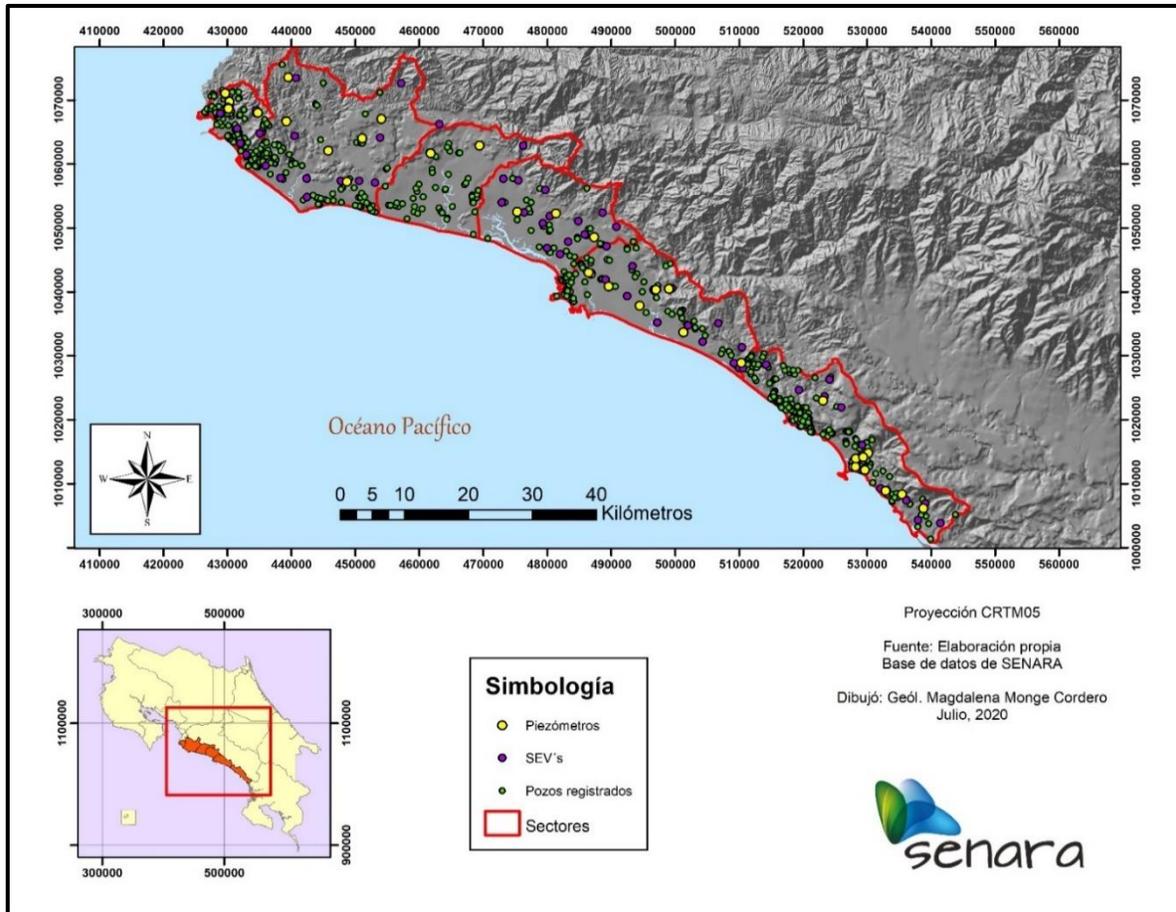


Figura 7. Ubicación de pozos registrados, perforaciones exploratorias y SEVS.

Tabla 5. Resultados de las perforaciones exploratorias.

No. Piezómetro	Código	CRTM 05		Profundidad (m)	N.E. final (m)	Formación Geológica	Petrografía (profundidad-clasif)	Armado	Pruebas hidráulicas	Parámetros geofísicos
		X	Y							
Herradura-Jacó										
1	HE-176	434776	1067977	90.67	3,89	Complejo de Nicoya	5,4m Caliza biogénica 77,2m Basalto serpentizado	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
2	TS-166	429673	1071013	99.56	1.72	Fm. Punta Carballo	30m Lutita 70m Lutita fosilífera	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
30	TS-170	430353	1069726	50.06	15	Depósitos Cuaternarios Recientes Fm. Punta Carballo	47,10m Arenisca fosilífera	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
31	HE-184	430087	1068759	51.30	10.5	Depósitos Cuaternarios Recientes Fm. Punta Carballo	43,95m Arenisca Lítica 48,45m	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

							Arenisca fosilífera			
32	HE-183	430169	1068651	59.83	9.59	Depósitos Cuaternarios Recientes Complejo de Nicoya	58,95m Gabro serpentinizado	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
Hermosa-Esterillos										
3	HE-175	439216	1066640	93.09	5.16	Complejo de Nicoya	No se realiza	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
4	TS-165	439538	1073532	100.40	48.98	Fm. Tulín	60,38 m Basalto serpentinizado	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
5	PAT-060	445758	1062046	100.77	4.8	Fm. Punta Carballo	31 m Lutita 60,38 m Lutita calcárea	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
6	PAT-059	454067	1067028	100.59	30	Fm. Tulín	23 m Basalto 41,3 m Caliza	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
15	PAT-062	451061	1063967	89.50	0	Fm. Punta Carballo Mb. Roca Carballo	78,67m Arenisca lítica	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

23	PAT-061	448697	1057201	100.00	1.65	Fm. Punta Carballo Mb. Roca Carballo	4,40m Arenisca lítica 7,60 m Arenisca fosilífera 18,1 m Arenisca lítica 68,9 m Arenisca arcósica 85,25 m Arenisca lítica 89,8 m Arenisca lítica	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
Parrita										
7	PAT-058	461785	1061618	100.89	27,1	Depósitos Cuaternarios Recientes  Fm. Tulín	12,90m Arenisca fina-brecha fina 27,70m Caliza 55,90m Arenisca lítica 57m Peperita 79,90m Basalto serpentiniz	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

							ado 96,90m Basalto			
8	PAT-057	469428	1062848	100.61	1,35	Depósitos Cuaternarios Recientes  Fm. Térraba	15,60m Lutita calcárea negra	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
Damas-Quepos										
9	D0-011	475319	1052493	49.56	Surgente (Confinado)	Depósitos Cuaternarios Recientes  Fm. Roca Carballo Mb. Roca Carballo  Fm. Térraba	28,23 m Arenisca lítica fina 32,36 m Arenisca lítica	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
22	D0-012	481344	1052246	85.01	10,70 m	Depósitos Cuaternarios Recientes	29,98m Lutita 35,03 m Arenisca lítica	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

						Fm. Térraba	40,07m Arenisca conglomerádica 44,76m Conglomerado brechoso			
24	QP-097	487324	1048546	100.29	6,7	Fm. Térraba	81 m: arenisca arcósica	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
Naranjo-Savegre-Matapalo										
10	QP-096	489596	1040814	50.11	2,3	Depósitos aluviales cuaternarios Formación Térraba	Debido a la naturaleza de los materiales de la columna no fue posible tomar muestra para clasificación.	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
11	QP-095	494461	1037828	50.86	0	Depósito Aluvial Cuaternario	Debido a la naturaleza de los materiales de la columna no fue posible	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

							tomar muestra para elaborar una sección delgada.			
12	QP-094	499017	1040453	100.00	5,8	Depósitos recientes Formación Térraba	30,75 m: Brecha fina 48,25 m: Brecha fina (silicificada) 67,35 m: Arenisca arcósica 80,75 m: Conglomerado	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
13	SG-015	501293	1033662	49.99	3,58	Depósito Aluvial Cuaternario Formación Térraba	Debido a la naturaleza de los materiales de la columna no fue posible tomar muestra para clasificación.	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

14	DM-165	510344	1028912	50.99	1,75	Depósito Aluvial Cuaternario Formación Terraba	Debido a la naturaleza de los materiales de la columna no fue posible tomar muestra para elaborar una sección delgada.	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
25	QP-098	497010	1040309	49.98	2,6	Depósito Aluvial Cuaternario	Debido a la naturaleza de los materiales de la columna no fue posible tomar muestra para elaborar una sección delgada.	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

34	QP-101	486833	1042829	65.00	4,26	Depósitos Cuaternarios Miembro Roca Carballo	Debido a la naturaleza de los materiales de la columna no fue posible tomar muestra para elaborar una sección delgada.	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
35	QP-100	486465	1042974	65.00	5,3	Depósitos Cuaternarios Miembro Roca Carballo	Debido a la naturaleza de los materiales de la columna no fue posible tomar muestra para elaborar una sección delgada.	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
Dominical-Ballena										

16	DM-166	523101	1022953	100.14	12.7	0-100 m: Fm. Térraba	24.50 m: Brecha 43.75 m: Brecha 75 m: Arenisca brechosa 97.50 m: Lutita	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
17	RE-031	530194	1014806	100.40	8.4	0-18,3 m: Depósito coluvio- aluviales. 18,3-100 m: Fm. Térraba.	17.7 m: Arenisca brechosa 64.5 m: Arenisca brechosa 92.40 m: Lutita calcárea	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
18	COR-047	527795	1013182	49.61	2.8	0-38,15 m: Depósito aluvial cuaternario . 38,15-50 m: Fm. Térraba.	49.1 m: Lutita	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
19	COR-048	535434	1008331	100.10	14.04	0-100 m: Fm. Térraba	23 m: Lutita 41.30 m: Brecha	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

20	COR-049	538788	1006118	100.00	6.2	0-100 m: Fm. Térraba intruida por Fm. Puerto Nuevo	31.25 m: Lutita 63.75 m: Brecha fina 93.5 m: Arenisca fina arcósica	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
21	COR-050	532894	1008871	50.00	3.58	0-12.6 m: Fm. Térraba y Fm. Puerto Nuevo 12.6-18.3 m: Fm. Puerto Nuevo 18.3-50 m: Fm. Térraba.	16.25 m: Gabro 32.40 m: Contacto Lutita - gabro	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
26	COR-051	527810	1012610	50.17	0	0-35,90 m: Depósitos aluvial cuaternario . 35,90-50 m: Fm. Térraba.	No se realizó	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
27	COR-052	529653	1012144	50.26	3.8	0-18,76 m: Depósito aluvial cuaternario . 18,76 -	29.16 m: Lutita	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

						50 m: Fm. Térraba.				
28	RE-032	528232	1013910	48.00	8.2	0-30 m: Depósitos cuaternario . 30-50 m: Fm. Térraba.	39.7 m: Arenisca lítica 48.5 m: Lutita	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
29	COR-053	528165	1012635	50.05	2.3	0-32 m: Depósitos cuaternarios 32-50 m: Fm. Térraba	37.25 m: Lutita	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad
33	RE-033	529391	1014116	49.83	5.65	0-18,5 m: Depósitos cuaternario . 18,5-50 m: Fm. Térraba.	35.34 m: Lutita	Sí	Conductividad hidráulica	Resistividad

### 2.3.3 Exploración geofísica

En la cuenca del Pacífico Central se realizaron dos campañas de exploración geofísica como parte de los insumos necesarios para la construcción de los modelos geológicos e hidrogeológicos de la zona, a continuación se describen los resultados obtenidos en cada una.

✓ *Campaña de geofísica 2015: 2013LN-000008-OC*

A partir de los valores de campo de los 50 SEV ejecutados, se elaboraron los gráficos y la inversión de estos para ajustarlos al modelo numérico y geológico. El análisis cualitativo se realizó con la interpretación de los datos de resistividad y profundidad, el cual además considera la geología local y regional para definir la correlación geológica del modelo numérico de los sondeos. Esta última se llevó a cabo a partir de resistividades preestablecidas, en la literatura, para las distintas litologías. En la tabla 6 se muestra la ubicación e interpretación de los SEV, en la figura 7 la distribución de estos.

✓ *Campaña de geofísica 2016: Licitación 2013LN-000009-OC*

Esta campaña permitió realizar una diagráfia eléctrica de cada pozo exploratorio, para un total de 35. A partir de la información generada y la interpretación de esta, se obtuvieron los respectivos perfiles geoeléctricos y posteriormente se elaboraron los perfiles de correlación, considerando los resultados de resistividades obtenidas, la geología de las zonas, así como la información contenida en las perforaciones exploratorias y pozos cercanos. En la figura 7 se muestra la ubicación de cada sondeo y el anexo 3 contiene la información completa de las diagráfias y su correlación con la geología regional.

### 2.3.4 Perfiles geológicos

En las cinco zonas que integran el presente estudio del Pacífico Central, se llevaron a cabo 16 perfiles geológicos-geoeléctricos, que además contienen la información de los piezómetros y pozos registrados en la base de datos del SENARA con la descripción más confiable. Se describe a continuación los perfiles para cada zona.

#### ✓ *Sector Herradura – Jacó*

El perfil A-B (Figura 8) tiene una dirección sur-este y sur-oeste se ubica longitudinalmente en la microcuenca de la quebrada Cañablanca en el sector de Herradura. Para su elaboración se utilizaron los afloramientos levantados en el campo, diez pozos y dos piezómetros (TS-170 y HE-183). La base del perfil está conformada por las rocas sedimentarias de la Formación Punta Carballo y los basaltos del Complejo de Nicoya, se define que el contacto en profundidad entre ambas formaciones es por falla y ambas formaciones están sobreyacidas por depósitos aluviales los cuales tienen, de manera discontinua, una capa de arcillas con un espesor que oscila 0,5 y los 9,67 m, para un definir un promedio entre los 4,5 a 5 m como se ilustra en el perfil geológico E-F (Figura 9).

Con base en el análisis y la correlación de los afloramientos cartografiados en el campo, los treinta y dos pozos perforados y dos sondeos eléctricos verticales se ha determinado un espesor para las capas de arenas y gravas de los depósitos aluviales en la microcuenca de la quebrada Cañablanca que oscila entre 8,56 a 53 m para un promedio de 32,94 m como se muestra en los perfiles geológicos de la figura 8 y la figura 9.

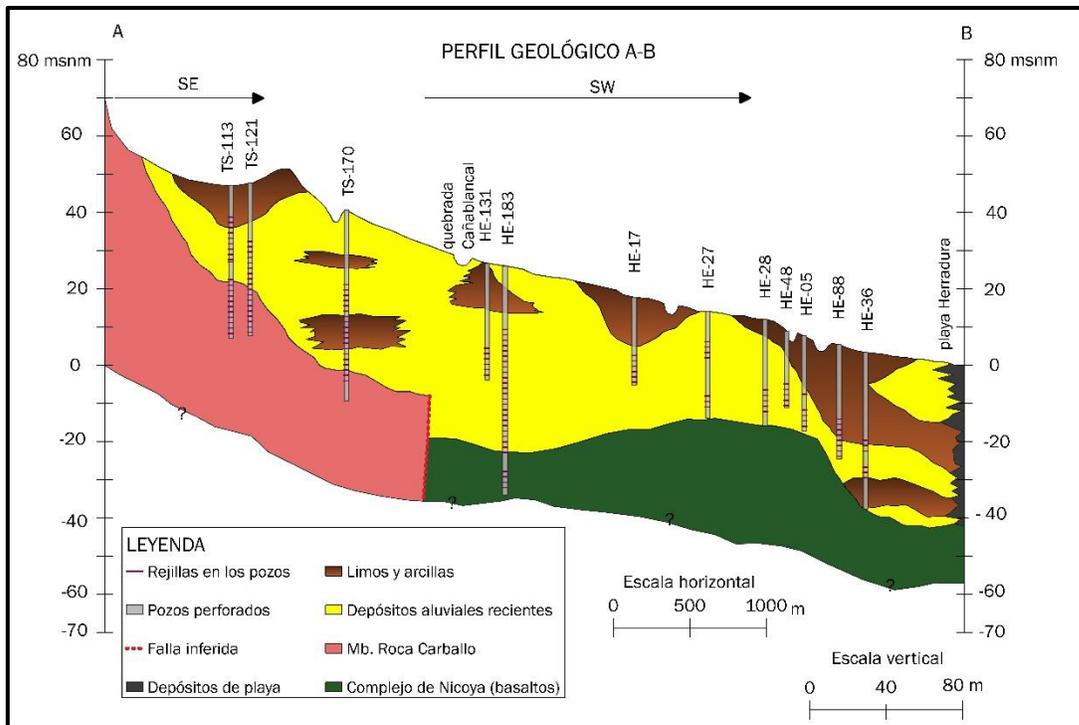


Figura 8. Perfil geológico A-B, sector de Herradura.

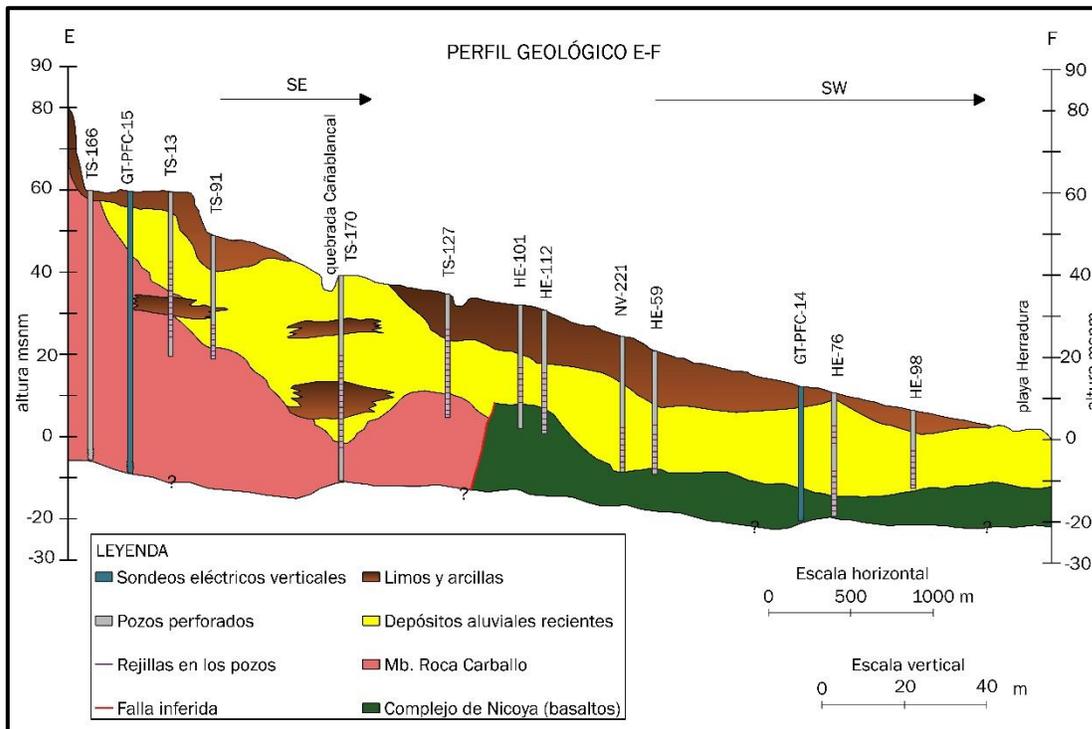


Figura 9. Perfil geológico E-F, sector de Herradura.

El perfil geológico I-J y el perfil geológico K-L (Figuras 10 y 11) tienen dirección SW y SE respectivamente, atraviesan transversalmente y longitudinalmente el sector de Jacó. Se encuentra constituido por nueve pozos perforados y tres sondeos eléctricos verticales, la base del perfil está conformada los basaltos de complejo de Nicoya, de acuerdo a la información de pozos y los SEVs el espesor mínimo correlacionado de las rocas del Complejo de Nicoya 10 a 15 m aproximadamente.

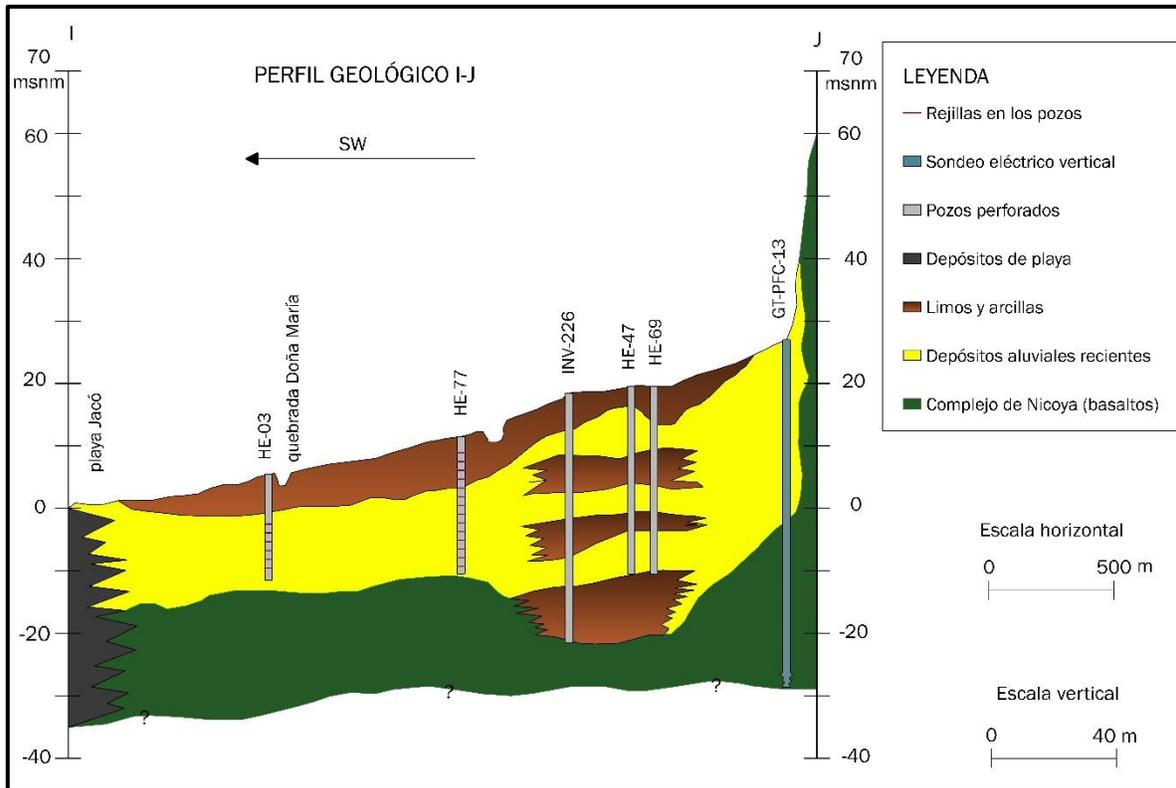


Figura 10. Perfil geológico I-J, sector de Herradura.

Las rocas del Complejo de Nicoya están sobreyacidas por depósitos aluviales que en la parte superior se tiene una capa de arcillas con un espesor que oscila 0,5 y los 10 metros, para un definir un promedio entre los 4,5 a 5 m. De acuerdo con la correlación de los afloramientos, los pozos perforados y los sondeos eléctricos verticales el espesor definido para las gravas y arenas de los aluviones en el sector de Jacó está entre los 4 y 44 m para un promedio de 24 m.

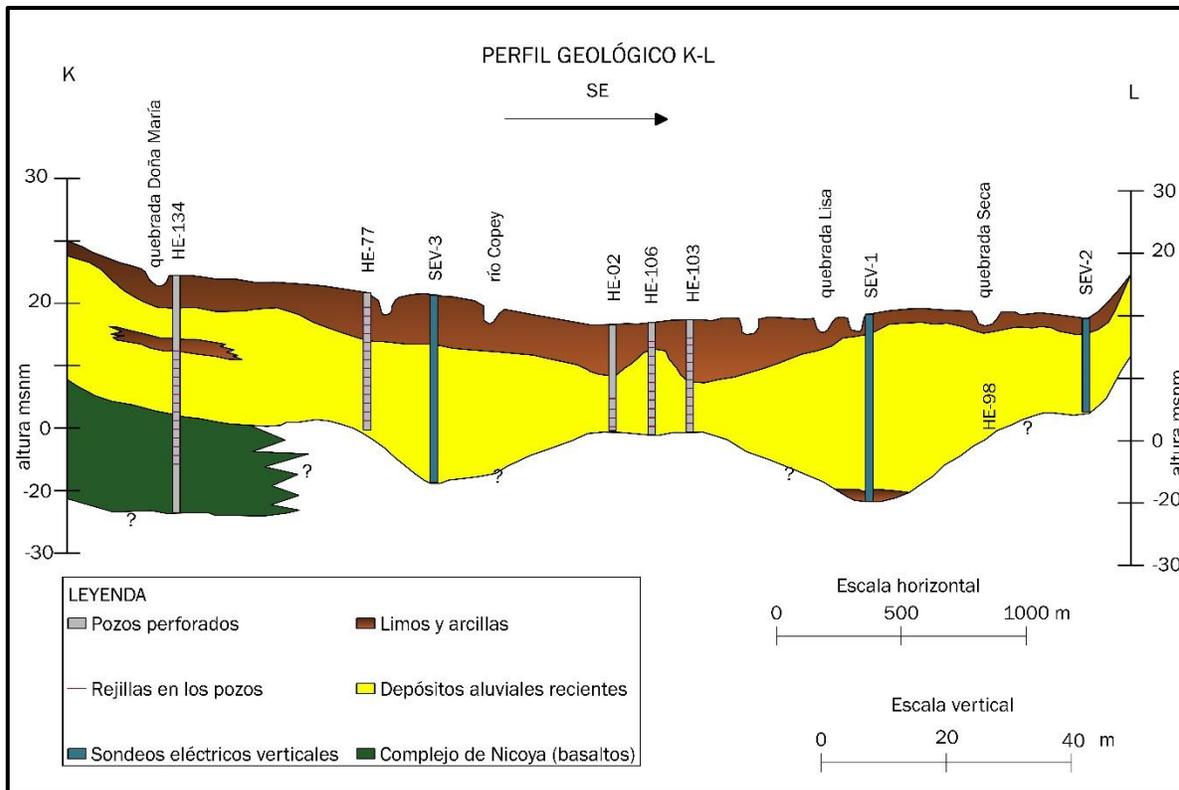


Figura 11. Perfil geológico K-L, sector de Herradura.

✓ **Sector Hermosa – Esterillos**

El perfil A-A” (Figura 12) tiene un tramo en dirección NE y otro hacia el SE, se ubica cercano a la costa en la zona Esterillos Oeste. La base del perfil está conformada por areniscas y lutitas de la Formación Punta Carballo, misma que es sobreyacida por depósitos aluviales recientes.

El perfil B-B” (Figura 12) tiene una dirección hacia el SE, se ubica desde la finca Pochotal hasta la Finca Esperanza, entre Quebrada Amarilla y Playa Hermosa. La parte alta del perfil se compone de basaltos del Complejo de Nicoya y en la parte plana, la base del perfil está conformada por areniscas y lutitas de la Formación Punta Carballo, misma que es sobreyacida por depósitos aluviales recientes.

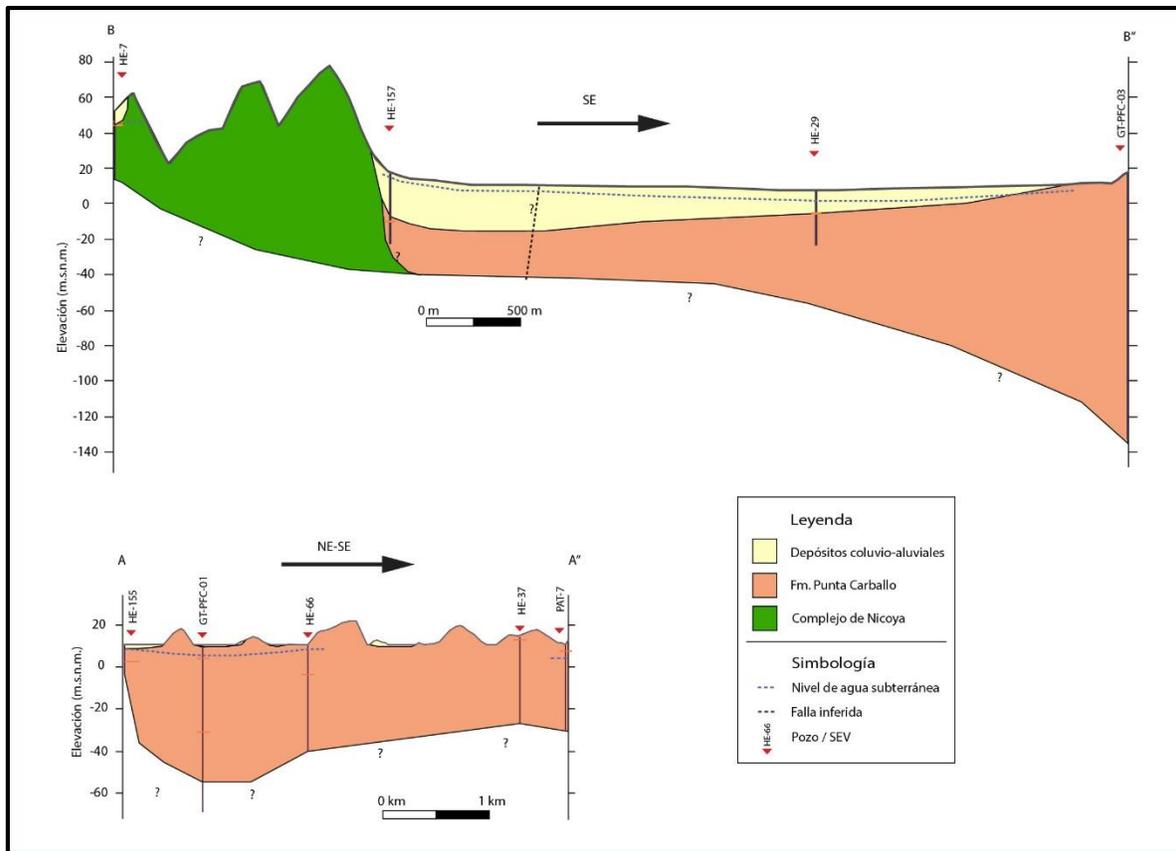


Figura 12. Perfil A-A' y B-B' en la zona de Hermosa y Esterillos.

El perfil D-D' (Figura 13) tiene una dirección hacia el NE, se ubica desde Esterillos Este hasta la Fila Aguacate. La parte alta del perfil se compone de basaltos de la Formación Tulín, y en la parte más plana, la base del perfil está conformada por areniscas y lutitas de la Formación Punta Carballo.

El espesor estimado para el Complejo de Nicoya está entre 28 y 100 m. Esta formación tiene su distribución en la zona de Herradura, Jacó y cerca de la zona de Hermosa. Hacia la parte alta de la cuenca, así como hacia el Este de Hermosa, se encuentra principalmente la Formación Tulín, con espesores estimados de hasta 145 m.

La Formación Punta Carballo tiene espesores entre 20 y 150 m aproximadamente. La sobreyacen los depósitos aluviales recientes, ubicados en las partes más planas de Esterillos y Hermosa, así como un depósito ubicado cerca de La Gloria de Puriscal.

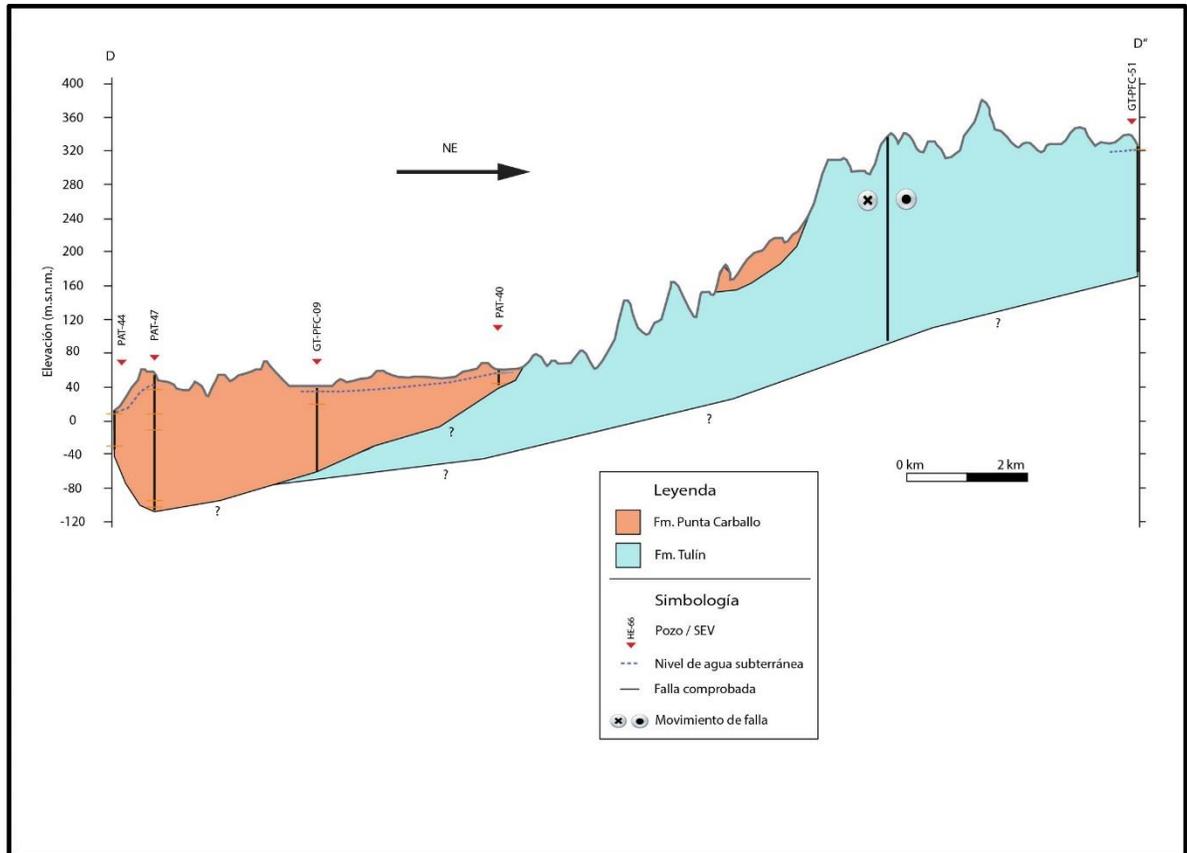


Figura 13. Perfil D-D´ en la zona de Hermosa y Esterillos.

### ✓ Sector Parrita – Quepos

En la cuenca del río Parrita, el perfil transversal A-A´ (Figura 14), localizado en la parte baja de esta, casi paralelo a la línea de costa y compuesto por el amarre de pozos exclusivamente, muestra la presencia de un basamento local compuesto por rocas de la Formación Punta Carballo, sobreyacidas por los depósitos aluviales desarrollados a partir del río Parrita y la quebrada Palma principalmente. A su vez, algunos lomas redondeadas y aisladas, compuestas por Areniscas y Conglomerados no diferenciados sobreyacen a la Formación Punta Carballo.

Los depósitos aluviales para la cuenca del río Parrita tienen espesores que varían desde los 15 m en promedio hasta los 100 m hacia el sector Oeste de la quebrada Palma. De acuerdo con las estructuras descritas a nivel regional y local, solo se infiere una falla local que eventualmente corta a las rocas de la Formación Punta Carballo y los Depósitos Coluvio-Aluviales. La amplia distribución de estos Depósitos Cuaternarios, tanto transversal como longitudinalmente en esta zona,

obedece a que corresponde con un sistema de descarga de montaña con una muy alta capacidad de arrastre de sedimentos, aspectos que ponen al descubierto la presencia de un potencial acuífero, evidenciado por la presencia de pozos en todo este sector.

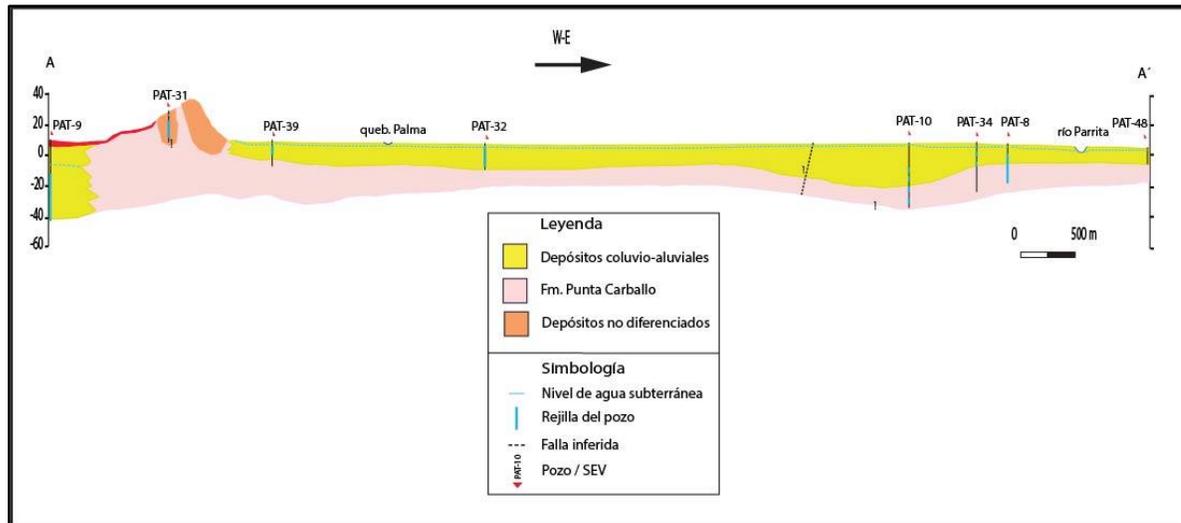


Figura 14. Perfil transversal A-A', sector parte baja de Parrita.

El perfil transversal B-B' (Figura 15), trazado hacia el Norte de la zona de estudio Parrita-Quepos, permite identificar que las cuencas de ambas zonas, se encuentran conformadas por rocas de las formaciones Terraba, Areniscas y Conglomerados no diferenciados, Punta Carballo y Depósitos Coluvio-Aluviales, principalmente. Las partes más altas de ambas cuencas se caracterizan por desarrollar capas de suelos limo arcillosos a arcillas que alcanzan desde los 2 m (DO-9) hasta 8,37 m (GT-PFC-22) de espesor. Mientras que para la Formación Punta Carballo se registran espesores inferiores a 50 m (Figura 14), para la Formación Terraba su espesor oscila entre 85 m (PAT-57) a 143 m (GT-PFC-53, GT-PFC-24 y GT-PFC-22). En las partes altas de la cuenca del río Cañas (sector Norte de Quepos) y río Palo Seco, por la cercanía con la cadena montañosa, los Depósitos Coluvio-Aluviales son menos desarrollados y los espesores son menores a los 10 m (DO-12 y GT-PFC-22).

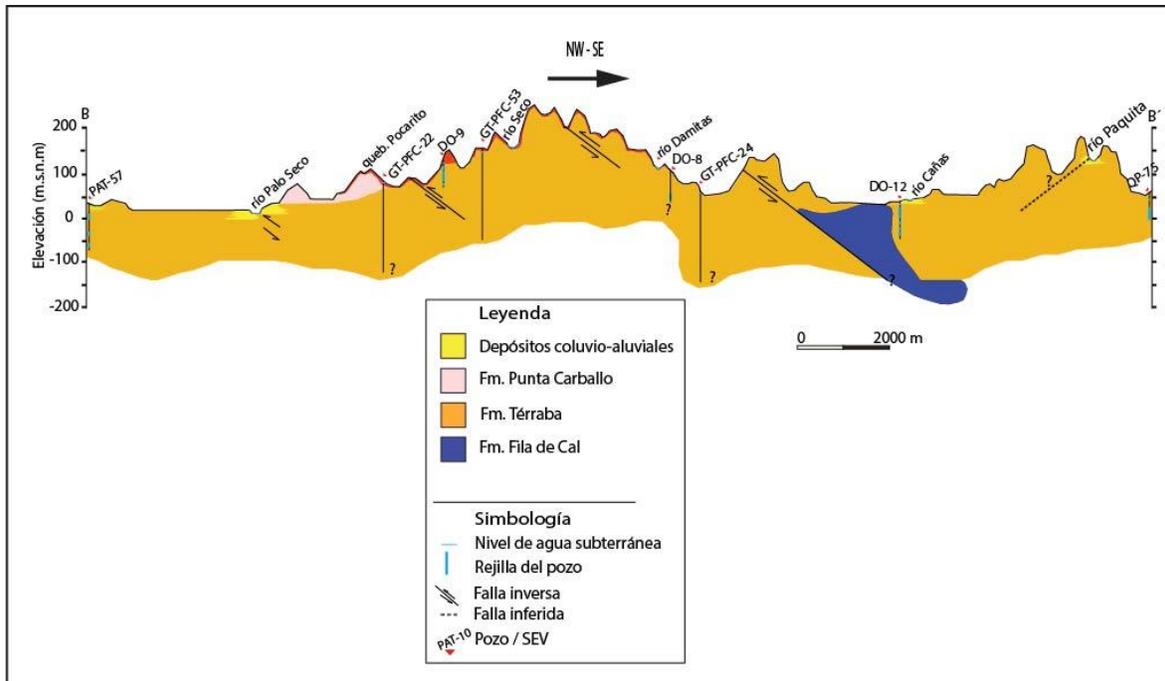


Figura 15. Perfil transversal B-B´, sector parte Parrita - Quepos.

En general, esta zona de estudio se caracteriza por una serie de fallas inversas presentes en la Formación Punta Carballo, como consecuencia del proceso de subducción del levantamiento oceánico de la placa Coco bajo la margen oeste de la placa Caribe. Aspecto que permite, identificar hacia el nor-este del río Cañas, sector Las Cuevas, rocas de la Formación Fila de Cal, las cuales logran aflorar debido a una falla inversa (Figura 15).

✓ **Sector Naranjo – Savegre – Matapalo**

El perfil A-A' (Figura 16) tiene dirección NE-SW, ubica transversalmente y en el centro de la cuenca Naranjo-Savegre Matapalo. Se encuentra constituido por dos sondeos eléctricos verticales y tres piezómetros. La base del perfil está conformada por conglomerados, areniscas y lutitas de la Formación Térraba, misma que es sobreyacida por los Depósitos Aluviales recientes que se consideran con un buen potencial acuífero, de acuerdo con la ubicación de los niveles de agua subterránea reportados en los registros de los piezómetros y los sondeos eléctricos verticales.

El espesor mínimo de la Formación Térraba es de 50 m aproximadamente y fue identificado en el sondeo GT-PFC-34, mientras que el máximo encontrado es de 90 m aproximadamente en el piezómetro QP-94 y en el sondeo GT-PFC-58, los cuales poseen una profundidad de 100 m cada uno.

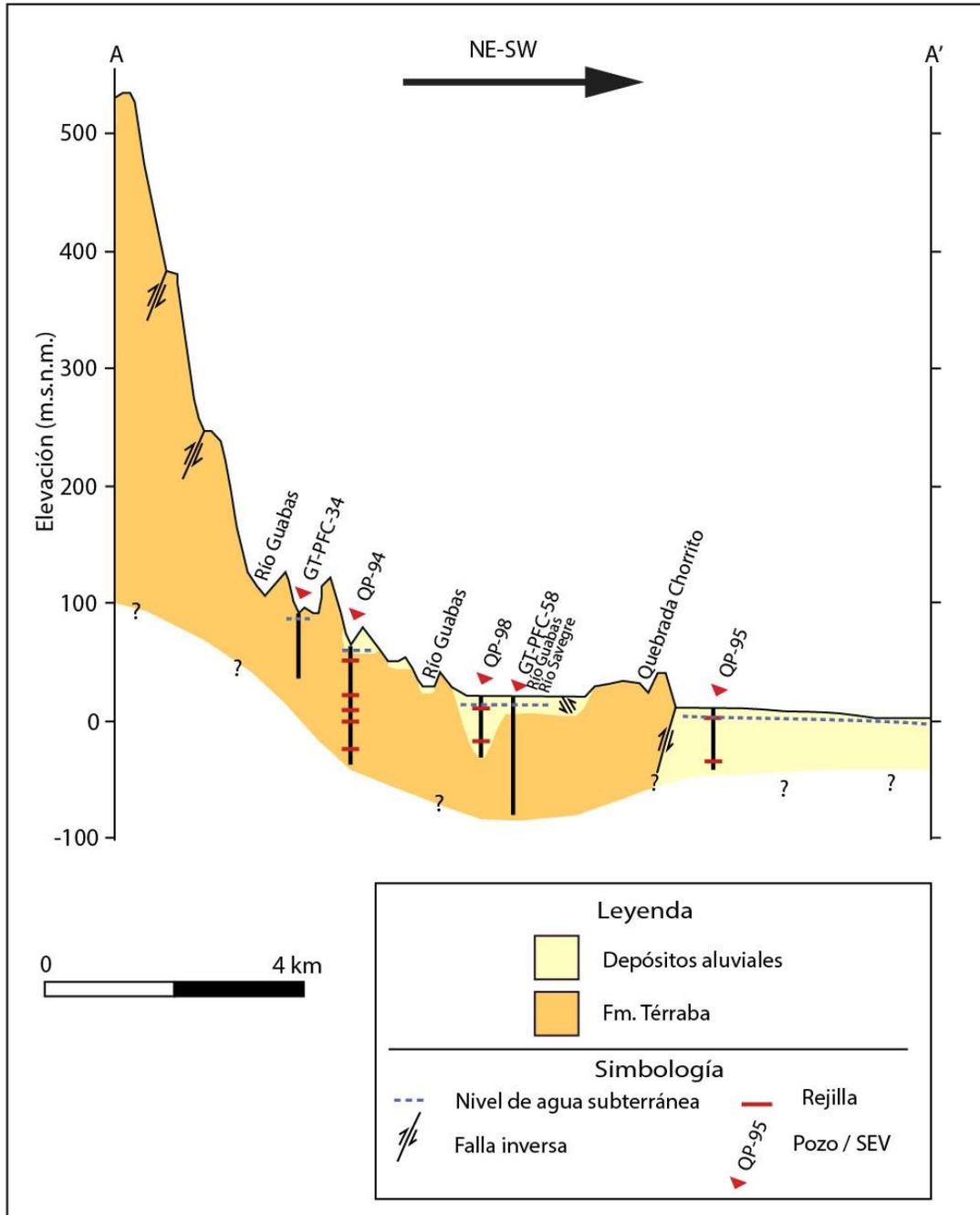


Figura 16. Perfil transversal a la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo.

Los Depósitos Aluviales, según la figura 16, poseen un espesor mínimo de 10 m en el pozo QP-94 y en el sondeo GT-PFC-58, mientras que el máximo identificado es de 50 m en los piezómetros QP-95 y QP-98 que poseen la misma profundidad total.

En la parte alta de la cuenca hacia el sector NE en el perfil A-A', específicamente en las rocas de la Formación Térraba, se ubican dos fallas inversas. Asimismo, en el contacto entre la Formación Térraba y los Depósitos Aluviales se encuentra una falla inversa que se observa en el campo como un cambio en la topografía.

El perfil B-B' atraviesa longitudinalmente la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo en dirección SE-NW. Se observa que la cuenca, en esta dirección, se encuentra conformada por la Formación Térraba, la Formación Punta Carballo y los Depósitos Aluviales Recientes.

En la figura 17 se observa que la topografía que domina la cuenca, en la dirección del perfil es plana, originada por los Depósitos Aluviales e irregular en los escasos sitios que atraviesan la Formación Térraba.

Las rejillas de los piezómetros y los niveles de agua subterránea se ubican en los Depósitos Aluviales principalmente. Sin embargo, en los piezómetros QP-101 y QP-100 las rejillas se ubican especialmente en las rocas de la Formación Punta Carballo, aunque los niveles de agua se encuentran en los Depósitos Aluviales que constituye el nivel productor.

El espesor mínimo de la Formación Térraba es de 8 m aproximadamente en el sondeo SG-015, mientras que el máximo es de 70 m aproximadamente en el sondeo GT-PFC-29. La Formación Punta Carballo presenta espesores aproximados que van desde los 32 m hasta los 53 m en los piezómetros QP-101 y QP-100 respectivamente. Los Depósitos Aluviales poseen un espesor mínimo de 12 m en el piezómetro QP-100 y máximo de 60 m determinado mediante el sondeo GT-PFC-31.

En este perfil también se evidencia, con un cambio brusco en la topografía, la existencia de una falla inversa en el contacto entre la Formación Térraba y los Depósitos Aluviales en el sector SE del perfil B-B' (Figura 17).

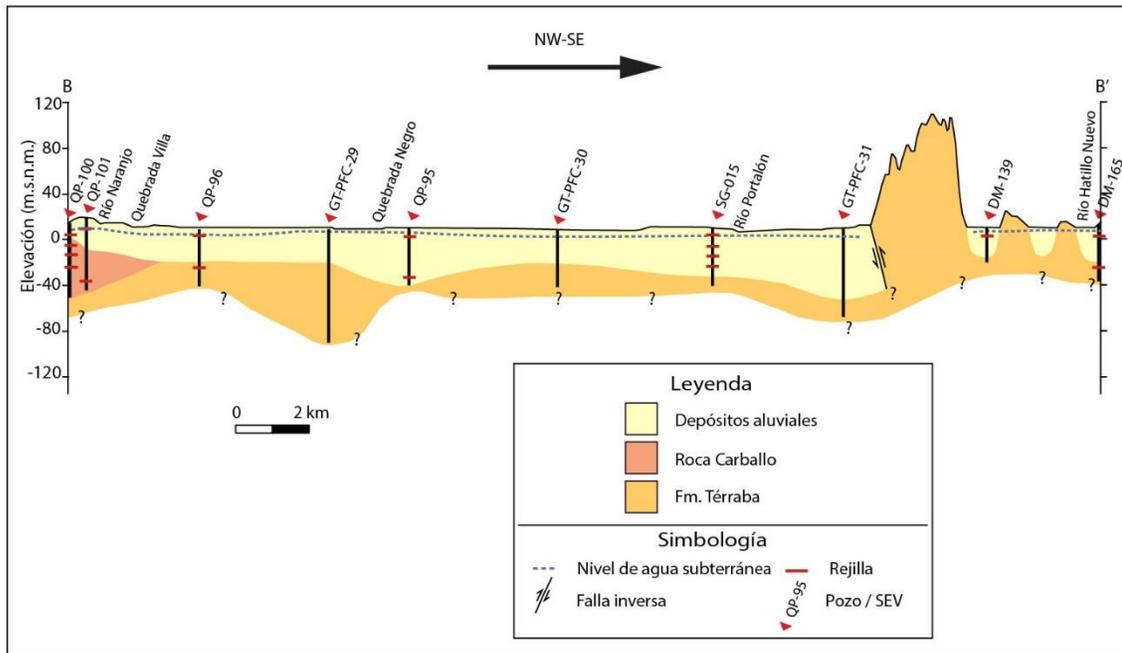


Figura 17. Perfil longitudinal a la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo.

✓ **Sector Dominical-Ballena**

El sector Dominical – Ballena se caracteriza por presentar en toda su extensión un modelo geológico bastante homogéneo. En forma general, hacia los sectores montañosos de la Fila Costeña se presentan rocas asociadas a la Formación Térraba, mientras que en las zonas planas cercanas a la costa se ubican depósitos de tipo aluvial sobreyaciendo a los materiales de la Formación Térraba. También es común, principalmente en los sectores montañosos con pendientes fuertes, la presencia de depósitos coluviales recientes de poca extensión.

La Formación Puerto Nuevo, intruyendo las rocas de la Formación Térraba, ha sido identificada en profundidad en los pozos RE-14 y DM-69, así como en los piezómetros exploratorios COR-50 y COR-49 (Figuras 18 y 19).

Los perfiles A-A´ y B-B´ (Figuras 18 y 19) se localizan en la zona de la cuenca del río Uvita, hacia la parte central de la zona entre Dominical y Ballena, con rumbos aproximados SW y SE respectivamente y en ellos se mantiene la distribución estratigráfica descrita anteriormente. Si bien es cierto, la secuencia estratigráfica de la

Formación Térraba es mucho más espesa, en el sondeo eléctrico GT-PFC-38 (Figura 18 perfil A-A´) se ha determinado un espesor de aproximadamente 119 m. Por su parte, los Depósitos Aluviales pueden presentar espesores variables, con un máximo determinado en el piezómetro COR-47 de 38,15 m.

Tanto en el perfil A-A´ como en el B-B´ se identifica la presencia de varias fallas tectónicas. Las de tipo inverso se correlacionan con el sistema de fallas asociado a la existencia de la falla longitudinal de Costa Rica en este sector, como evidencia de la tectónica compresiva que ha dado origen al levantamiento de la Fila Costeña. Otras fallas, como las observadas hacia el sector central del perfil B-B´, se asocian también a la tectónica regional pero su comportamiento más localizado puede haber contribuido al engrosamiento de los Depósitos Aluviales en estos sectores.

El perfil C-C´ (Figura 19) se localiza hacia la zona de playa Ballena. El espesor de los Depósitos Coluvio-Aluviales, en esta zona, se ha estimado en unos 10 m aproximadamente (12,6 m registrados en el piezómetro COR-50), mientras que el pozo COR-3 registra al menos 70 m de estratificación de lutitas y areniscas grises asociadas a la Formación Térraba. El rasgo estructural más importante en este perfil lo constituye el fallamiento inverso asociado nuevamente al sistema de la Falla Longitudinal.

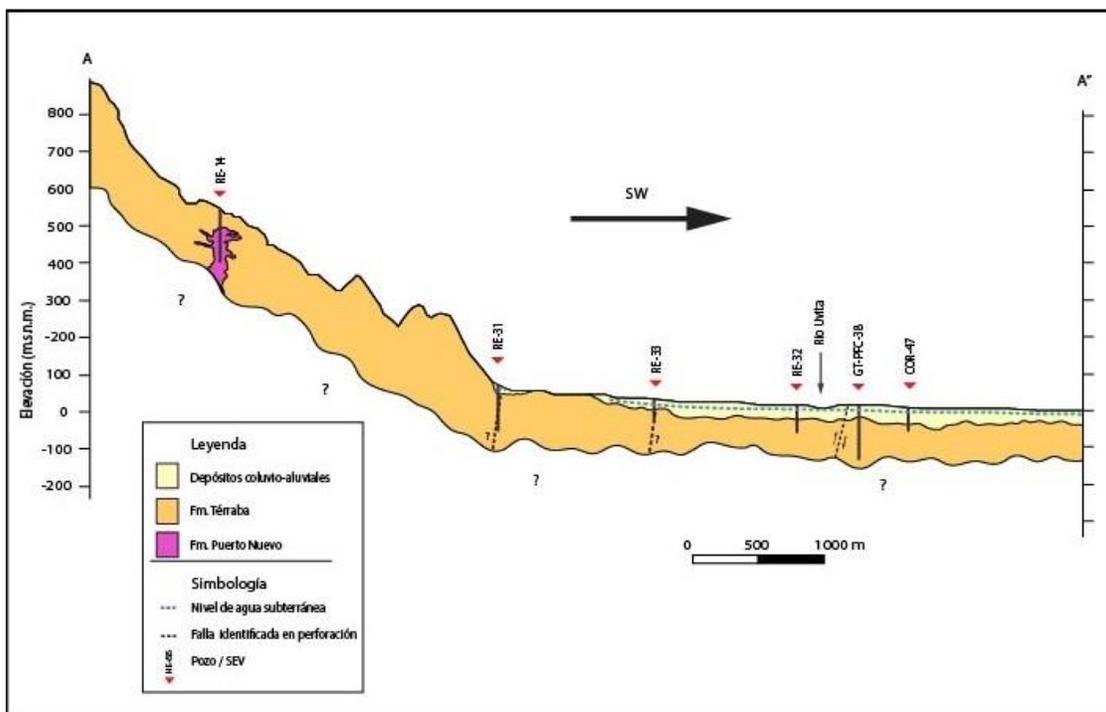


Figura 18. Perfil A-A´ en la cuenca del río Uvita.

El perfil D-D´ (Figura 20) se localiza hacia el extremo SE del área de estudio en las cercanías de Tortuga y Ojochal. Se mantiene el mismo modelo geológico observado en los demás perfiles y se han registrado hasta 150 m de alternancias de lutitas y areniscas asociadas a la Formación Térraba en los sondeos eléctricos GT-PFC-49 y GT-PFC-47.

En el piezómetro COR-49 se ha identificado la presencia de intrusivos gabroicos asociados con la Formación Puerto Nuevo. Por otra parte, también se ha interpretado la presencia de estructuras tectónicas (fallas inversas o de desplazamiento de rumbo), asociadas con el sistema de la Falla Longitudinal de Costa Rica.

Finalmente, hacia la zona de Dominical se ubica el perfil E-E´ (Figura 20), que si bien es cierto a modo general muestra el mismo modelo geológico, tiene la particularidad de que en el pozo DM-69 se registraron más de 60 m de materiales ígneos que se asocian con un cuerpo ígneo de la Formación Puerto Nuevo. Para esta zona el espesor de los depósitos aluviales alcanza hasta 19 m según los registros del pozo DM-1.

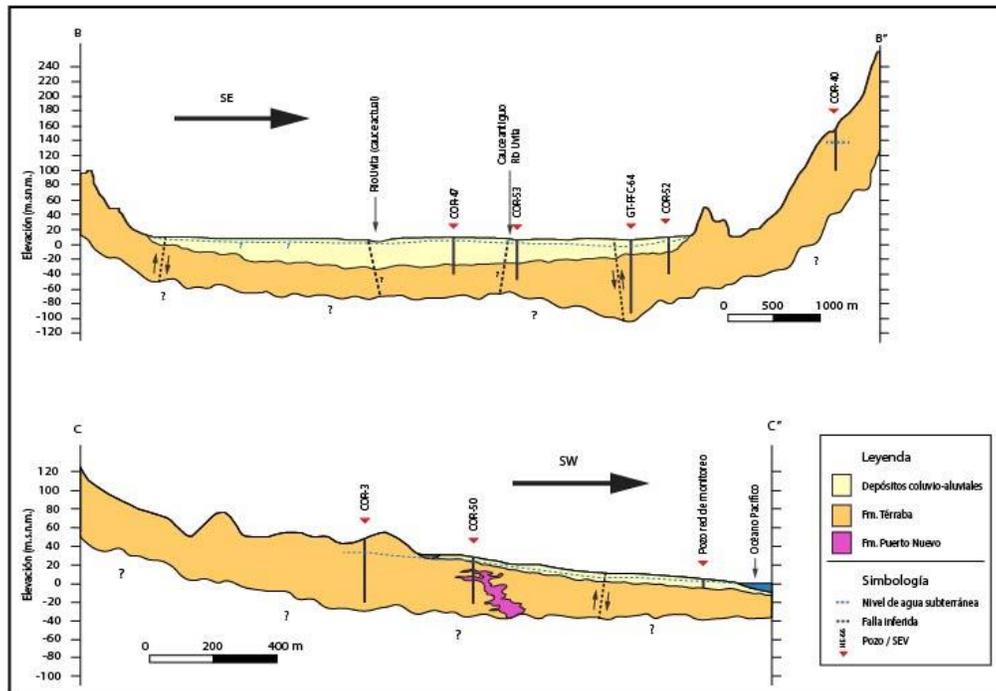


Figura 19. Perfil B-B´ en la cuenca del río Uvita y C-C´ en el sector de playa Ballena.

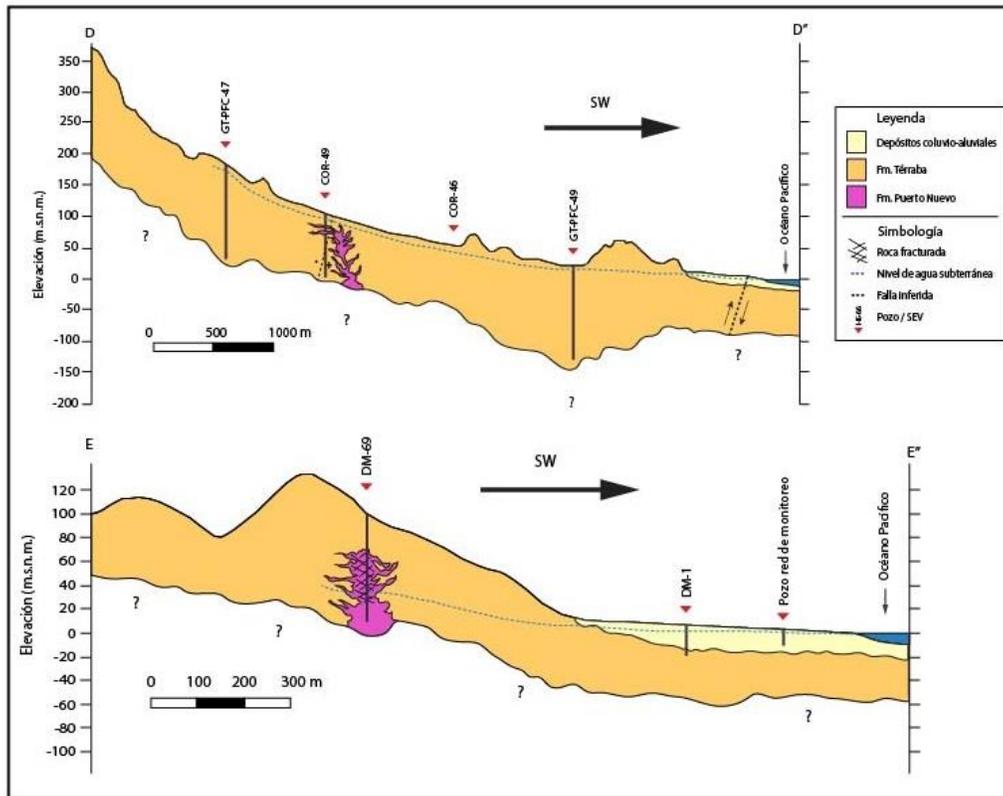


Figura 20. Perfil D-D´ en la zona de Tortuga–Ojochal y perfil E-E´ en el sector de Dominical.

### 2.3.5 Mapeo geológico

Durante los meses de marzo a julio de 2020 se llevó a cabo la verificación en campo de las litologías reportadas en el Mapa de Costa Rica, elaborado por Denyer et al (2007), específicamente para las cuencas que integran el presente estudio. El cartografiado geológico consistió en la descripción de una serie de afloramientos desde Herradura hasta Ballena, para verificar la extensión lateral de las distintas rocas identificadas y los contactos entre unidades (Anexo 4).

La información recolectada, aunada a los registros de los pozos y piezómetros, la geomorfología y otros estudios desarrollados en la zona, fundamentan los cambios que se incorporan en el mapa geológico local para las cuencas del Pacífico Central, el cual se utilizará como base para el modelo hidrogeológico y el balance hídrico de suelos. Los cambios realizados se incorporan en el mapa geológico, el cual se presenta en las figuras 21, 22 y 23, para una mejor visualización del mismo.

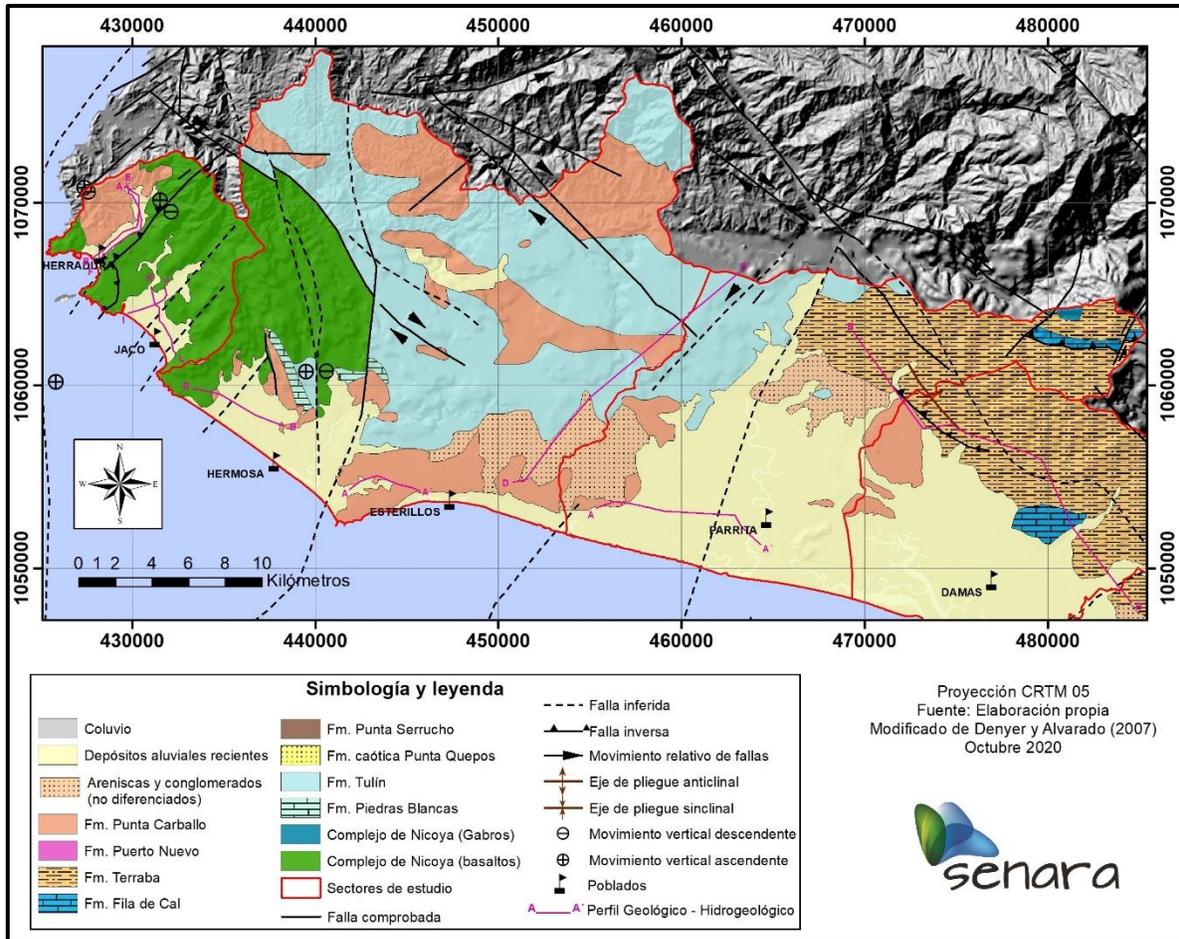


Figura 21. Mapa geológico local sectores de Herradrura, Jacó, Hermosa, Esterillos, Parrita y una porción de Quepos.

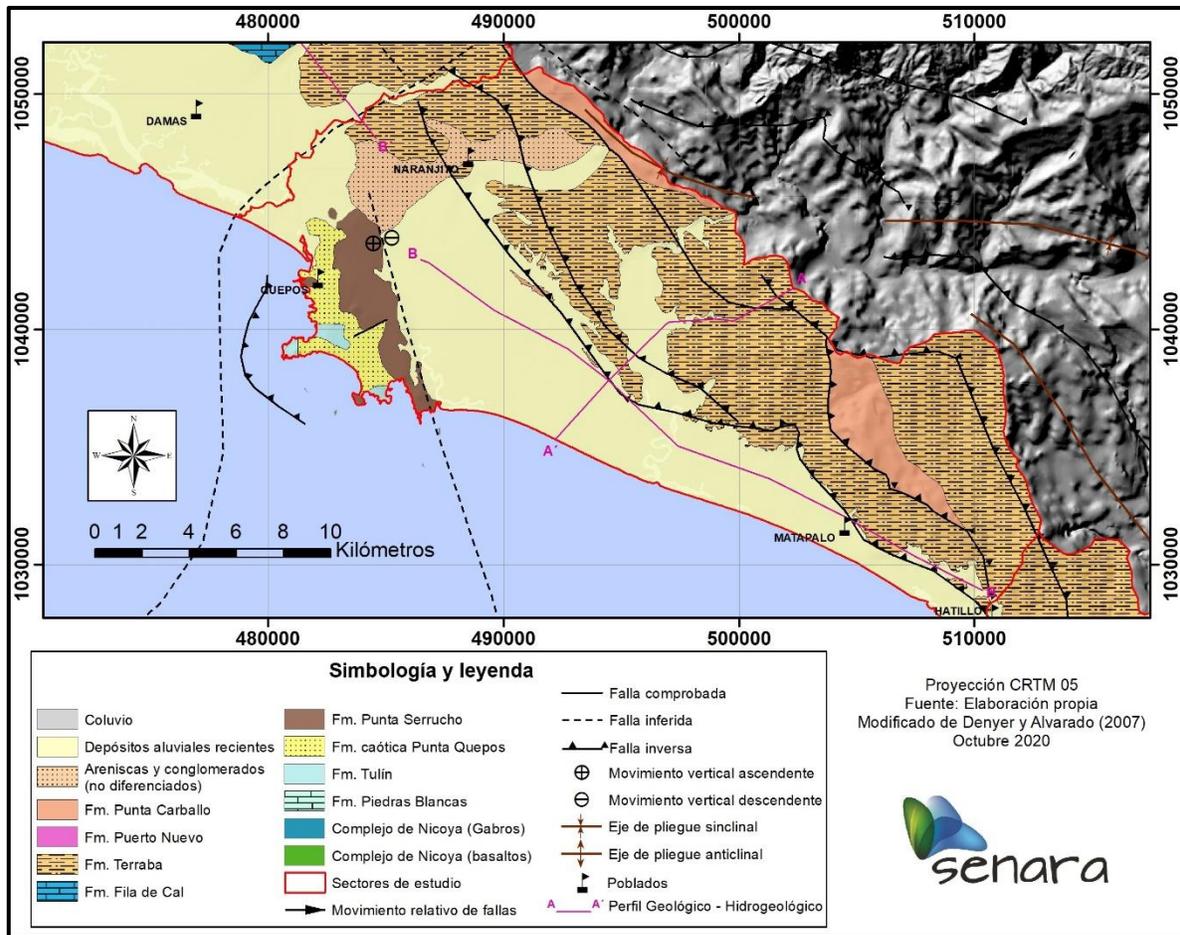


Figura 22. Mapa geológico local sectores de Quepos, Naranjo, Savegre y Matapalo.

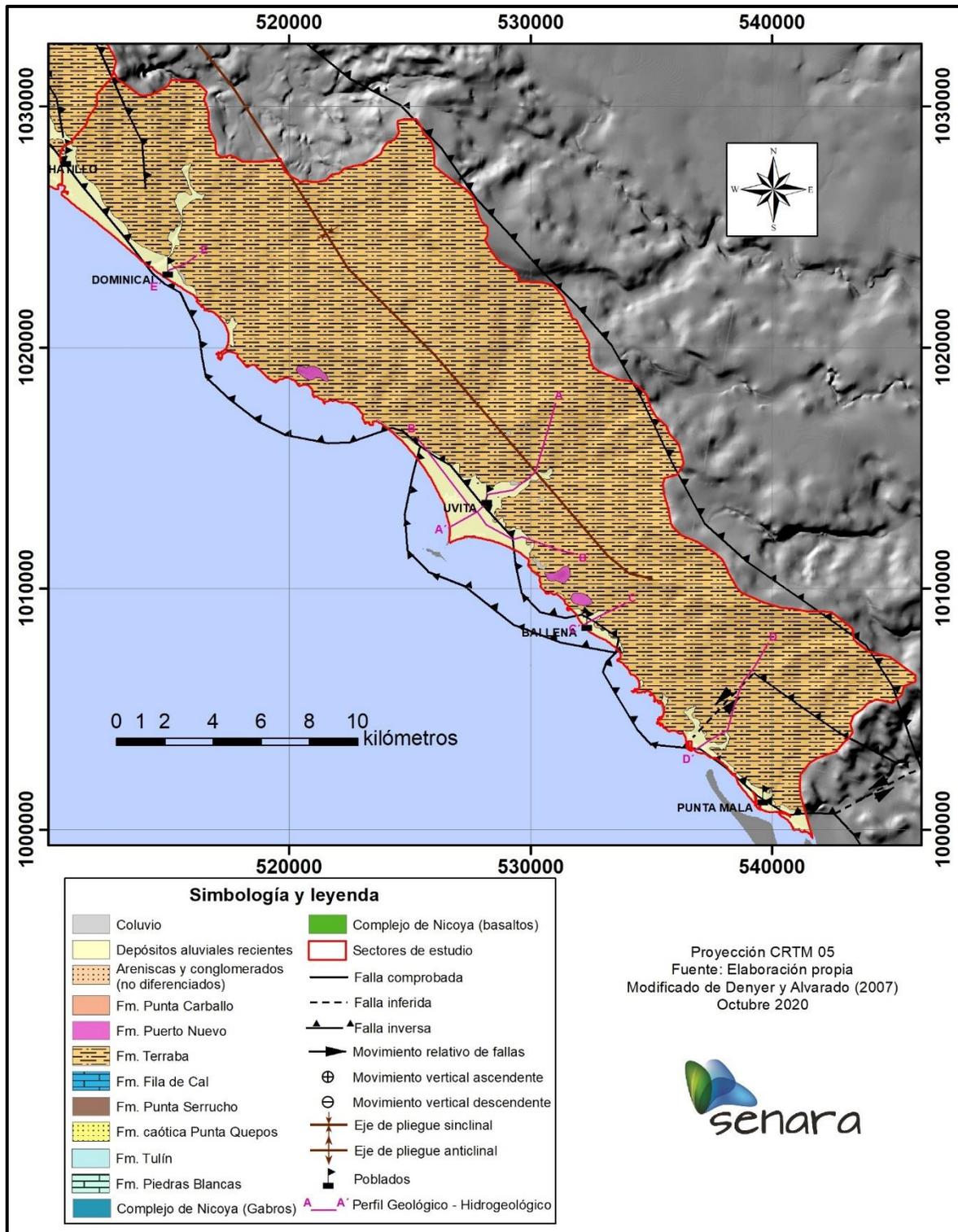


Figura 23. Mapa geológico local sectores de Dominical, Uvita y Ballena.

### 3. HIDROGEOLOGÍA

A partir de la información registrada en la BDS e información de campo, se describen las principales características hidrogeológicas de las rocas presentes en las micro-cuencas que conforman la zona de estudio. Posteriormente, se integran todos los resultados de las pruebas y los análisis realizados junto con la información regional y las bases de datos, se construye el modelo hidrogeológico conceptual del Pacífico Central, Herradura – Jacó, Hermosa – Esterillos, Parrita – Quepos, Naranjo – Matapalo – Savegre - Dominical – Ballena – Uvita y se describe el potencial hídrico de cada zona.

#### 3.1 Sector Herradura-Jacó

##### 3.1.1 Inventario de pozos

Una vez filtrada la base de datos de pozos del SENARA se muestra el uso del agua para los 66 pozos a utilizar en la zona de estudio, como se muestra en la siguiente tabla 6.

Tabla 6. Usos del agua para los pozos registrados en SENARA.

USO	Q (l/s)	Cantidad de pozos
Abastecimiento Público	132,25	8
Abrevadero	1	1
Comercial	3	1
Domestico	61,47	21
Domestico-Riego	39,43	14
Industrial	1,8	1
Otros Usos	11,86	2
Riego	4,7	1
Riego-Domestico-Turismo	16,5	2
Riego-Turismo	4,5	1
Servicios médicos	1	1
Sin dato	11,85	4
Turístico	59	4
Urbanístico	9,66	1
Varios	54,5	4
Total general	412,52	66

Destaca que la mayor cantidad de agua extraída por medio de los pozos perforados es utilizada para abastecimiento público, con un caudal reportado de 132 l/s, esto por medio de la ASADA de Herradura y la ASADA Los Sueños en la zona de Herradura y por parte del AyA en el sector de Jacó. En cuanto a las concesiones se registra un total de 93 expedientes, esto con base en la consulta de la plataforma del SINIGIRH de la Dirección de Agua del MINAE en el mes de setiembre del 2020, sin embargo, tan solo 78 tienen el dato del caudal otorgado o gestionado que suma un total de 210,44 litros por segundo, como se muestra en la siguiente tabla 7.

Tabla 7. Usos del agua en las concesiones registradas en el SINIGIRH.

Tipo uso	Cantidad	Caudal concesionado (L/s)
Turístico	23	43,31
Riego	15	132,09
Industrial	1	0,10
Comercial	1	2,15
Consumo humano	30	29,92
Agropecuario	8	2,87
<b>TOTAL</b>	<b>78</b>	<b>210,44</b>

En la figura 24 se muestra la distribución de los pozos perforados y las concesiones reportadas en la zona de Herradura y Jacó.

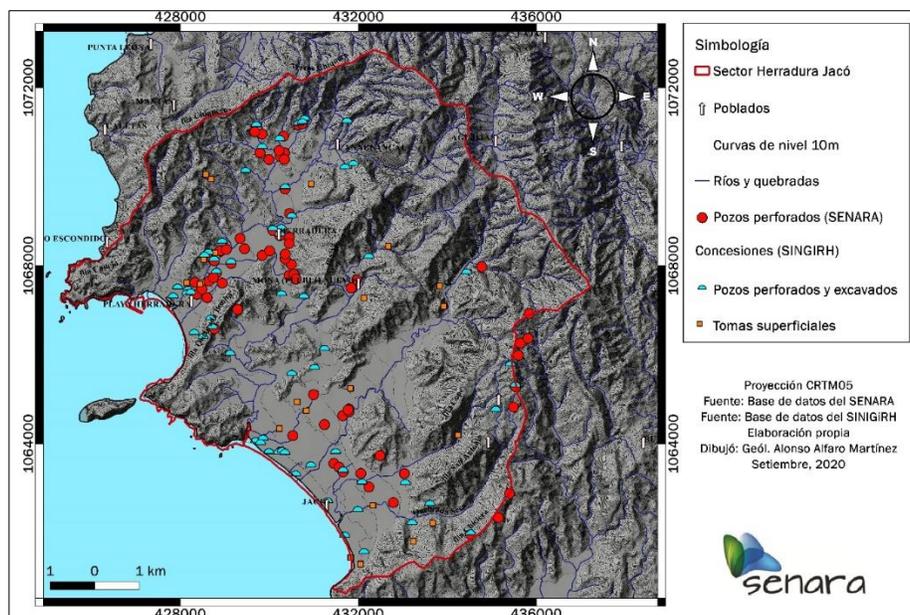


Figura 24. Pozos, manantiales y concesiones registrados en las zonas de Herradura y Jacó.

Destaca la información de la toma superficial del AyA en la quebrada San José de la microcuenca del río Copey al NE de Jacó (Expediente 834 DA) y también las tomas superficiales de la ASADA Herradura en unas quebradas sin nombre en el sector NE de la microcuenca de la quebrada Cañablancal, la información de las fuentes utilizadas por el AyA y ASADA Herradura están en la tabla 8 y la ubicación está en la figura 25.

Tabla 8. Aprovechamientos de los entes operadores de acueductos en el sector de Herradura-Jacó.

Concesionario	Código pozo	Tipo fuente	X	Y	Q (l/s)
ASADA HERRADURA	HE-020	POZO	430082	1068797	9,66
ASADA HERRADURA	HE-045	POZO	430236	1068677	9,50
ASADA HERRADURA	HE-168	POZO	429035	1068028	0,75
ASADA HERRADURA	NA	RIO	432294	1070686	NI
ASADA HERRADURA	NA	RIO	432441	1070714	NI
ASADA HERRADURA	NA	RIO	432720	1070204	NI
AyA	HE-068	POZO	431792	1064722	25,00
AyA	HE-069	POZO	431770	1064762	29,00
AyA	HE-019	POZO	431650	1064631	15,00
AyA	HE-134	POZO	430995	1065104	43,00
AyA	NA	RIO	432734	1068371	3,69
SOCIEDAD DE USUARIOS DE AGUA LOS SUEÑOS	HE-05	POZO	427939	1067476	23,50
SOCIEDAD DE USUARIOS DE AGUA LOS SUEÑOS	HE-22	POZO	437356	1058614	2,42
SOCIEDAD DE USUARIOS DE AGUA LOS SUEÑOS	HE-27	POZO	437201	1058824	3,00
SOCIEDAD DE USUARIOS DE AGUA LOS SUEÑOS	HE-28	POZO	437184	1058811	3,00
SOCIEDAD DE USUARIOS DE AGUA LOS SUEÑOS	HE-35	POZO	427927	1067518	25,00
SOCIEDAD DE USUARIOS DE AGUA LOS SUEÑOS	NA	RIO	428537	1067560	24,00

NA = No aplica; NI = No indica

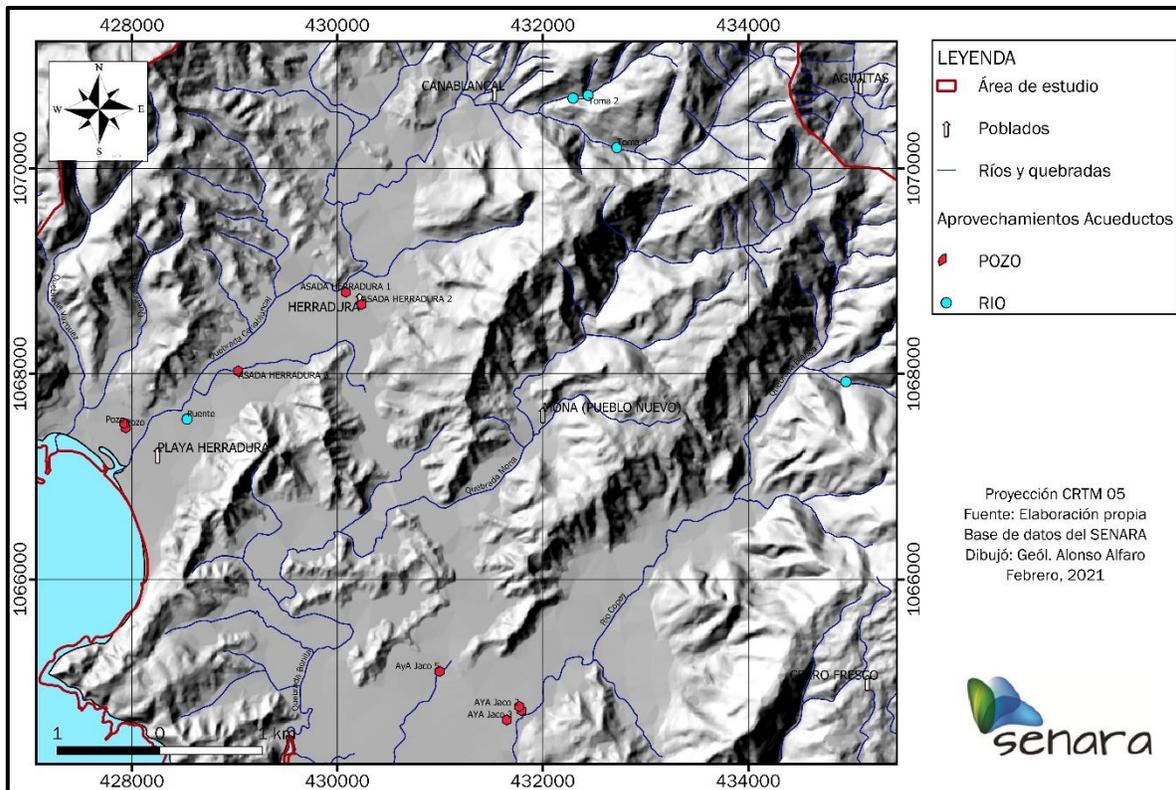


Figura 25. Ubicación de los aprovechamientos de los acueductos, sector Herradura-Jacó.

### 3.1.2 Niveles de agua subterránea y dirección del flujo

En los basaltos del Complejo de Nicoya debido a la heterogeneidad en los patrones de fracturamiento de los basaltos, la variación en los grados de profundidad y meteorización de la roca, la profundidad de los niveles de agua presenta una gran diferencia en función de la altura en donde se ubica el pozo, con valores que oscilan entre los 0 y 160 metros, para un promedio de 35,68 metros bajo el nivel del suelo.

En las areniscas de la Formación Punta Carballo existen reportados en las bases de datos una baja cantidad de pozos perforados y debido a su amplia distribución es difícil definir una dirección de flujo, aunado a que estas rocas están altamente fracturadas por lo que los niveles pueden presentar mucha variación en profundidad de los niveles de agua subterránea, oscilando entre los 0 m para los sectores confinados y los 12,10 m donde el acuífero se comporta como libre o libre cubierto.

Para los aluviones del sector de Herradura la profundidad del agua subterránea oscila entre los 5 y 12 m con el máximo en octubre y el mínimo en el mes de abril, la dirección del flujo del agua subterránea es hacia el sur en el sector al norte de la cuenca

de la quebrada Cañablancal hasta el centro del poblado de Herradura con un gradiente hidráulico de 0,5 en este sector cambia la dirección de flujo hacia el oeste/sur-oeste con un gradiente hidráulico de 0,02 hasta la descarga del agua del acuífero en la zona de playa Herradura.

En el sector de Jacó la profundidad del agua subterránea oscila entre los 4 y los 5 metros con el máximo en el mes de abril y el mínimo en el mes de noviembre. La dirección del flujo del agua subterránea es hacia el sur oeste descargando el agua subterránea en la playa Jacó, con un gradiente hidráulico de 0,01.

### 3.1.3 Aforos diferenciales

Los aforos diferenciales se hicieron durante el mes de mayo del 2020, sobre los cauces de las principales quebradas y ríos utilizando el molinete marca GURLEY, modelo L4040. Se realizó el levantamiento y la medición de 25 puntos para poder determinar la relación de los cauces superficiales con respecto a los acuíferos Herradura y Jacó. Los datos de los puntos de aforo están en la tabla 9, por otra parte la ubicación de los sitios de aforo y el comportamiento de los ríos se muestran en las figuras 26 y 27.

Tabla 9. Sitios de aforo en quebrada Cañablancal y río Copey.

Aforo	X	Y	Q (l/s)	Cauce
AF-02	430654	1069933	18,17	quebrada Cañablancal
AF-03	431157	1070444	26,68	quebrada Cañablancal
AF-04	430973	1070388	13,27	quebrada Cañablancal
AF-05	430789	1070135	20,80	quebrada Cañablancal
AF-06	430212	1069757	1,39	quebrada Cañablancal
AF-14	428560	1067783	17,10	quebrada Cañablancal
AF-15	433880	1066749	77,97	río Copey
AF-16	433199	1066286	53,06	río Copey
AF-17	432933	1065923	3,40	río Copey
AF-20	431952	1064747	13,50	río Copey
AF-21	431691	1064185	218,90	río Copey cerca del puente de la costanera

Fuente: Elaboración propia, con base en el trabajo de campo 2020.

En la quebrada Cañablancal se tiene un sector de influencia y efluencia en la parte media- alta de la cuenca, específicamente entre los 60,00 y 40,00 m de elevación sobre el nivel del mar y por un tramo de 1,30 km; en el punto con las coordenadas 430205E/ 1069747N (Figura 26) la quebrada pierde por completo el flujo superficial.

Esta quebrada se mantiene sin agua hasta la coordenada 428727E/1068096N, en donde inicia el flujo de agua por el comportamiento efluente del acuífero hasta la desembocadura en el sector de la playa Herradura.

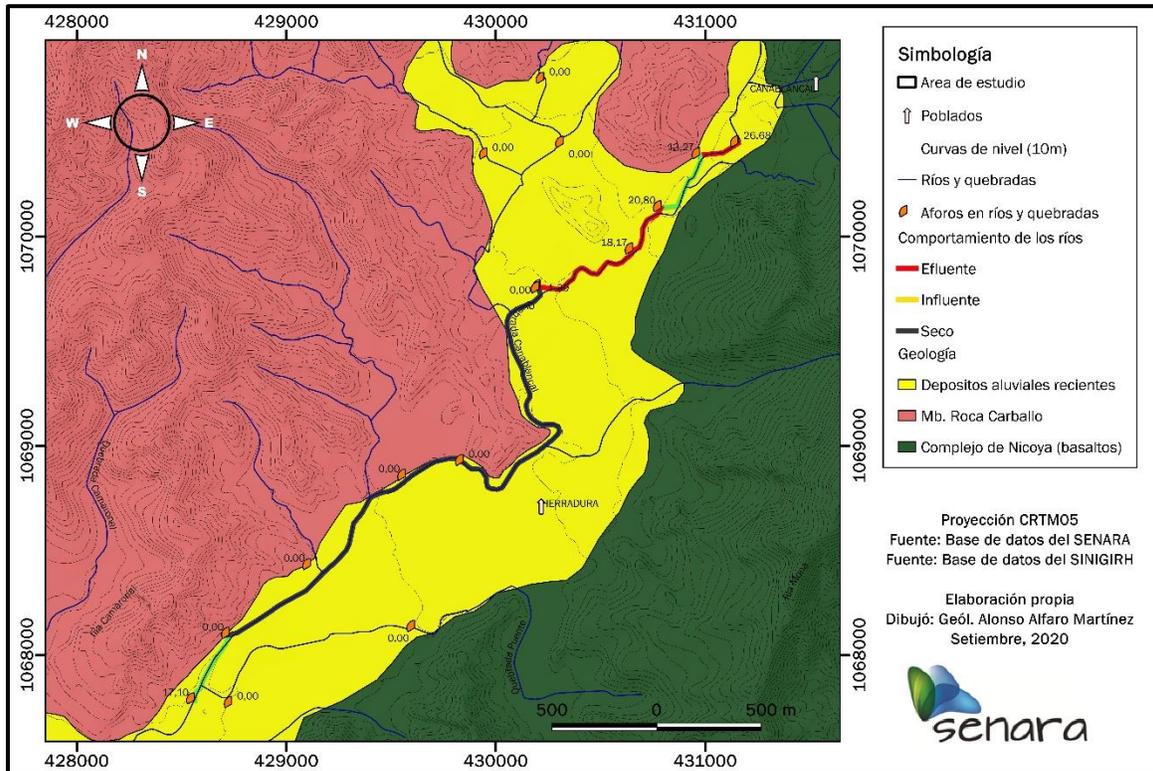


Figura 26. Ubicación de afloramientos en la microcuenca Cañablancal y comportamiento de efluencia - influencia.

El río Copey, en el sector Este de Jacó, presenta un tramo de influencia de aproximadamente 2,0 km en los depósitos aluviales de la zona nor-este de Jacó, desde la coordenada 433880E/1066755N hasta el sitio con coordenada 432654E/1065573N, donde el río pierde por completo su caudal (Figura 27). En la coordenada 432012E/1064822N, el río Copey inicia su comportamiento efluente hasta la desembocadura en playa Jacó, a partir de este punto inicia la zona urbana de Jacó, así como la descarga de aguas residuales en el cauce.

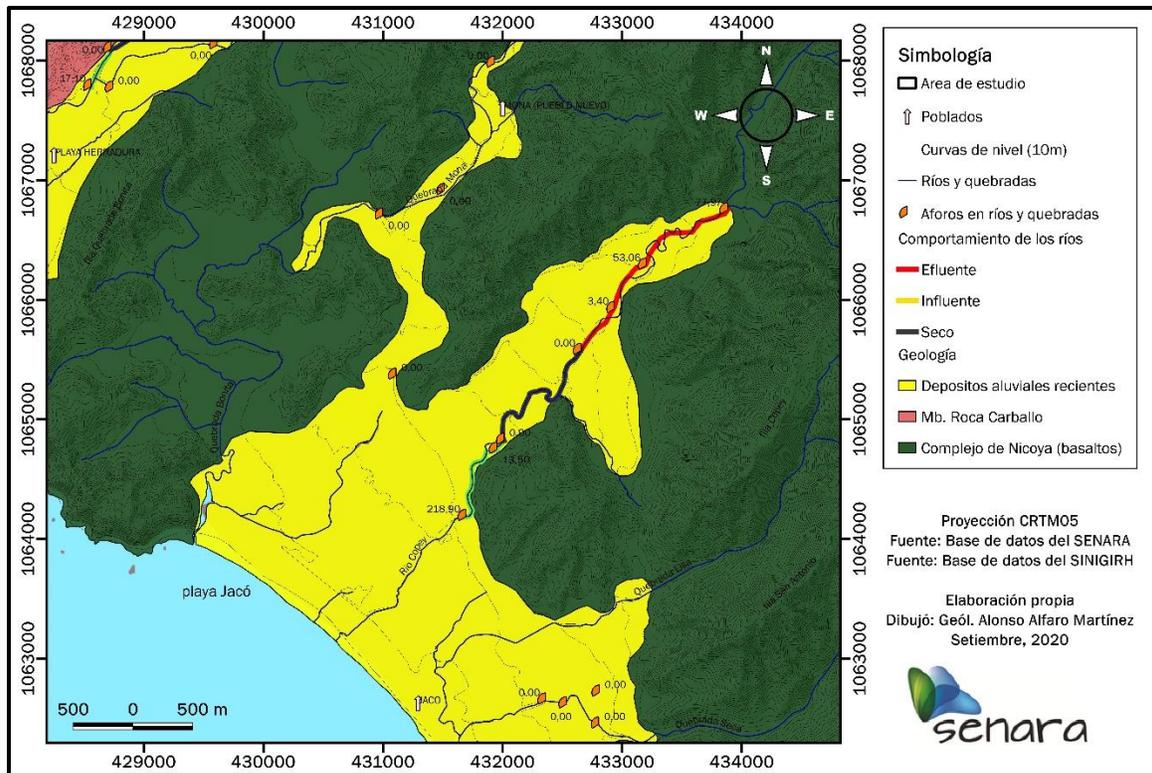


Figura 27. Ubicación de aforos en las microcuencas Doña María y Naranjal, comportamiento de efluencia – influencia.

### 3.1.4 Modelo hidrogeológico conceptual

Para el sector de Herradura y Jacó se definen las siguientes Unidades Hidrogeológicas.

✓ **Unidad hidrogeológica de muy bajo potencial en areniscas (Fm. Punta Carballo)**

La parte superior de estas rocas sedimentarias está conformada por un suelo que tiene espesores que varían entre los 0,30 y 0,75 m con una textura muy variada entre gravas mal graduadas con limos hasta limos de alta y baja plasticidad, con base en siete pruebas de permeabilidad se tiene un promedio de una tasa de infiltración de 0,67 m/día ( $7,75 \times 10^{-06}$  m/s), el valor de porosidad se recopiló de la información de diez ensayos de suelo en donde se obtuvo una porosidad promedio de 46,41% y la densidad aparente es 1,40 g/cm<sup>3</sup> (Anexo 5). En estas rocas se han perforado pocos pozos, de acuerdo con cinco informes finales de perforación de los pozos HE-023, TS-107 TS-143 TS-166 y el TS-158 se define que la zona no saturada está compuesta por areniscas meteorizadas y fracturadas que pueden llegar a tener un espesor de 8 a 10 m, los pozos

que se perforan en esta formación geológica tienen profundidades mayores a los 60 m, debido a que topográficamente se sitúan en los cerros y por lo tanto se busca una buena penetración en la formación geológica para captar con la rejilla un buen trecho de la zona saturada, sin embargo los caudales reportados de extracción son bajos, entre 2,6 a 4,0 l/s.

En la zona de estudio se realizó un sondeo eléctrico vertical (GT-PFC-15, Anexo 3) en donde se definen tres capas para las rocas de la Formación Punta Carballo, una arenisca fracturada de 5 a 75 m de profundidad con una resistividad de  $50\Omega\text{-m}$ , una capa de lutitas de 75 a 140 con un valor de  $12\Omega\text{-m}$  y una capa de areniscas de 140 a 150 m con un valor de resistividad de  $81\Omega\text{-m}$ . El pozo TS-166 que se localiza a una altura de 70 m.s.n.m, tiene un profundidad de 100 metros y se realizaron ensayos de geofísica de pozos, las rocas se dividieron en 4 capas, la capa 1 con valores de resistividad promedio de  $490\Omega\text{-m}$ , la capa 2 con valores promedio de  $50\Omega\text{-m}$ , la capa 3 con valores promedio de  $180\Omega\text{-m}$  y la capa 4 con resistividades promedio de  $40\Omega\text{-m}$ , todas ellas dentro de la misma litología correspondiente con areniscas finas con lentes de areniscas gruesas.

Analizando las pruebas de bombeo de los pozos (TS-115 y TS-113) en estas rocas se ha determinado una conductividad hidráulica muy baja debido a una baja porosidad secundaria por fracturamiento y se le asigna a este acuífero una conductividad hidráulica (k) de 2,49 m/día ( $2,88 \times 10^{-5}$  m/s), por lo que con el espesor promedio captado de 48,67 m se tiene una transmisividad (T) baja de 71,80  $\text{m}^2/\text{día}$  ( $8,30 \times 10^{-4}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ). De acuerdo con los rangos que establece Freeze y Cherry (1979) se la asigna a este acuífero una porosidad de un 10% y un coeficiente de almacenamiento (S) de  $1 \times 10^{-4}$  el cual es un valor para un acuífero confinado.

Debido a la baja cantidad de pozos perforados y su distribución es difícil definir una dirección de flujo, aunado a que estas rocas están altamente fracturadas por lo que los niveles del agua subterránea pueden presentar mucha variación en profundidad, se reportan valores entre los 0 m para los sectores confinados (pozo TS-163) y los 12,10 m (pozo TS-107)., dependiendo del sector y la altura del terreno se puede comportar como un acuífero libre cubierto o un acuífero confinado.

✓ **Unidad hidrogeológica de bajo potencial en basaltos (Complejo de Nicoya)**

Los basaltos del Complejo de Nicoya en superficie tienen un perfil de meteorización y arcillitización variable de unos 5 a 8 m, los suelos en la parte superior de estas rocas están tienen espesores de suelo que oscilan entre los 0,3 a 1 m. Están conformados por texturas variadas desde gravas limosas hasta limos de alta plasticidad, lo cual crea una alta variabilidad en las tasas de infiltración con valores de 0,72 a 11,65 m/día, con base en ocho muestras de suelo la porosidad promedio es de 38,17% y la densidad aparente es 1,43 g/cm<sup>3</sup> (Anexo 5). Analizando los afloramientos, estas rocas están muy fracturadas, sin embargo se estima que tienen una baja permeabilidad aparente ya que las fracturas están cerradas, de acuerdo con los datos de los sondeos eléctricos verticales (Anexo 3), se define que, los basaltos del Complejo de Nicoya fracturados y meteorizados, tienen un valor de 214  $\Omega$ -m y las capas de basaltos sanos tienen una resistividad promedio de 1668  $\Omega$ -m.

Los pozos que se han perforado en esta litología tienen una profundidad promedio de 82 m con un espesor captado o saturado de unos 32 m para la cual se reporta una resistividad de unos 86  $\Omega$ -m (GT-PFC-14, Anexo 3), debido a la heterogeneidad en los patrones de fracturamiento de los basaltos y la variación en los grados de profundidad y meteorización, la profundidad de los niveles de agua subterránea muestran una gran diferencia en función de la altura en donde se ubica el pozo, con valores que oscilan entre los 0 y 160 m, para un promedio de 35,68 m bajo el nivel del suelo, lo que indica que se podrían estar captando diferentes zonas saturadas en función del sector en donde se localiza el pozo y el nivel de fracturamiento captado, sin embargo es muy difícil establecer líneas equipotenciales de la altura de la carga hidráulica, esto aunado a la baja densidad de pozos perforados reportados en las bases de datos institucionales.

Algunos pozos como el HE-117 y el HE-176 muestran confinamiento por lo que inclusive se reportan niveles piezométricos a nivel de la superficie del terreno; de acuerdo al análisis de las pruebas de bombeo de los pozos HE-51, HE-67, HE-117, HE-123, HE-125, HE-140 y HE-150 se ha determinado una conductividad hidráulica muy baja debido a que la baja porosidad secundaria por fracturamiento se encuentra rellena por minerales y arcillas producto de la alteración hidrotermal y la meteorización a niveles más superficiales, por lo que se le asigna a este acuífero una conductividad hidráulica

(k) de 1,34 m/día ( $1,55 \times 10^{-5}$  m/s) que se clasifica como mala; por lo que con el espesor promedio captado de 32 m se tiene una transmisividad (T) baja de 42,37 m<sup>2</sup>/día ( $4,90 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s). De acuerdo con los rangos que establece Freeze y Cherry (1979) se la asigna a este acuífero una porosidad de un 10% y un coeficiente de almacenamiento (S) de  $1 \cdot 10^{-4}$  para un acuífero confinado.

Se define que en profundidad, luego de la zona meteorizada y altamente fracturada, estas rocas conforman un basamento hidrogeológico, lo que provoca que exista un flujo sub-superficial en las partes superiores meteorizadas y fracturadas que le brindan un aporte lateral a los depósitos cuaternarios aluviales, especialmente en las zonas del pie de monte con el cambio de pendiente del terreno hacia las llanuras aluviales. Dependiendo del sector y las propiedades hidráulicas locales, los acuíferos fracturados se comportan libres y confinados en los basaltos del Complejo de Nicoya como se muestra en la figura 28.

#### ✓ **Acuífero Herradura**

Para los depósitos fluviales de las gravas y arenas de varias granulometrías que han rellenado las partes bajas y planas de la microcuenca de la quebrada Cañablancal, se ha definido el Acuífero Herradura que cubre un área de unos 10km<sup>2</sup>, desde la parte plana en la playa hasta los sectores del poblado de Cañablancal a una elevación de 60 a 70 m sobre el nivel del mar (Figura 28). Los suelos en la parte superior de estos depósitos aluviales tienen espesores que oscilan entre los 0,30 a 0,60 m, están conformados por arenas arcillosas y limos de alta plasticidad, la tasa de infiltración promedio es de 0,45 m/día ( $5,15 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s), con base en dos muestras de suelo la porosidad promedio es de 28,12% y la densidad aparente es 1,58g/cm<sup>3</sup> (Anexo 5).

Subyaciendo a la capa de suelos, en algunos sectores se tiene la presencia de capas de arcillas con un espesor que varía entre los 6,00 a 8,00 m para un promedio de 7,00 m como se muestra en los perfiles hidrogeológicos de las figuras 29 y 30. Sin embargo, esta capa de arcillas superiores no está distribuida de manera uniforme en todo el acuífero, inclusive en algunos sectores no está presente a nivel superficial. Está compuesta por arcillas gris a verde oscuro, en general de alta plasticidad, en las perforaciones realizadas en la zona de Herradura, y cumple un rol sumamente importante como cobertura de protección de potenciales contaminaciones hacia las

zonas de granulometrías más gruesas y permeables, subyacentes en los aluviones. En el sector sur-oeste, entre la carretera costanera y la playa Herradura, esta capa le origina un semi-confinamiento a las arenas y gravas inferiores que conforman el acuífero Herradura.

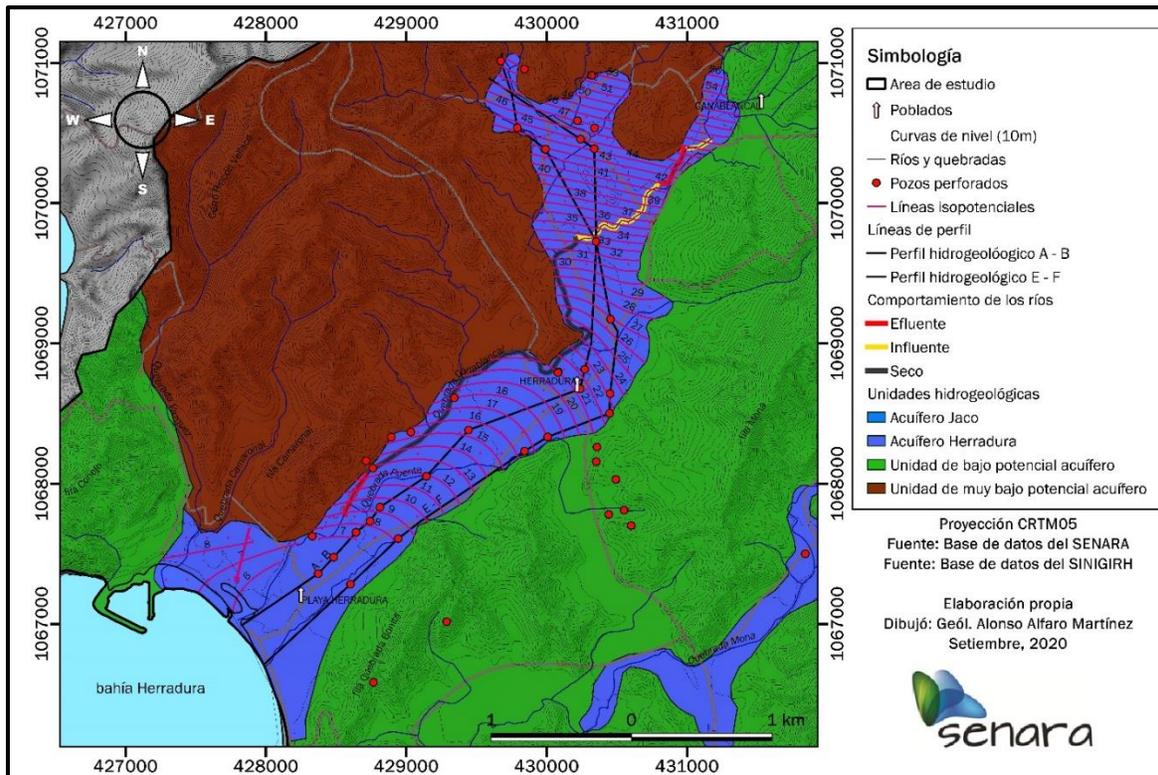


Figura 28. Mapa hidrogeológico local, sector de Herradura.

La zona saturada del acuífero está compuesta por intercalaciones de gravas gruesas a finas y arenas gruesas a finas de origen coluvio-aluvial, los cuales fueron depositados por la dinámica fluvial en la subcuenca de la quebrada Cañablancal en la zona de Herradura. También estos depósitos tienen intercalaciones de lentes de arcillas con arenas y arcillas con clastos de tamaño de gravas con un espesor que oscila entre los 8,56 a 53,00 m para un promedio de 30,78 m como se observa en el perfil hidrogeológico A-B y el E-F (Figuras 29 y 30).

De acuerdo con los datos del sondeo eléctrico vertical GT-PFC-14 se tiene una capa de gravas drenadas de 1 a 10 m con un valor de 304Ω-m, de 10 a 25 m una capa de arenas saturadas con un valor de 12 Ω-m el cual se debe a la saturación de los materiales, de 25 a 55 m la capa de basaltos alterados con un valor de 270 Ω-m, de 55

a 140 m se tiene una capa de basaltos fracturados saturados con un valor de  $86 \Omega\text{-m}$  y de 140 a 150 m están los basaltos sanos con una resistividad de  $1647 \Omega\text{-m}$ , el cual se puede considerar como el basamento hidrogeológico a nivel local.

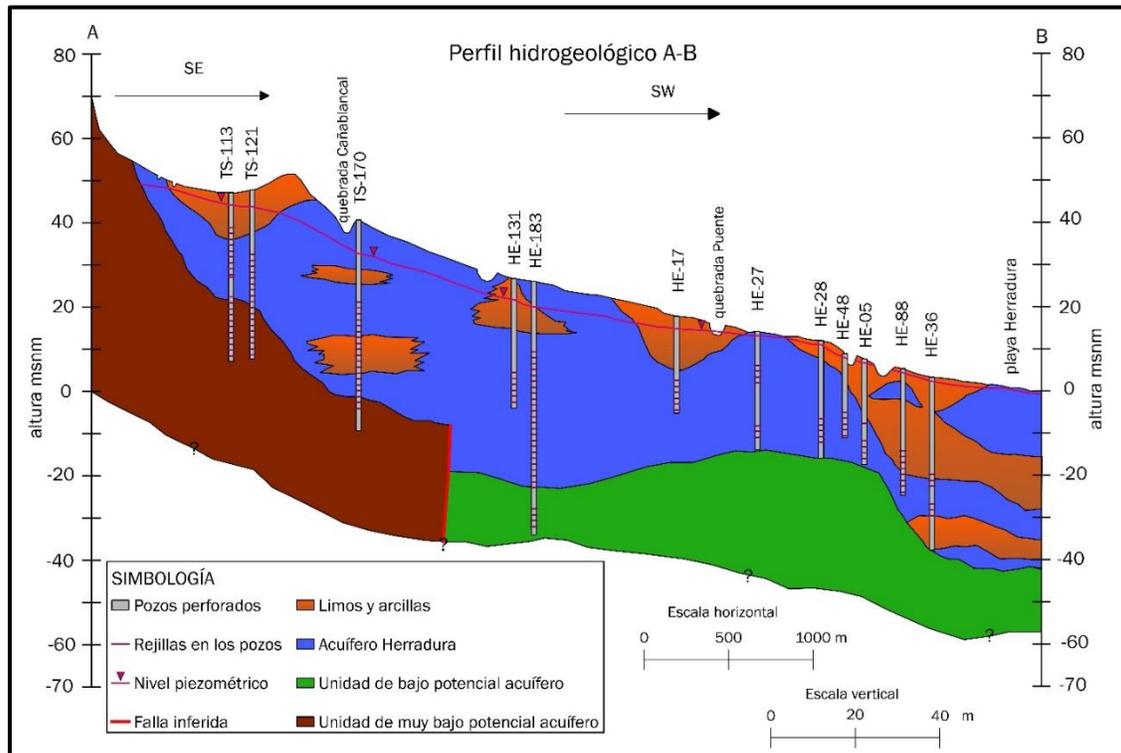


Figura 29. Perfil Hidrogeológico A-B.

El espesor saturado para estos materiales con agua subterránea se estima en unos 17 a 19 m en promedio (Figuras 29 y 30), de acuerdo con el análisis de las pruebas de bombeo de los pozos y pruebas de permeabilidad realizadas en piezómetros de investigación, se le asigna a esta acuífero una conductividad hidráulica promedio ( $k$ ) de  $50,23 \text{ m/día}$  ( $5,81 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ) que se clasifica como buena; por lo que con el espesor promedio de  $30,78 \text{ m}$  se tiene una transmisividad ( $T$ ) alta de  $1546,08 \text{ m}^2/\text{día}$  ( $1,79 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ). De acuerdo con los rangos que establece Freeze y Cherry (1979), se la asigna a este acuífero una porosidad de un 25%, un rendimiento específico ( $S_y$ ) de 0,13 que corresponde con el valor medio entre arenas finas y arenas medias según Johnson (1969) y con base en las pruebas de bombeo de los pozos HE-27 y HE-28 se tiene un coeficiente de almacenamiento ( $S$ )  $1 \times 10^{-2}$  que corresponde a un acuífero libre. Sin

embargo, existe la posibilidad que algunos sectores cercanos a la playa se comporten como confinados.

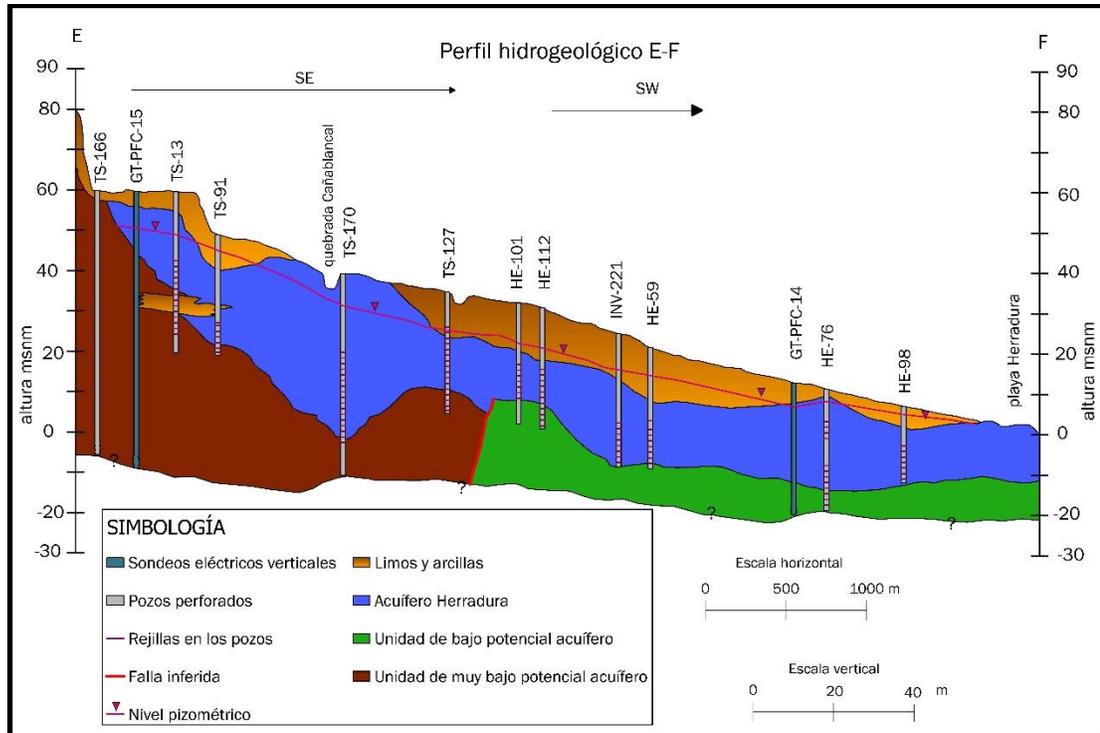


Figura 30. Perfil Hidrogeológico E-F.

Con base en las mediciones de la red de monitoreo de pozos perforados, la profundidad del agua subterránea oscila entre los 5 y 12 m, con el máximo en octubre y el mínimo en el mes de abril, la dirección del flujo del agua subterránea es hacia el sur en el sector al norte de la cuenca de la quebrada Cañablancal hasta el centro del poblado de Herradura con un gradiente hidráulico de 0,5 (Figura 28) en el sector SW del acuífero cambia la dirección de flujo hacia el oeste/sur-oeste con un gradiente hidráulico de 0,7 hasta la descarga del acuífero en la zona de la playa Herradura (Figura 28).

En la época seca, la quebrada Cañablancal juega un rol fundamental con el comportamiento de influencia que tienen unos sectores en el tramo entre las coordenadas (430200-1069740 y 431165-1070445), que aportan unos 80 l/s que son producto del flujo base, principalmente de los basaltos del Complejo de Nicoya y en algún grado las areniscas de la Formación Punta Carballo.

Las gravas y arenas de los depósitos cuaternarios aluviales que conforman el acuífero Herradura se clasifican como un acuífero poroso libre, con pozos que tienen un

caudal promedio de extracción de 6,92 l/s. Este acuífero tiene una gran importancia en la economía local del sector de Herradura y de playa Herradura, ya que parte de la extracción y distribución de agua, para consumo humano, en la zona de Herradura se hace por medio de pozos perforados de la ASADA Herradura y la ASADA Los Sueños.

#### ✓ *Acuífero Jacó*

Para los depósitos cuaternarios de origen fluvial en la zona de Jacó se ha definido el acuífero Jacó que cubre un área de 10km<sup>2</sup>, desde la parte plana en la playa hasta los sectores del poblado de la Mona y la confluencia de la quebrada Blanca con el río Copey a una elevación de 60 m sobre el nivel del mar en ambos lugares (Figura 31). Los suelos en la parte superior de estos depósitos aluviales tienen espesores de suelo que oscilan entre los 0,30 a 0,60 m y están conformados por arenas arcillosas y limos de alta plasticidad, la tasa de infiltración promedio es de 1,80 m/día ( $2,08 \times 10^{-5}$  m/s), con base en cuatro muestras de suelo la porosidad promedio es de 32,47% y la densidad aparente es 1,76 g/cm<sup>3</sup> (Tabla 5).

Luego de la capa de suelo en la parte superior tiene unas arcillas y limos con un espesor promedio de 4 a 6 m, está compuestas por sedimentos finos (arcillas y limos) de color gris a verde oscuro y en general son reportadas como de alta plasticidad en las perforaciones realizadas en la zona de Jacó. El acuífero está conformado por capas de origen fluvial de gravas gruesas a finas y arenas gruesas a finas con intercalaciones de lentes de limos y arcillas de origen principalmente aluvial; estos sedimentos fueron depositados por la dinámica fluvial en las partes bajas de las microcuencas de las quebradas Doña María, Bonita y el río Naranjal, en el sector de la llanura aluvial de Jacó.

Arias y Morera (2000), con base en siete sondeos eléctricos verticales (SEV01 al SEV07, Anexo 3), definen para la zona de Jacó que en el panel de correlación se observan tres anomalías de resistividad menores a los 15Ω-m, mismas que se han asociado con lentes arenosos saturados y que podrían corresponder con las mejores capas acuíferas. En los sondeos GT-PFC-12 y GT-PFC-13 (Anexo 3), las capas de los aluviones tienen resistividades con valores de 1594Ω-m para unas gravas arenosas y 73Ω-m para unas arenas y gravas saturadas respectivamente, de esta manera tenemos que para el acuífero Jacó las resistividades se consideran bajas debido a lo variable de las granulometrías y a la saturación con agua subterránea.

Se ha determinado un espesor para las capas de arenas y gravas de los depósitos aluviales que oscila entre los 23,00 a 25,25 m y un espesor saturado con agua subterránea de unos 18,00 a 20,00 m en promedio, la profundidad del agua subterránea oscila entre los 4 y los 5 m con el máximo en el mes de abril y el mínimo en el mes de noviembre y la dirección del flujo del agua subterránea es hacia el SW con un gradiente hidráulico de 0,01 hacia la playa de Jacó según se observa en los perfiles hidrogeológicos I-J y O-P (Figuras 32 y 33).

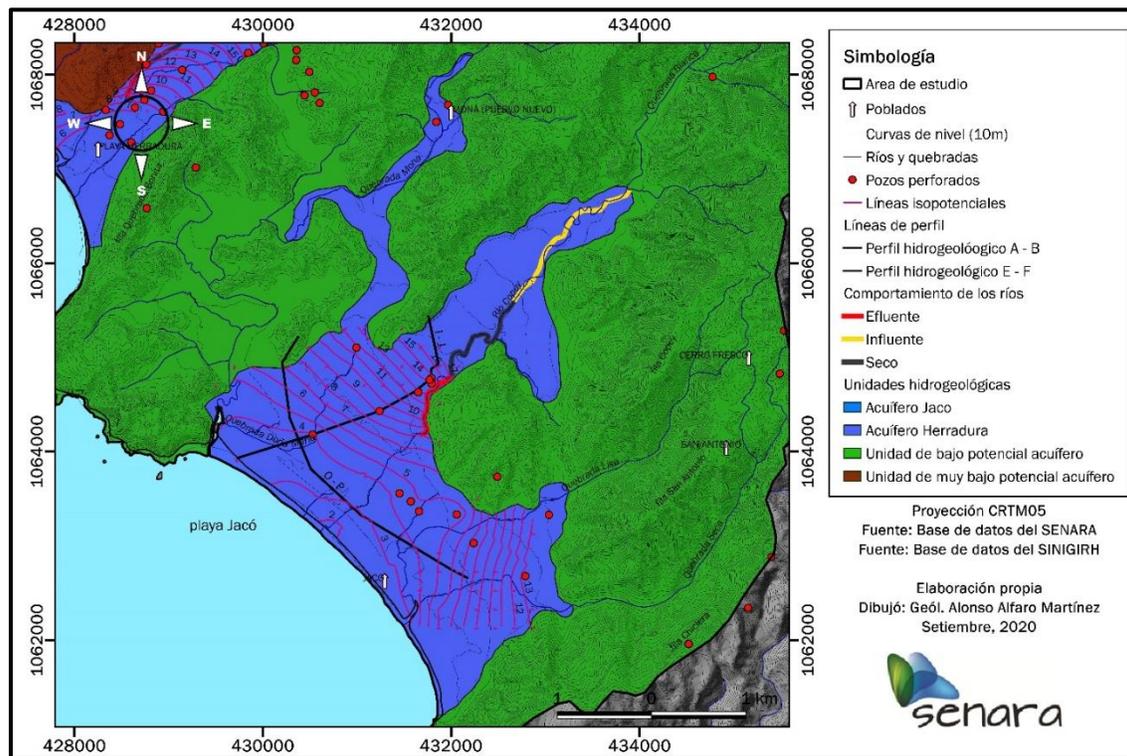


Figura 31. Mapa Hidrogeológico local del sector de Jacó.

De acuerdo con el análisis de las pruebas de bombeo de los pozos (HE-16, HE-106, HE-68, HE-69 y el pozo HE-134) en la zona de Jacó se tiene una transmisividad promedio de  $1588,40 \text{ m}^2/\text{día}$  ( $5,04 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ), una conductividad hidráulica promedio de  $79,42 \text{ m/día}$  ( $9,19 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ) con base en el espesor saturado promedio de 20 m. A partir de las observaciones de campo de las arenas y gravas, a este acuífero se la asigna una porosidad de un 25%, un rendimiento específico ( $S_y$ ) de 0,13 (Johnson, 1969) y un coeficiente de almacenamiento de un acuífero confinado ( $S$ ) de  $1 \times 10^{-4}$ .

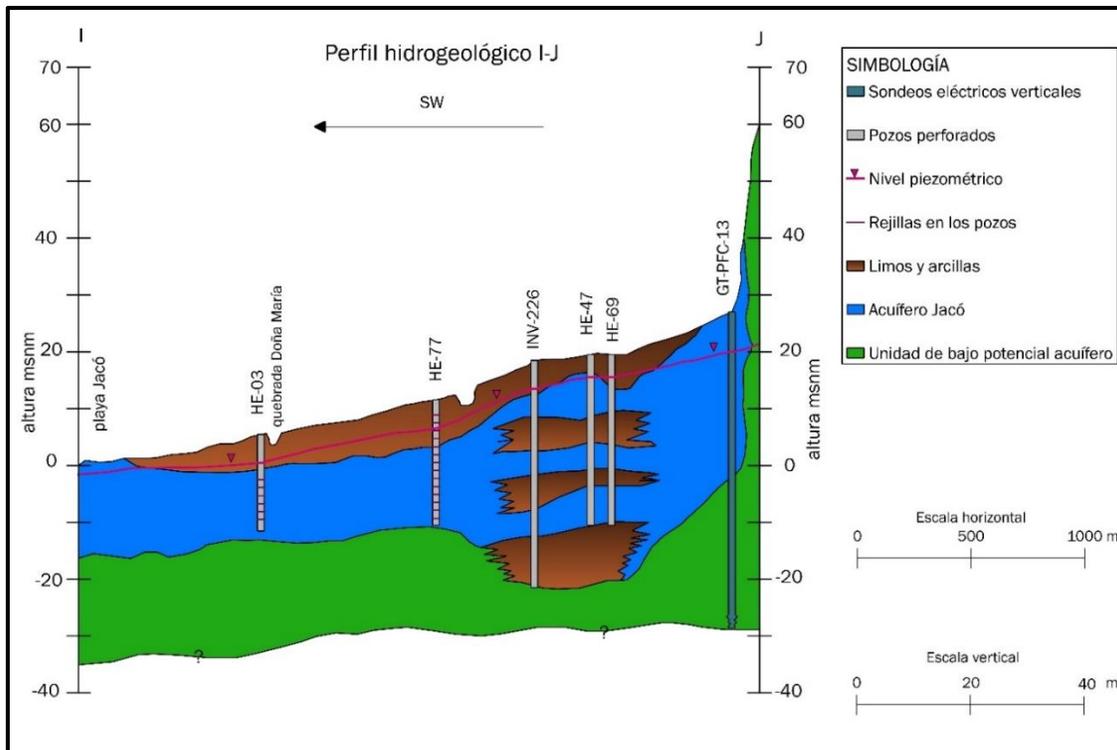


Figura 32. Perfil Hidrogeológico I-J.

Para este acuífero es muy importante el aporte del flujo de la quebrada Doña María y el río Copey, el cual brinda el principal aporte en la zona de la subcuenca del río Naranjal, ambos cursos superficiales recolectan mucha escorrentía y flujo base de los cerros al nor-este y nor-oeste del sector de Jacó. En la época seca el río Copey juega un rol fundamental debido al comportamiento efluente de algunos sectores que se determinaron a través de los aforos diferenciales en un tramo de aproximadamente 2 km sobre los depósitos aluviales en la zona NE de Jacó desde las coordenadas 433880E/1066755N hasta el sitio con la coordenada 432654E/1065573N el río pierde por completo su caudal (Figura 31).

El río Copey a partir de la coordenada 432012E/1064822N inicia la efluencia hasta la desembocadura en playa Jacó, así mismo también se tiene que a partir de este sector empieza la zona urbana de Jacó y la descarga de aguas residuales en el cauce (Figura 31). El proceso de descarga natural es en el océano pacífico en toda la zona de la playa de Jacó, así como también artificialmente por medio de pozos perforados con un caudal aproximado de 94,65 litros por segundo ( $0,95 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Las gravas y arenas provenientes de los Depósitos Cuaternarios Aluviales, conforman un acuífero poroso confinado, esto se refleja en los pozos que tienen un caudal promedio de extracción de 40 l/s.

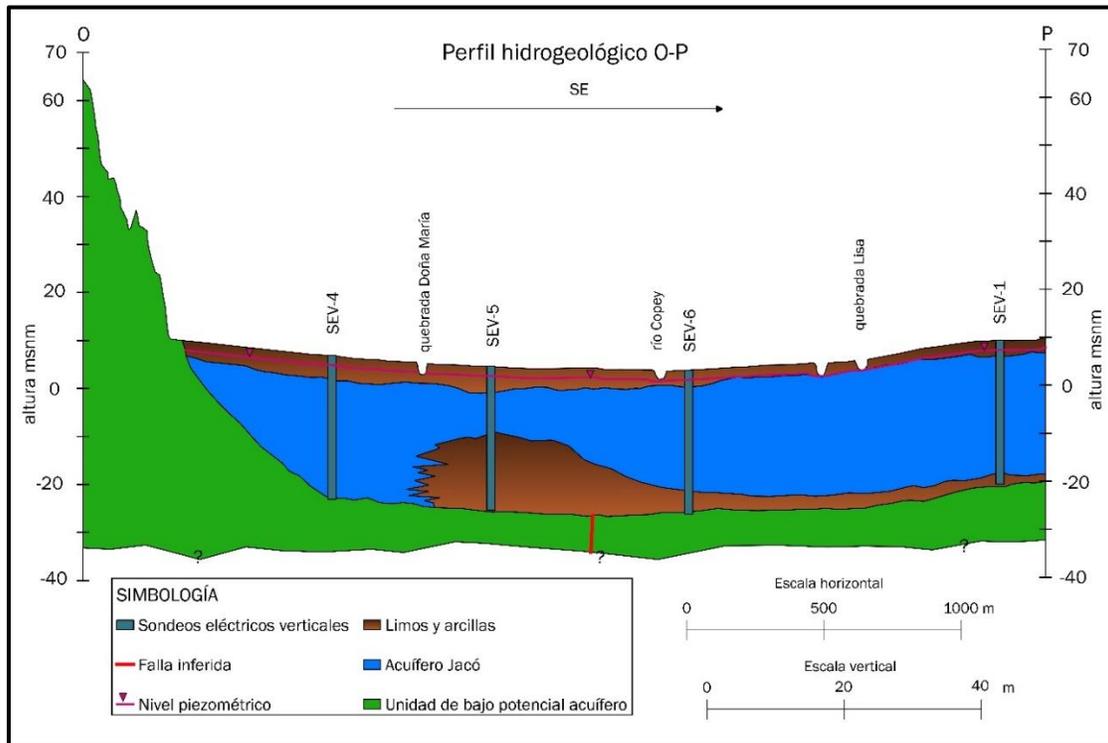


Figura 33. Perfil Hidrogeológico O-P.

En el anexo 9, se muestra de forma esquemática un cuadro resumen con las principales características de los acuíferos modelados para cada sector en las partes bajas de las subcuencas del Pacífico Central, descritos en las secciones precedentes.

### 3.2 Sector Hermosa – Esterillos

#### 3.2.1 Inventario de pozos

Dentro del área de estudio se contabilizan 136 pozos registrados y 4 manantiales en la Base de datos de SENARA. De estos pozos solamente 82 pozos cuentan con información litológica para la definición del modelo hidrogeológico conceptual (Figura. 34).

En la plataforma del SINIGIRH, en consulta del 27 de agosto del 2020, se contabilizan 211 concesiones en el área de Hermosa y Esterillos.

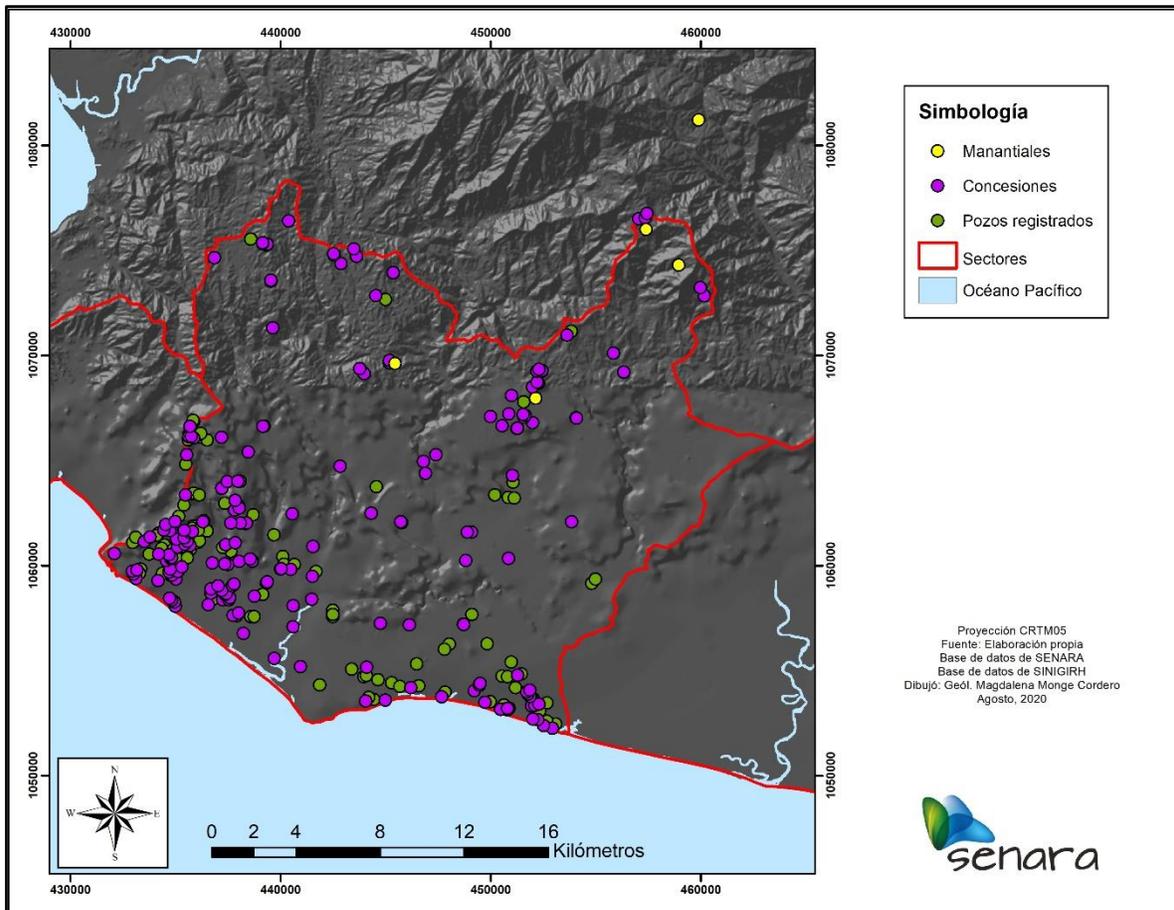


Figura 34. Pozos, manantiales y concesiones registrados en la zona de Hermosa y Esterillos.

El SENARA inventarió en el campo 31 pozos, 15 perforados y 16 excavados, de los cuales se tomaron 22 pozos para conformar una red de monitoreo en la zona, incluyendo también 6 piezómetros realizados por SENARA en el marco del PROGIRH.

Los monitoreos en pozos consistían en la medición de la profundidad del agua subterránea, la temperatura y la conductividad eléctrica. Estas mediciones se realizaron en setiembre y noviembre del 2019, y los meses de marzo, mayo, junio, julio, setiembre, octubre y noviembre del 2020, por parte del personal del SENARA. Durante el desarrollo de este proyecto, la red de monitoreo se redujo, debido a que algunos lugares se encontraban cerrados por motivo de la pandemia de COVID-19.

La Base de Datos de pozos del SENARA fue filtrada para seleccionar únicamente los pozos que contaban con información litológica, posteriormente se revisaron los expedientes de los pozos para extraer información acerca del diseño, litología, profundidad, ubicación, profundidad del nivel de agua, existencia de pruebas de

bombeo, uso, caudal de extracción, entre otros datos. La información de estos pozos se encuentra en el anexo 1, y en la tabla 10 se muestran los usos que se le da al agua de los pozos registrados en la Base de datos de SENARA.

Tabla 10. Usos del agua para los pozos registrados en SENARA.

Tipo de Uso	Cantidad	Caudal extraído (L/s)
Doméstico y riego	34	110,82
Doméstico	52	72,12
Abastecimiento público	7	46
Turístico	10	8,66
Urbanístico	4	7,6
Riego y turístico	4	7,6
Doméstico y turístico	2	6
Turístico, doméstico y riego	3	3,5
No indica	5	2,8
Agropecuario	2	1,1
Doméstico e industrial	2	1
Industrial	3	-
Riego	1	-
Doméstico, turístico y agropecuario	1	-
Piezómetros	6	0
<b>TOTAL</b>	<b>136</b>	<b>267,2</b>

También se obtienen las concesiones registradas en el Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (SINIGIRH), con sus respectivos caudales y usos, para un total de 177 concesiones en la zona de Hermosa y Esterillos. Esta información se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Usos del agua para las concesiones mostradas en el SINIGIRH.

Tipo de Uso	Cantidad	Caudal concesionado (L/s)
Consumo humano	69	126,39
Turístico	30	39,49
Riego	21	19,86
Agropecuario	13	5,89
Comercial	1	0,25

Industrial	2	0,01
<b>TOTAL</b>	<b>136</b>	<b>191,89</b>

### 3.2.2 Aforos diferenciales

En la Base de Datos de SENARA se encuentran 9 sitios de aforo en ríos y quebradas, que recopilan información desde 1966 hasta el 2000, y para el año 2013 se realizaron aforos en 8 sitios adicionales, la tabla 12 muestra los sitios de aforo en la zona de Hermosa y Esterillos.

Tabla 12. Sitios de aforo en Hermosa y Esterillos.

Sitio de aforo	Longitud CRTM05	Latitud CRTM05	Años de medición
Quebrada Piedra Bruja	437958	1064852	1985-1996
Río Gamalotillo	450908	1062799	1986-2000
Río Gamalotillo	451507	1064149	1986-2000
Río Gamalotillo	451407	1063949	1986-2000
Río Gamalotillo	452107	1064349	1986-2000
Río Gamalotillo	452207	1064349	1986-2000
Río Tulín	441862	1058899	1966-1980
Río Turrubaritos	441814	1058952	1978-1980
Río Tusubres	441129	1057950	1975-1979
(1) Río La Gloria	437242	1062377	2013
(2) Río La Gloria	436898	1060099	2013
(3) Río La Gloria	437080	1059428	2013
(4) Río La Gloria	437148	1059239	2013
(5) Río La Gloria	437260	1058981	2013
(1) Río Tusubres	441749	1058710	2013
(1) Río Turrubaritos	442377	1066459	2013
(2) Río Turrubaritos	442285	1061470	2013

Con la información disponible, solamente para el río Gloria se puede determinar un comportamiento influente, ya que disminuye su caudal desde la zona alta, con 75,9 l/s hasta la parte plana, secándose durante la época seca.

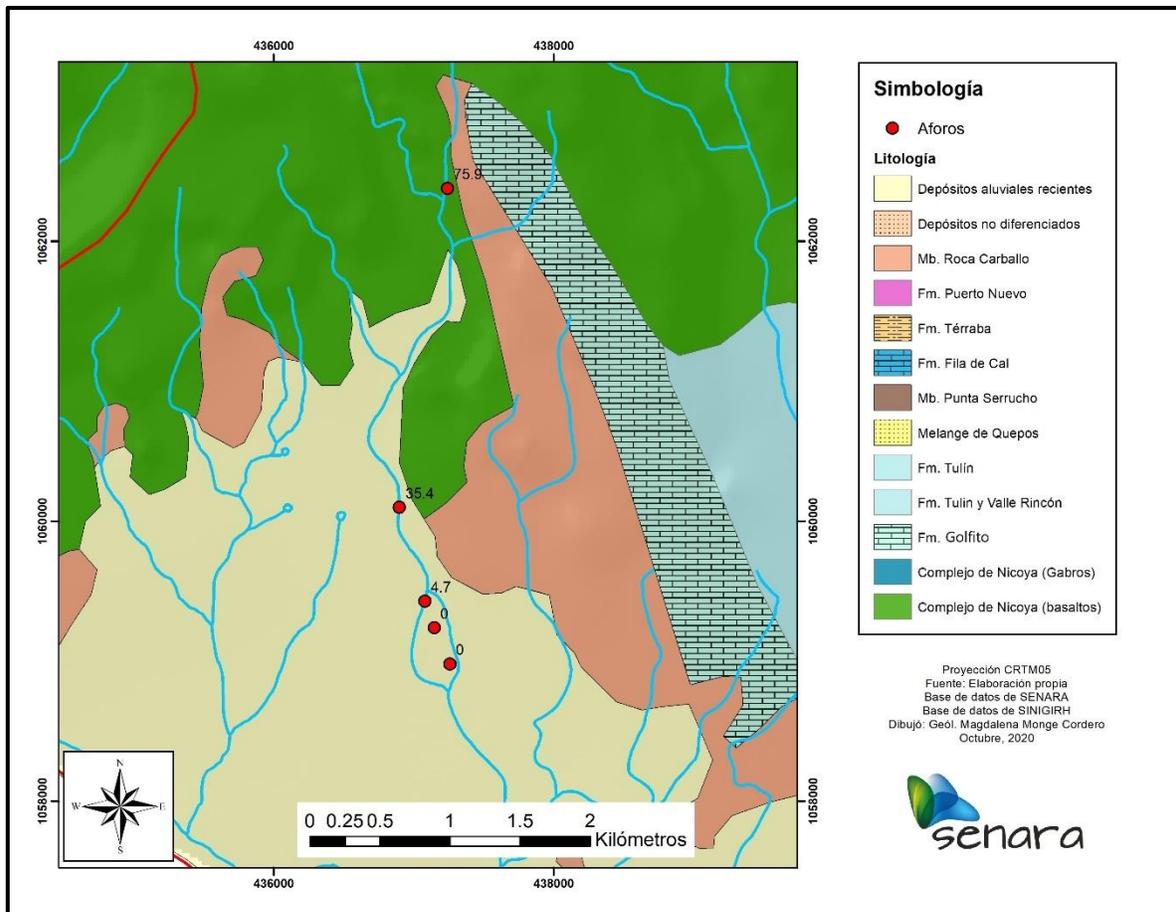


Figura 35. Aforos realizados en el río Gloria, en la zona de Hermosa y Esterillos.

### 3.2.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual

En la zona de Esterillos, al sur del área de estudio, el acuífero se asocia a rocas sedimentarias de la Formación Punta Carballo, fracturadas, con cemento calcáreo y silíceo, así como depósitos sedimentarios inconsolidados.

En superficie se identifican capas de suelo vegetal, arcillas, limos y gravas de entre 1 y 17 m de espesor, y en algunos sitios se encuentran hasta 25 m de espesor de aluviones. Le subyacen intercalaciones de areniscas finas a gruesas, lutitas, arcillas, tobas y conglomerados con espesores entre 12 y 96 m.

Los niveles de agua subterránea se ubican entre 1 y 8 m de profundidad en condiciones de acuífero libre. Se encontró un pozo en la zona donde se presenta confinamiento, presentándose el sello en una alternancia de sedimentos a los 120 m de profundidad, que provoca que el agua suba hasta los 12 m.

En uno de los aluviones de la zona se determinó una transmisividad de 4,3 m<sup>2</sup>/d (Pozo PAT-24), mientras que en el piezómetro PAT-61 se obtienen permeabilidades entre 1,40x10<sup>-3</sup> m/d para areniscas y 6,34 m/d para conglomerados. El flujo de agua subterránea tiene un gradiente hidráulico entre 0,005 y 0,1, con una dirección hacia el sur y el suroeste, como se observa en la figura 36.

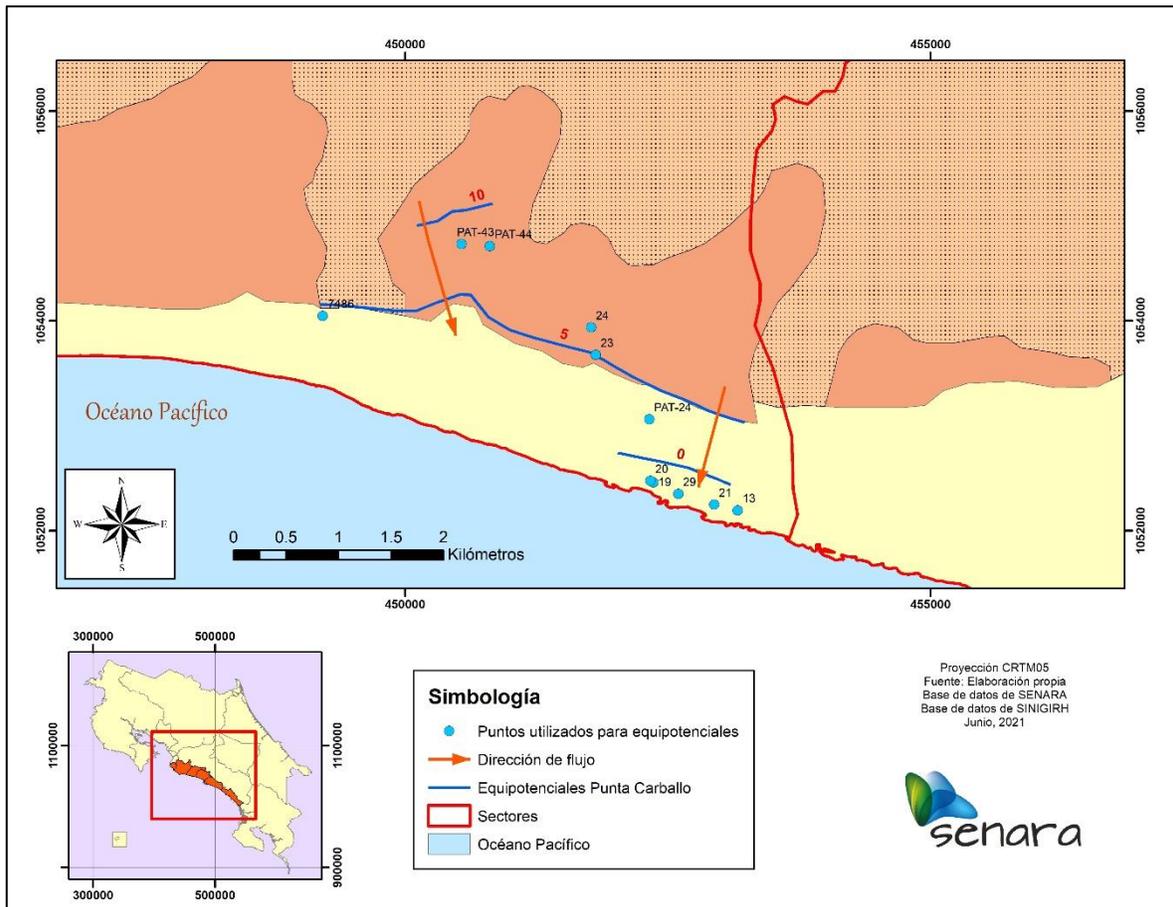


Figura 36. Equipotenciales en la zona de Esterillos, asociadas al acuífero ubicado en la Formación Punta Carballo.

En el sector de Playa Hermosa, Pochotal y al norte de Pochotal, el acuífero se asocia a basaltos sanos y fracturados, junto con brechas basálticas y radiolaritas del Complejo de Nicoya. En la parte baja del área, el acuífero también se asocia a rocas sedimentarias de la Formación Punta Carballo y a los Depósitos Aluviales Recientes.

En superficie se pueden encontrar capas de arcillas rojizas con fragmentos de basaltos, entre 4 y 33 m de espesor, así como suelos arenosos y coluvios de grano fino entre 10 y 35 m de espesor.

En la parte al norte de Pochotal, los basaltos alcanzan entre 23 y 162 m de espesor, y en algunos sectores se encuentran radiolaritas asociadas al Complejo de Nicoya de entre 80 y 91 m de espesor. En la parte más cercana a la playa, las areniscas y lutitas de la Formación Punta Carballo alcanzan entre 37 y 99 m de espesor, sobreyaciendo a los basaltos.

Los niveles de agua subterránea ubicados exclusivamente en los basaltos y radiolaritas se ubican entre 1,8 y 160 m de profundidad (en las partes de mayor elevación). En la parte baja del área, los niveles se encuentran entre 2 y 65 m de profundidad.

En la parte alta, algunos pozos muestran confinamiento en algunos sectores del acuífero relacionado con basaltos y radiolaritas, incluso se relacionan a zonas de falla con presencia de arcillas (pozos HE-96, HE-124, HE-61, HE-107 y HE-7).

Las transmisividades calculadas para basaltos y radiolaritas se encuentran entre 0,72 y 70 m<sup>2</sup>/d, para areniscas y lutitas se encuentran entre 1,2 y 2560 m<sup>2</sup>/d, para aluviones se determinan transmisividades de 118 m<sup>2</sup>/d, y para una mezcla entre basaltos y aluviones, las transmisividades están entre 219 y 328 m<sup>2</sup>/d.

En la zona también existen algunos pozos asociados a la Fm. Tulín, sin embargo, son muy pocos y están dispersos en el área, lo que no permite la construcción de equipotenciales para esta litología. Los niveles de agua subterránea se encuentran desde 2,7 a 49 m de profundidad. A partir de pruebas de Lugeon se determinaron permeabilidades entre  $9 \times 10^{-10}$  y  $2,85 \times 10^{-3}$  m/d en el pozo TS-165, y entre  $6,77 \times 10^{-3}$  y  $4,87 \times 10^{-1}$  m/d en el pozo PAT-59.

El flujo de agua subterránea tiene un gradiente hidráulico entre 0,05 y 1, con una dirección hacia el sur, sureste y suroeste, como se observa en la figura 37.

En los sectores alrededor de Bijagual, San Gabriel, Pavona, La Gloria, Tulín, Montelimar, Gamalotillo, Guarumal y Arenal (ubicados al norte de la cuenca), existen muy pocos pozos para la construcción de equipotenciales en estos lugares.

Se pueden encontrar acuíferos asociados a areniscas y lutitas de la Formación Punta Carballo, entre 56 y 97 m de espesor, y niveles de agua subterránea entre 4,8 y 46 m de profundidad, para condiciones de acuífero libre. En el pozo PAT-62 se encuentra un nivel surgente.

En la Formación Tulín también se encuentran acuíferos asociados a basaltos y peperitmas, entre 24 y 89,5 m de espesor, y niveles de agua subterránea entre 2,7 y 49 m de espesor.

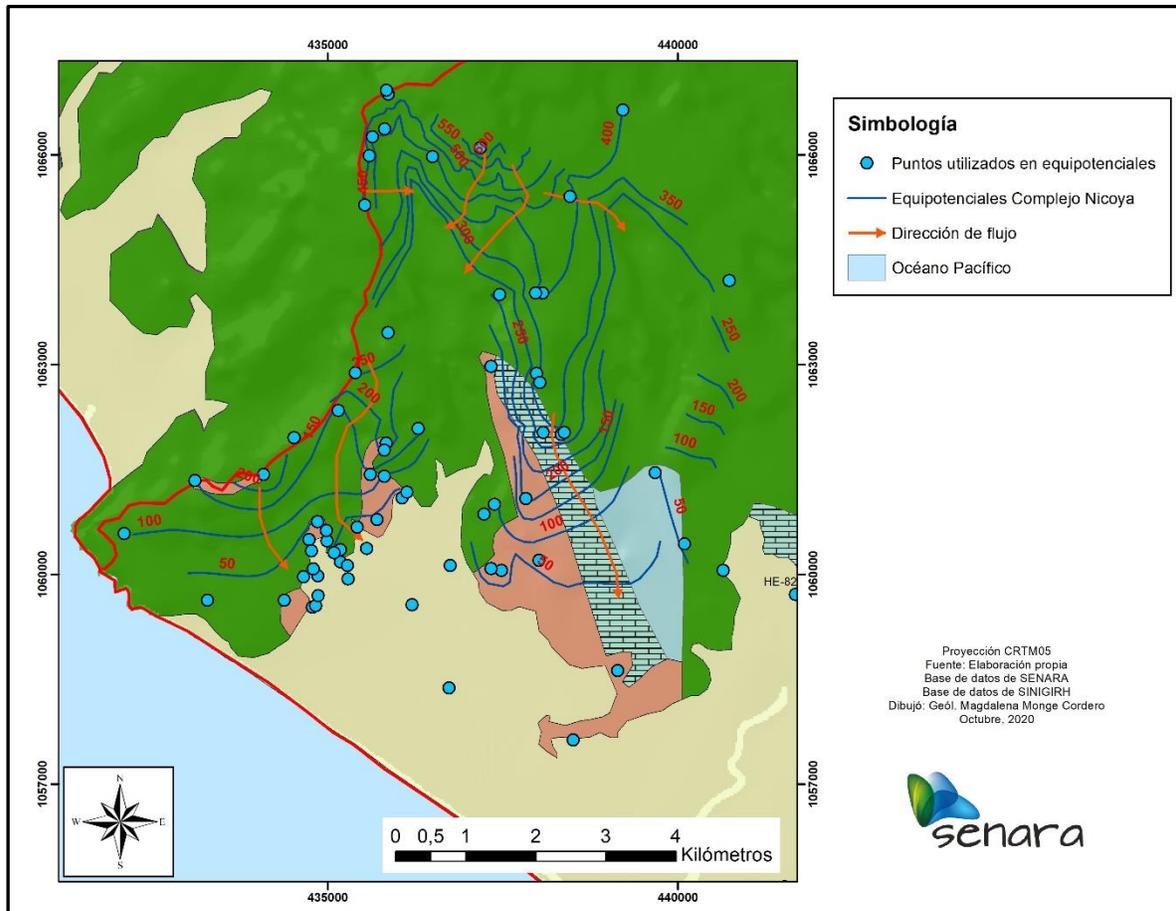


Figura 37. Equipotenciales dibujadas para la zona de playa Hermosa y Pochotal, asociadas al acuífero ubicado en rocas del Complejo de Nicoya.

### 3.3. Sector Parrita – Quepos

#### 3.3.1 Inventario de pozos

En la zona de estudio se registra un total de 98 pozos de acuerdo con la base de datos de SENARA (Figura 38). De estos, 66 cuentan con información litológica, 5 corresponden con piezómetros, fundamentales para la elaboración del modelo hidrogeológico de la zona de estudio. Mientras que 32 carecen de información básica (litología y dato del nivel de agua subterránea, entre otra). Los principales usos registrados abarcan desde el abastecimiento público, doméstico hasta turismo y agrícola, fundamental en los sectores productivos (Tabla 13). Vale la pena recalcar que

la presencia de pozos de investigación (piezómetros) vienen a ser una herramienta básica para monitorear el comportamiento de los acuíferos en función de la época y de la tasa de extracción asociada.

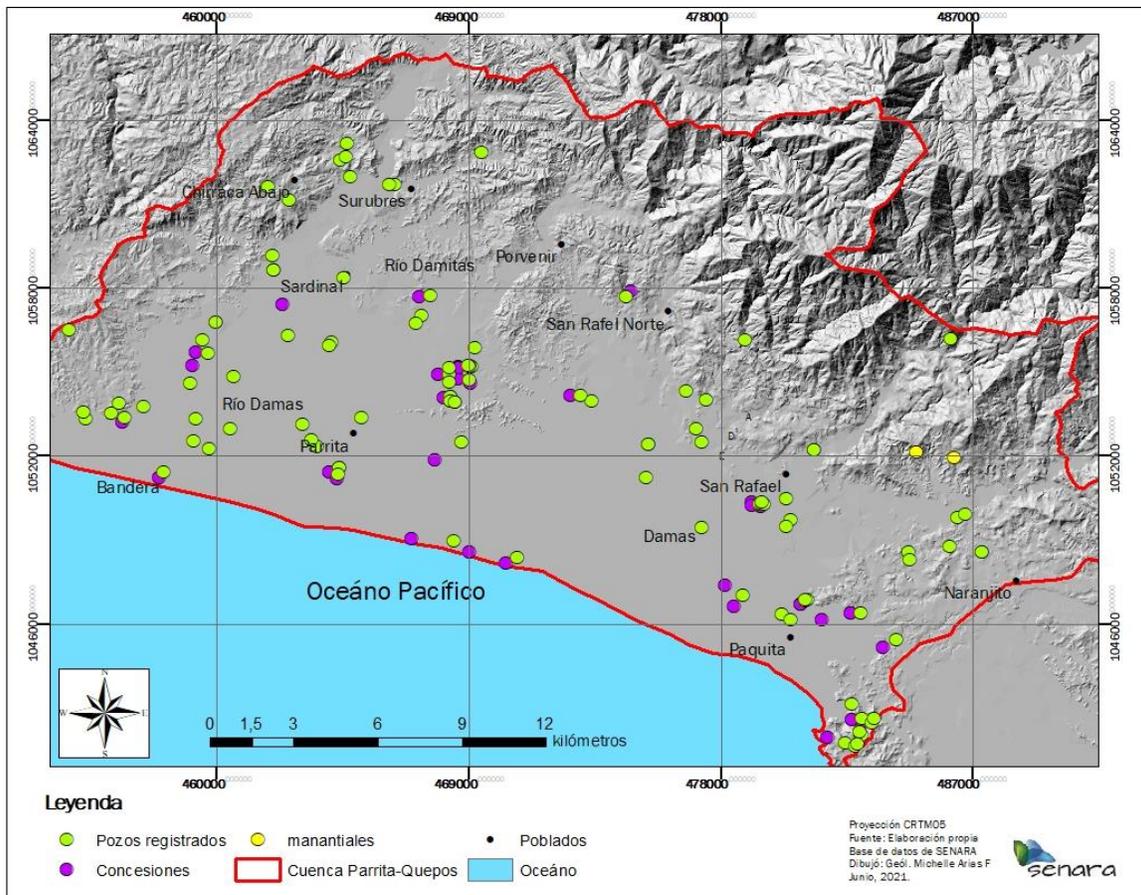


Figura 38. Pozos, manantiales y concesiones registrados.

Tabla 13. Usos del agua para los pozos registrados en la base de datos de SENARA.

Tipo de Uso	Cantidad		Caudal extraído (l/s)	
	Parrita	Quepos	Parrita	Quepos
Abastecimiento público	15	6	154,5	97,1
Doméstico	12	14	32,69	34,68
Doméstico y riego	4	3	26	9,8
Doméstico y turístico	0	2	0	2,63
Industrial	6	3	40,3	12,3
Investigación (piezómetros)	2	3	0	0
Riego	7	0	53	0
Turístico	2	3	0,5	5,9
Turístico, doméstico y riego	0	1	0	2,5

Riego y turístico	0	2	0	6
Turismo - industrial	1	0	0,02	0
Agroindustrial	4	0	158,99	0
Urbanístico	3	0	10,5	0
Sin información	0	5	0	0
<b>TOTAL</b>			<b>476,5</b>	<b>170,91</b>

Por otra parte, en la plataforma del SINIGIRH, según consulta realizada el 16 de setiembre del 2020, se contabilizan 68 expedientes de concesiones de aprovechamiento de agua para distintos usos, de los cuales 26 corresponden con solicitudes nuevas en gestión de trámite (Tabla 14). A su vez, se registran 11 manantiales a partir de los cuales han otorgado 16 concesiones, siendo el consumo humano el uso con el mayor caudal de aprovechamiento.

Tabla 14. Usos del agua para las concesiones mostradas en el SINIGIRH.

Tipo de Uso	Pozos		Manantiales	
	Cantidad de concesiones	Caudal concesionado (l/s)	Cantidad de concesiones	Caudal concesionado (l/s)
Agroindustrial	8	61,41	0	
Consumo humano	26	24,22	9	38,03
Riego	3	16,41	1*	3,7
Turístico	6	5,39	1*	0,2
Comercial	1	0,6	2*	0,004
Industrial	1	0	0	0
Agropecuario	0	0	1*	0,4
Expedientes sin información de caudal	40	-	7	-
<b>TOTAL</b>	-	109,09	-	42,33

\*: concesiones con asignación de caudales con más de un uso.

A través del trabajo de campo se inventariaron 37 pozos en las zonas de Parrita y Quepos, de los cuales 18 son perforados (5 corresponden con piezómetros realizados por SENARA), 16 son excavados y 3 son del tipo punteras. A partir de estos, se conformó una red de monitoreo, a través de la cual se han medido los niveles del agua subterránea

desde julio de 2019 hasta noviembre de 2020. En la figura 39 se muestra la red de monitoreo desarrollada e implementada desde el 2019.

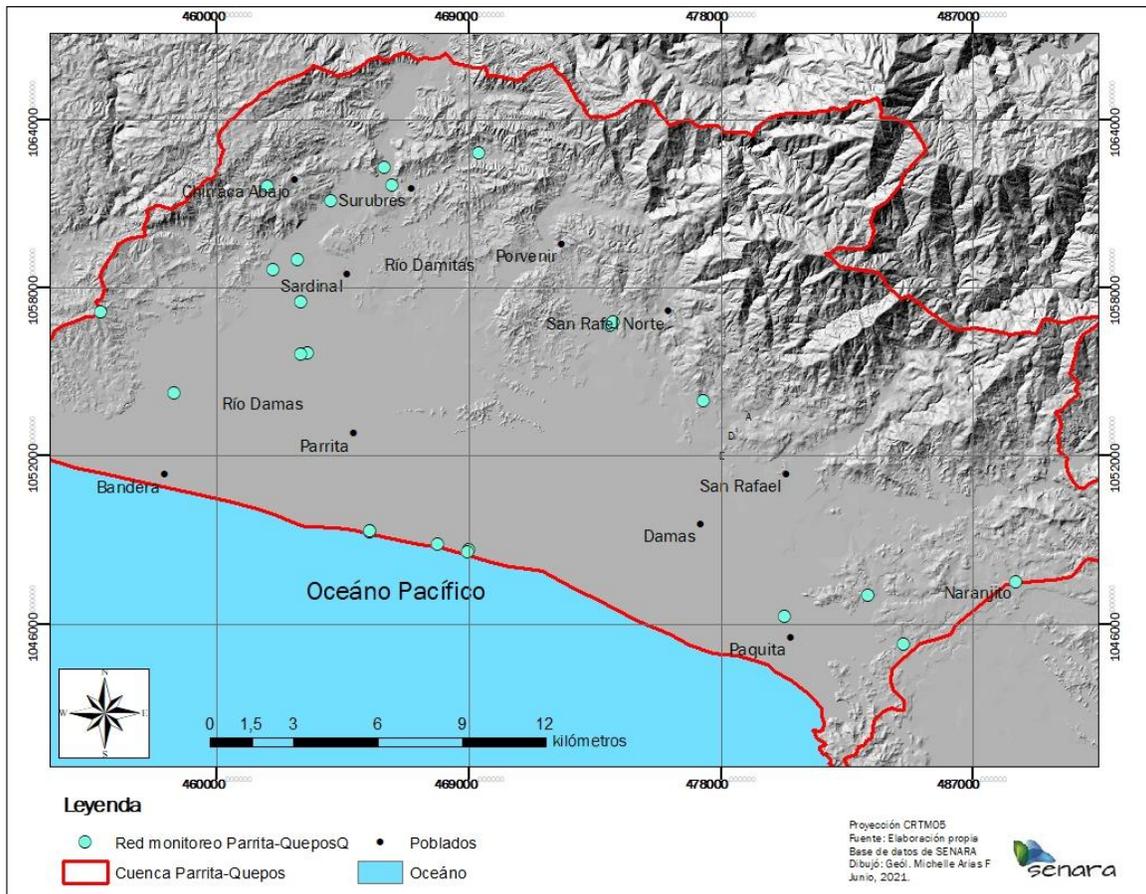


Figura 39. Red de monitoreo Parrita – Quepos.

### 3.3.2 Afors diferenciales

De acuerdo con la base de datos de SENARA, del año 1954 al 2014, se llevó a cabo el aforo de siete microcuencas en la zona de Parrita y Quepos, por lo general estos corresponden con aforos puntuales para determinar los caudales de los principales ríos, los períodos de medición se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Sitios de aforo en Parrita – Quepos.

Lugar	Longitud CRTM05	Latitud CRTM05	Año de medición
R. Pirris	464366	1052874	1954-2012
R. Pocaritos	473462	1056382	1998-2000
R. Pocaritos	472813	1054382	1998-2000

R. Damas	478716	1053484	1991-2000
R. Damas	478117	1052485	1991-2000
R. Damas	479267	1053386	1991-2000
R. Damas	478118	1052135	1991-2000
R. Damitas	478118	1052784	1991-1994
R. Damitas	477816	1054434	1991-1994
R. Paquita	486869	1050144	1980-1981
R. Pirris	464856	1053339	1954-2012
R. Pirris	464690	1054418	1954-2012
Barbudal	463786	1058214	2014
Rio San Antonio	477849	1054779	2014

La información disponible en la base de datos de SENARA, muestra los caudales de las microcuencas para la época de verano, básicamente de noviembre a junio y en la mayoría de los casos corresponde con aforos puntuales (Figura 40).

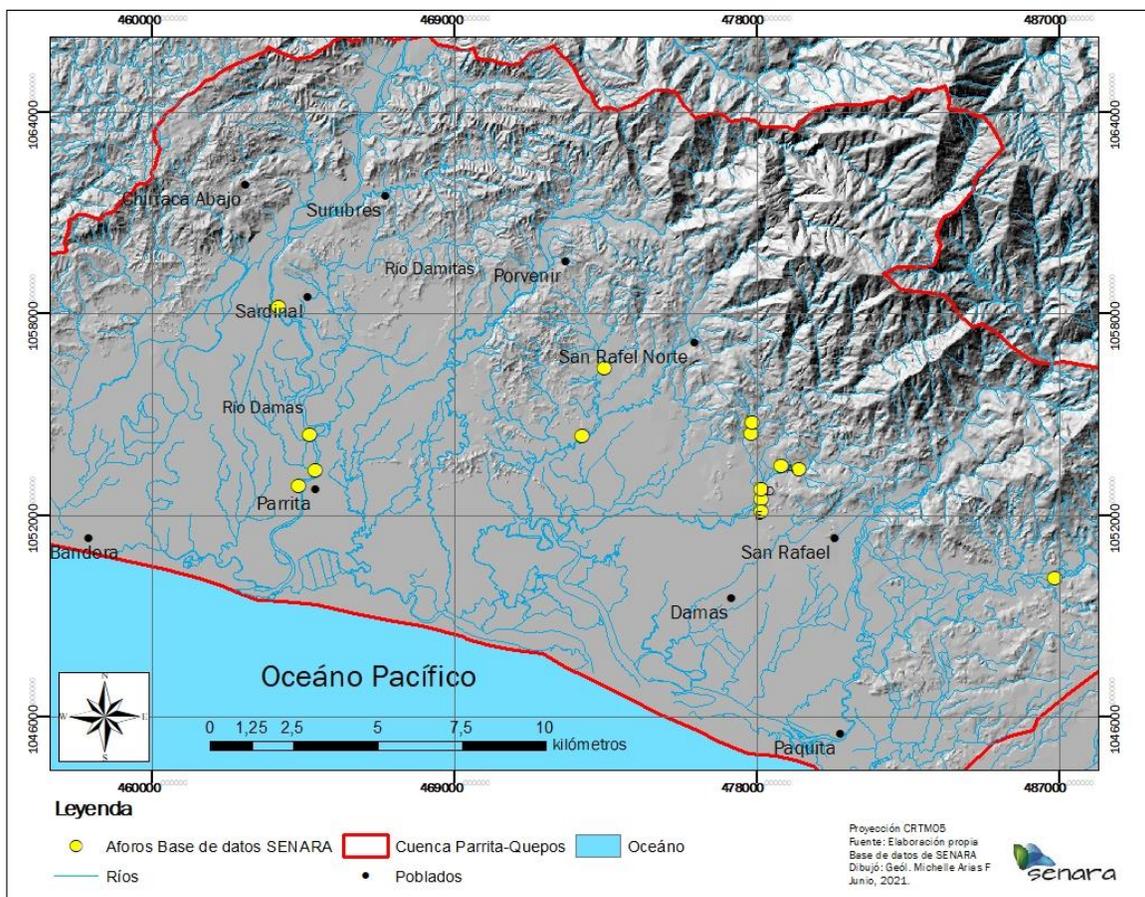


Figura 40. Mapa de aforos puntuales, sector Parrita Quepos.

No obstante, a partir de aforos diferenciales, solo para un pequeño tramo de 1,2 km, entre los ríos Damitas y Damas, fue posible determinar un comportamiento influente (Figura 41). Además, se logra observar que el caudal disminuye en la zona de transición, de media a plana, en 248,65 l/s para el mes de abril y en 586,62 l/s en junio (1991, año de medición).

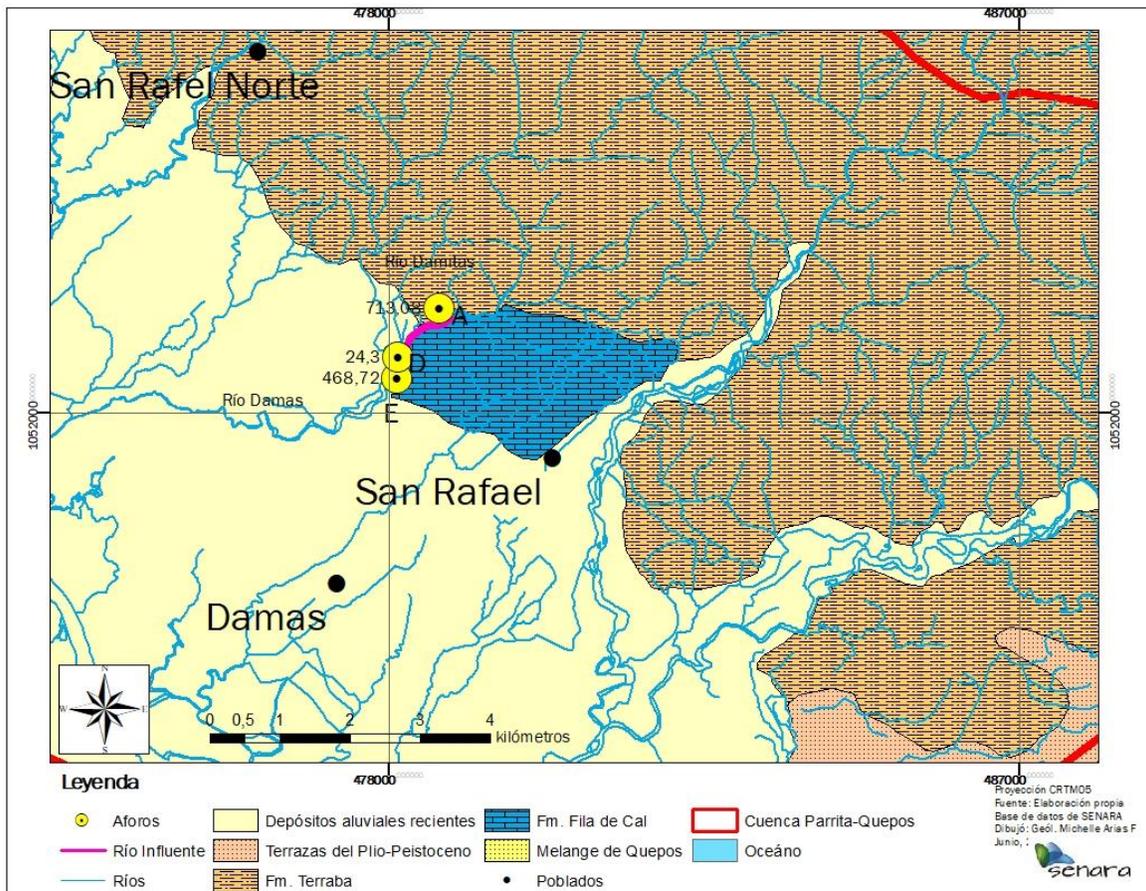


Figura 41. Comportamiento influente de los ríos Damas y Damitas.

### 3.3.3 Modelo Conceptual Hidrogeológico

En la parte media y baja de las micro-cuencas que conforman las zonas de Parrita y Quepos se han desarrollado acuíferos a partir de las unidades litológicas de rocas sedimentarias y volcánicas. La red de monitoreo implementada ha permitido registrar y actualizar los datos correspondientes al nivel del agua subterránea en las zonas de

Parrita y Quepos. De manera muy general, este se localiza entre 0,49 m y 27,98 m de profundidad, en la tabla 16 se muestra el detalle de los rangos identificados.

Tabla 16. Niveles del agua subterránea en pozos ubicados en Parrita – Quepos.

Sector		Profundidad del nivel de agua subterránea	Geología
Parrita	Tigre hacia el Norte (Playón, Playón Sur, Vasconia, ).	4 – 6,5 m	Cuaternario
	Tigre hacia el Sur (Julieta, la costa).	0,49 – 3 m	Cuaternario
	Surubres (Nor-Este)	2,23 – 2,84 m	Cuaternario
	Chirracá	11,47 – 27,98	Sedimentario (Térraba)
Quepos	Paquita	0,9 – 2,84 m	Cuaternario y Depósitos no diferenciados
	Concepción, de Naranjito al Nor-Oeste	6,7 – 21 m	Sedimentario (Térraba)
	Damas, Cerros	2,5 – 4,6 m	Cuaternario
	Las Palmas	10 – 11 m	Depósitos no diferenciados

Las menores profundidades del agua están en los pozos localizados en las partes bajas y central de las micro-cuencas, en un rango entre 0,9 y 6,5 m en las rocas Cuaternarias principalmente, siendo los niveles más superficiales los localizados en las cercanías a la costa. Mientras que, hacia el norte y este de la zona de estudio, el agua subterránea se encuentra a partir de los 10 m en los sedimentos. Para las formaciones Punta Carballo y Fila de Cal no fue posible caracterizarlas hidrogeológicamente por cuanto no se cuenta con pozos ni piezómetros para conocer el comportamiento hidráulico. A continuación se describe a detalle las rocas acuíferas de la zona de estudio.

#### ✓ **Acuífero fracturado Térraba**

Este acuífero está compuesto principalmente por alternancias de lutitas y areniscas estratificadas y ocasionales brechas. Las lutitas muestran zonas rojizas por oxidación de hierro, con vetas de calcita y altamente fracturadas. Es común el desarrollo de una capa regolítica, compuesta por suelos de textura arcillosa con espesores de 1,0 a 5,0 m.

La conductividad hidráulica varía entre  $1,54 \times 10^{-6}$  m/día (prueba de infiltración metodología Hvorslev DO-12) a 3,55 m/día, los niveles de agua subterránea se ubican

entre 10,70 m y 18 m de profundidad, esta variación en los niveles se debe a la heterogeneidad del medio y a la presencia de fracturas de manera que no hay un nivel continuo sino más bien fracturas que contienen el agua. La dirección de flujo, así como el gradiente hidráulico no fue posible obtener debido a los pocos pozos existentes en esta formación. (Figura 42). Las transmisividades reportadas, a partir de pruebas de bombeo de algunos pozos son del orden de  $T = 3,56 \text{ m}^2 / \text{día}$  (DO-9), y presenta caudales que varían entre 0,5 – 6 l/s.

Básicamente se trata de un acuífero fracturado libre, no obstante, de manera local se comporta como un acuífero confinado al Nor-Este de la confluencia de los ríos Valeria y Damas, aspecto evidenciado durante la ejecución de la perforación exploratoria (DO-11), debido a la presencia de una capa de limos arcillosos de alta plasticidad y sedimentos a partir de los 6,60 m, provocando que el agua ascendiera hasta los 0,30 m.

#### ✓ **Acuífero fracturado Tulín**

Este acuífero está compuesto por basaltos, brechas basálticas y peperitas principalmente, estas rocas presentan alteración hidrotermal con la presencia de piritita, clorita, hematita, arcillas. Las peperitas muestran evidencias de fallamiento y algunas zonas más silicificadas, mientras que los basaltos tienen un grado medio de meteorización y gran cantidad de vetas de calcita. Es muy común en estas rocas el desarrollo de una capa regolítica, compuesta por suelos de textura arcillosa a limo-arenosa con espesores de 5 a 7 m (PAT-58, PAT-25). La presencia de fracturas abiertas favorece la permeabilidad secundaria en estas rocas, no obstante, el aporte de agua al acuífero está condicionado por la gran cantidad de fracturas rellenas por materiales de alteración. La conductividad hidráulica varía entre 0,0433 m/día a 1,07 m/día, el nivel de agua subterránea se ubica a 27 m en el sector de Chirracá Abajo y Playón Sur. No fue posible la construcción de equipotenciales debido a que solo se cuenta con dos pozos captando la Formación Tulín, tampoco se cuenta con información de pruebas de bombeo para poder determinar otros parámetros hidráulicos. Dadas sus características, se considera un acuífero fracturado, con caudales de 9,5 l/s (único que se tiene registra para esta zona).

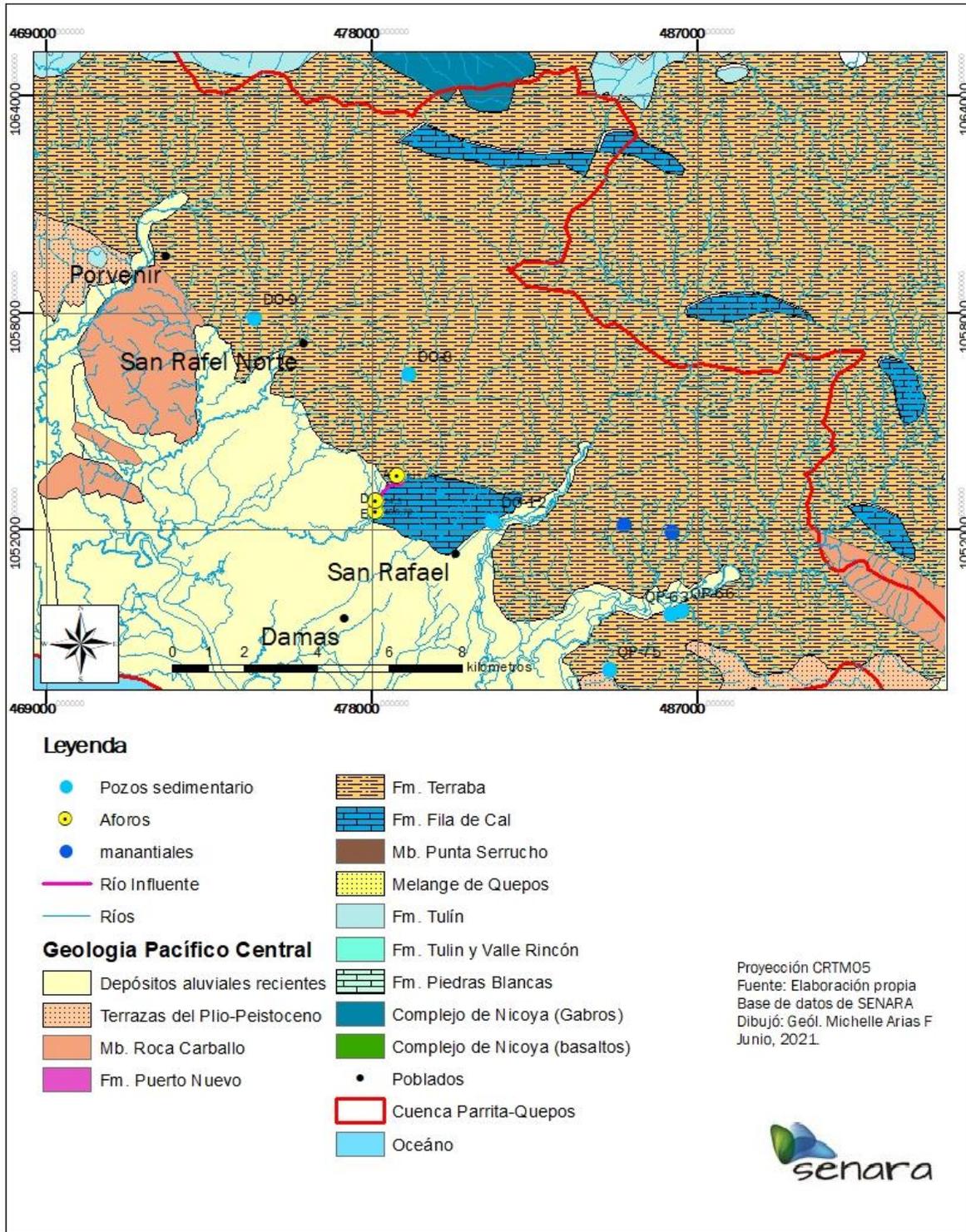


Figura 42. Mapa de elementos hidrogeológicos, acuífero Térraba.

✓ **Acuífero poroso aluvial**

Este acuífero está compuesto por arenas gruesas hasta gravas y bloques, con clastos redondeados a sub-redondeados (90%), de composición ígnea y sedimentaria, con óxidos presentes (2%). A nivel local, en el sector de Parrita, los aluviones suelen presentar granulometrías más finas con respecto al sector de Quepos, así como la frecuente presencia de capas arcillosas y de arcilla con arena con espesores de 1 – 6 m, intercaladas con estratos de arenas gruesas y gravas, mientras que en los aluviones de Quepos la capa de arcilla no supera los 3 m y las granulometrías por lo general corresponden con gravas y bloques.

Presenta un espesor que oscila entre 14 y 20 m, en los pozos PAT-2, PAT-37, PAT-71, no obstante, la frecuencia de lentes arcillosos a lo largo de la secuencia estratigráfica limita la captación del acuífero de manera ampliada. Esta unidad acuífera suele presentarse en terrazas y/o bancos aluviales distribuidos de manera paralela al curso de los principales cauces de los ríos Parrita, Palo Seco, Damas, Damitas, Cañas y Paquita. El nivel del agua subterránea se localiza entre los 0,49 y 6,5 m con respecto a la superficie y se reportan caudales de 1 hasta 25 l/s. Los valores de transmisividad y conductividad hidráulica se obtuvieron a través de los resultados de las pruebas de bombeo de los pozos PAT-10 y PAT-8 y, siendo que esta unidad presenta valores de transmisividad de entre 99 m<sup>2</sup> /día y 140 m<sup>2</sup>/día, mientras que la conductividad hidráulica varía entre 4,91 m/día y 8,25 m/día, un gradiente hidráulico entre 0,1 y 0,16 con dirección de flujo hacia el Sur (Figura 43).

Este acuífero poroso es libre, ampliamente captado en las zonas de Parrita y Quepos. La recarga sucede por infiltración directa de la lluvia y eventual aporte de agua a partir de los cursos superficiales de los ríos Damas y Damitas.

Para el sector de playa Palo Seco (Parrita), durante todo el período de monitoreo se evidenció la influencia de las mareas, misma que se acentúa en la época seca y durante las mareas altas, registrándose conductividades eléctricas de 435 hasta 652 µS/cm de abril a julio, no cumpliendo así con lo establecido en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, decreto No. 32327-S. Mientras que de setiembre a octubre oscilaron entre 171 y 234 µS/cm.

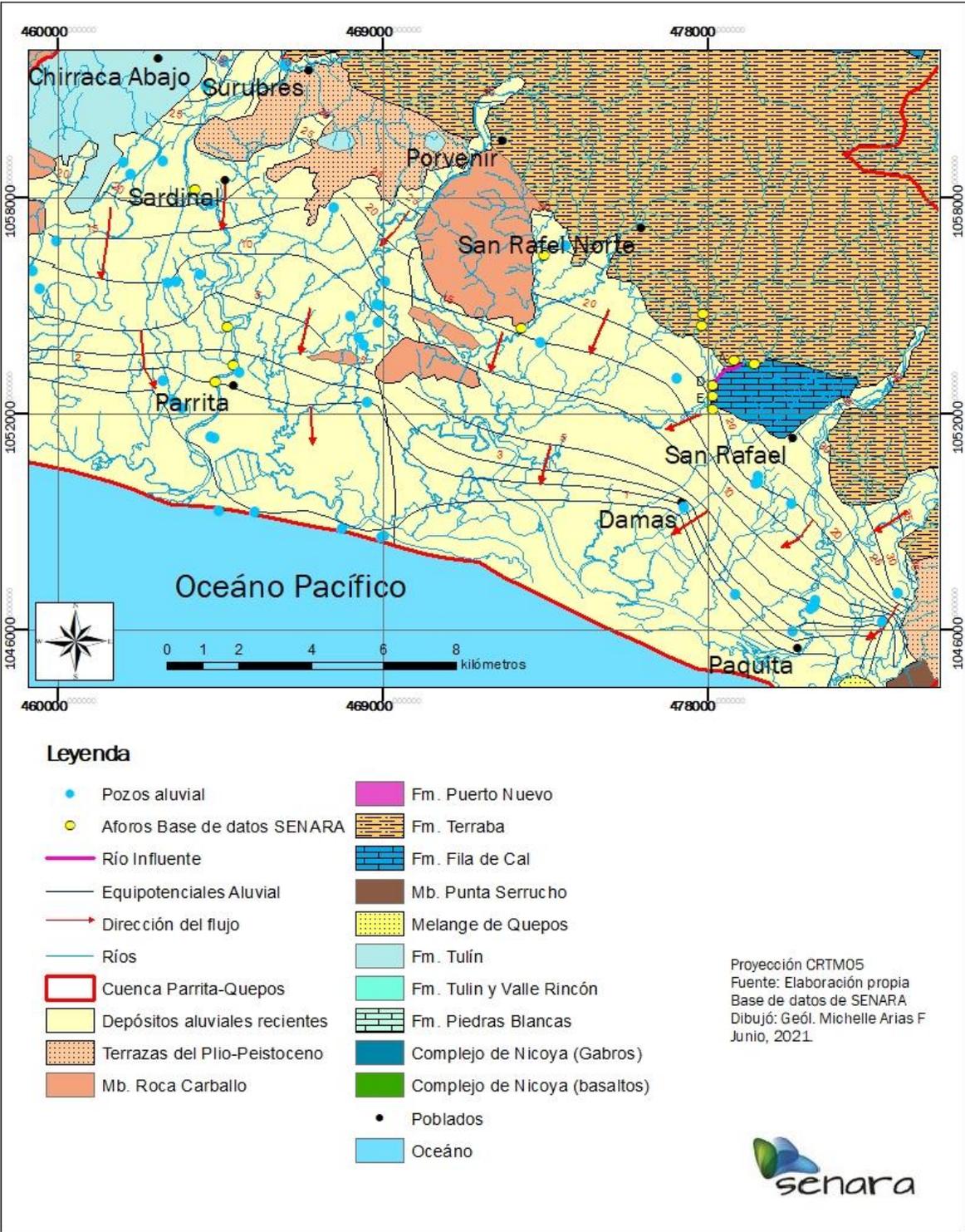


Figura 43. Mapa de elementos hidrogeológicos, Acuífero poroso Aluvial.

### 3.4 Sector Naranja – Savegre – Matapalo

#### 3.4.1 Inventario de pozos

Como parte de este estudio, se llevó a cabo la recopilación de información de pozos y manantiales, considerando la base de datos del SENARA y del Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (SINIGIRH).

Se cuenta con un total de 93 pozos distribuidos en el área de la cuenca y registrados en la base de datos del SENARA, de los cuales 51 cuentan con información litológica y niveles, 37 no poseen información, de estos últimos 5 son ilegales.

La base de datos de pozos del SENARA fue filtrada para seleccionar únicamente los pozos que contaban con información litológica, posteriormente se revisaron los expedientes de los pozos para extraer información acerca del diseño, litología, profundidad, ubicación, profundidad del nivel de agua, existencia de pruebas de bombeo, uso, caudal de extracción, entre otros datos. La información de estos pozos se encuentra en el anexo 1.

En la base de datos del SENARA no se registran manantiales en el área de estudio.

Los usos del agua de los pozos registrados en la base de datos del SENARA, a setiembre del 2020, se detallan en la tabla 17 donde se observa que predomina el uso doméstico.

Tabla 17. Usos para los pozos registrados en el SENARA.

Tipo de Uso	Cantidad	Caudal extraído (l/s)
Doméstico	18	41,77
Doméstico comunal	1	2
Doméstico turístico	3	0,95
Doméstico y piscina	3	6,2
Doméstico y riego	5	10,35
Doméstico, riego y turismo	1	1,42
Industrial y doméstico	1	10
Necesidades del Parque	1	1
Turístico	3	3,78
Turístico y residencial	1	3
Turístico, doméstico y riego	3	9,5
Hospital	1	0,5

Abastecimiento Público-doméstico	1	1
No indica	9	25,95
<b>TOTAL</b>	<b>51</b>	<b>117,42</b>

Para el área de la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo en el SINIGIRH, a setiembre del 2020, se encuentran registrados 53 pozos y 62 manantiales cuyo estado se indica en la tabla 18.

Tabla 18. Pozos y manantiales registrados en el SINIGIRH (2020).

Estado	Número de Pozos	Número de Manantiales
Archivados sin más trámite	7	1
Cancelados	3	5
Cancelados por vencimiento	5	3
Denegados	3	1
Inscritos	3	27
Inscritos-artesanal	7	-
Otorgados	25	25
<b>TOTAL</b>	<b>53</b>	<b>62</b>

De los 53 pozos mencionados anteriormente 19 no indican información asociada con algún tipo de uso y caudal, para los restantes 34 pozos, a continuación, en la tabla 19 se enlista el uso, cantidad y caudal solicitado.

Tabla 19. Usos del agua para los pozos registrados en el SINIGIRH.

Tipo de Uso	Cantidad	Caudal extraído (l/s)
Turístico	2	1,31
Turístico-riego	1	0,5
Turístico-riego-consumo humano	1	1,42
Turístico-consumo humano	3	0,227
Industrial	1	10
Consumo Humano	26	34,64
<b>TOTAL</b>	<b>34</b>	<b>48,097</b>

En el área de estudio, según el SINIGIRH (2020), se encuentran registrados 62 manantiales de las cuales 20 no poseen información de uso y caudal, los demás manantiales poseen los siguientes usos y caudal asociados (Tabla 20).

Tabla 20. Usos del agua para los manantiales registrados en el SINIGIRH.

Tipo de Uso	Cantidad	Caudal extraído (l/s)
Turístico	8	6,97

Turístico, riego y consumo humano	4	0,2
Turístico y consumo humano	2	0,1
Turístico, consumo humano y agropecuario	2	0,14
Riego, consumo humano y agropecuario	2	9,47
Consumo humano	21	19,14
Consumo humano y agropecuario	3	0,14
<b>TOTAL</b>	<b>42</b>	<b>36,16</b>

En la figura 44 se muestra la distribución de pozos y manantiales mencionados anteriormente.

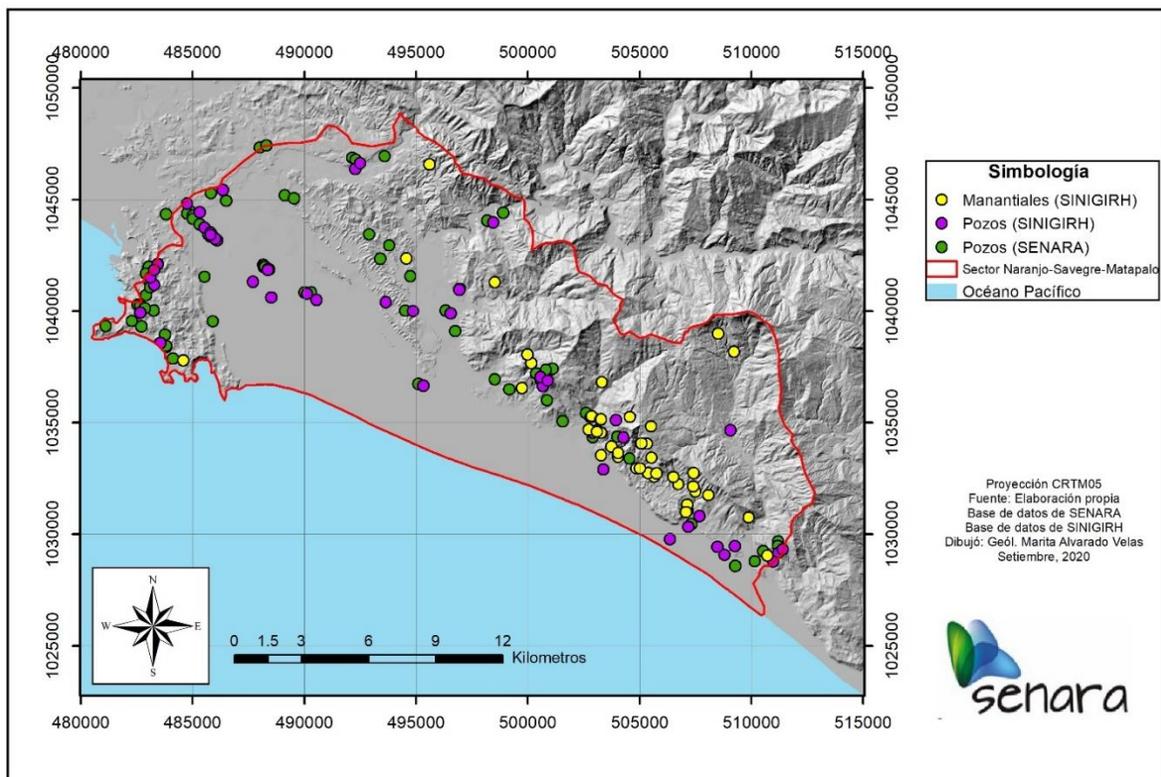


Figura 44. Pozos y manantiales, cuenca Naranjo- Savegre y Matapalo, fuente (SENARA-SINIGIRH, 2020).

### 3.4.2 Aforos diferenciales

Según la base de datos del SENARA en la zona de estudio Naranjo-Savegre-Matapalo se registran un total de 10 aforos ubicados en los cauces de los ríos Hatillo Nuevo, Naranjo y Savegre. En la tabla 21 se presenta un resumen de la información de cada sitio y en la figura 45 se muestra la ubicación y distribución de los mismos.

Tabla 21. Aforos según la base de datos del SENARA.

Aforo	Cauce	Latitud	Longitud	Fecha de aforo	Caudal (l/s)
NSM-1	Río Hatillo Nuevo	1028704	509933	31/03/1965	365
NSM-2	Río Naranjo	1046297	492268	04/02/1959	3415
NSM-3	Río Naranjo	1046297	492268	07/04/1959	3775
NSM-4	Río Naranjo	1046297	492268	24/03/1980	4597
NSM-5	Río Naranjo	1046297	492268	05/03/1981	6938
NSM-6	Río Savegre	1041952	495021	08/02/1959	14325
NSM-7	Río Savegre	1041952	495021	08/04/1959	9489
NSM-8	Río Savegre	1036207	497327	31/03/1965	11826
NSM-9	Río Savegre	1041952	495021	24/03/1980	8564
NSM-10	Río Savegre	1041952	495021	05/03/1981	12363

Los aforos anteriores corresponden con datos muy puntuales que únicamente reflejan el caudal que pasaba por la sección en un momento dado, pero no permiten realizar algún tipo de interpretación con respecto al comportamiento efluente o influente del río.

Castro (2010) reporta la existencia de 40 aforos en el río Naranjo y otras quebradas que descargan en este colector principal. Los aforos fueron realizados en el año 2006 por parte de la cuadrilla de aforos del AyA. La información de estos aforos y su ubicación en el área de estudio se observan en la tabla 22 y la figura 45.

Tabla 22. Aforos elaborados por la UEN, Gestión Ambiental del AyA (2010).

Aforo	Río	Latitud	Longitud	Caudal (l/s)
RN-2	Río Naranjo	494776	1048113	9414
RN-3	Río Naranjo	494390	1048149	7684
RN-4	Río Naranjo	493907	1047070	8108
RN-5	Río Naranjo	493180	1041546	8692,30
RN-6	Río Naranjo	492307	1046327	6744
RN-7	Río Naranjo	491235	1045907	10321
RN-8	Río Naranjo	489914	1041265	7522
RN-9	Río Naranjo	488671	1046149	7224
RN-10	Río Naranjo	488060	1045053	5600

RN-10	Río Naranjo	488060	1045053	6466
RN-11	Río Naranjo	487614	1044090	5251
RN-12	Río Naranjo	487162	1042806	5710
RN-13	Río Naranjo	487082	1042589	5670
RN-14	Río Naranjo	486701	1041396	5827
RN-15	Río Naranjo	486371	1040831	5047
RN-15	Río Naranjo	486371	1040831	6382
RN-16	Río Naranjo	486178	1040239	2524
QM-1	Quebrada Marucha	494809	1047496	8,26
QG-1	Quebrada Galera	491400	1045848	24,10
QV-1	Quebrada Villa	488207	1043626	Seca
QV-2	Quebrada Villa	488031	1043211	37,62
QV-3	Quebrada Villa	487165	1042747	51,34
QG-1	Quebrada Guapinol Guapil	490706	1046937	15
QG-2	Quebrada Guapinol Guapil	487772	1046213	3,90
QG-3	Quebrada Guapinol Guapil	487327	1045615	Seca
QG-4	Quebrada Guapinol Guapil	486283	1045009	27
QG-5	Quebrada Guapinol Guapil	485421	1044280	49
QG-6	Quebrada Guapinol Guapil	485022	1043990	42
QG-7	Quebrada Guapinol Guapil	485442	1042163	87
QS-1	Quebrada Salas	486460	1045261	21
QGR-1	Quebrada Grande	482759	1041152	3
QGR-2	Quebrada Grande	484549	1042155	2,90
QGR-3	Quebrada Grande	485001	1042578	4,60
QGR-4	Quebrada Grande	485188	1042337	3,71
QB-1	Quebrada Borbollon	486641	1043587	91,30
QB-2	Quebrada Borbollon	486185	1042992	116
QB-3	Quebrada Borbollon	485688	1042221	242
QB-4	Quebrada Borbollon	485708	1041746	329
QB-5	Quebrada Borbollon	486249	1040511	703
QB-5	Quebrada Borbollon	486249	1040511	667

De acuerdo con lo anterior, Castro (2010) determinó tramos influentes y efluentes, así como el caudal (en l/s) ganado o perdido por el río o quebradas. Asimismo, destacó que las zonas influentes se dan principalmente en los sectores donde el aluvión es más permeable y además donde se encuentra un control estructural como diaclasas o zonas de falla, cuyos planos de debilidad permiten la infiltración del agua superficial hacia el acuífero, tal como ocurre cerca del poblado de Naranjito.

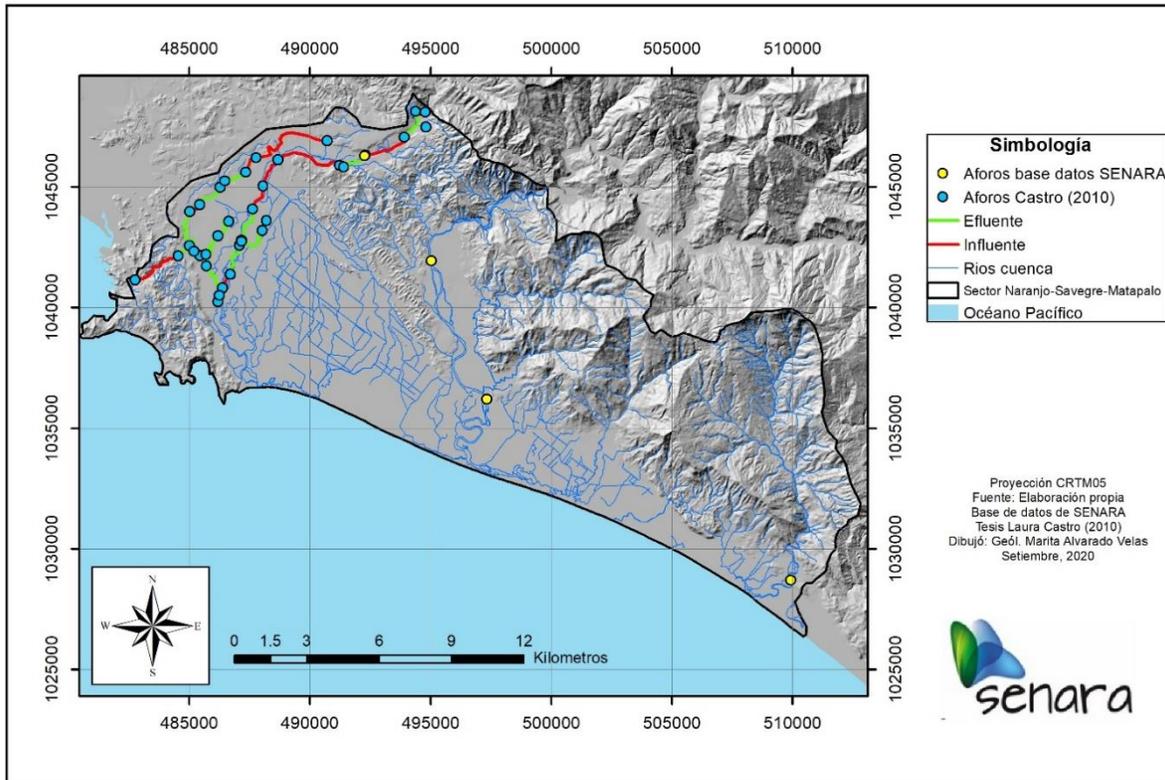


Figura 45. Ubicación de aforos en la zona de estudio Naranjo - Savegre - Matapalo.

### 3.4.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual

A partir de la información geológica e hidrogeológica se definieron dos acuíferos; uno almacenado en los Depósitos Aluviales y el otro en la Formación Térraba (Figura 46).

- ✓ Acuífero de Depósitos Aluviales

Este acuífero es libre, asociado a Depósitos Aluviales que sobreyacen a la Formación Térraba y Formación Punta Carballo. Se extiende en el área de estudio de

norte a sur en los alrededores de los ríos Naranjo y Savegre hasta alcanzar los sectores noroeste y sureste de la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo. Entre los poblados que se ubican a lo largo de los Depósitos Aluviales cabe mencionar los siguientes: Managua, Londres, Llamaron, Bartolo, Roncador, Llorona, Mona, Delicias, Finca Marítima, Delicias, Pao, Pasito, Matapalo y Silencio.

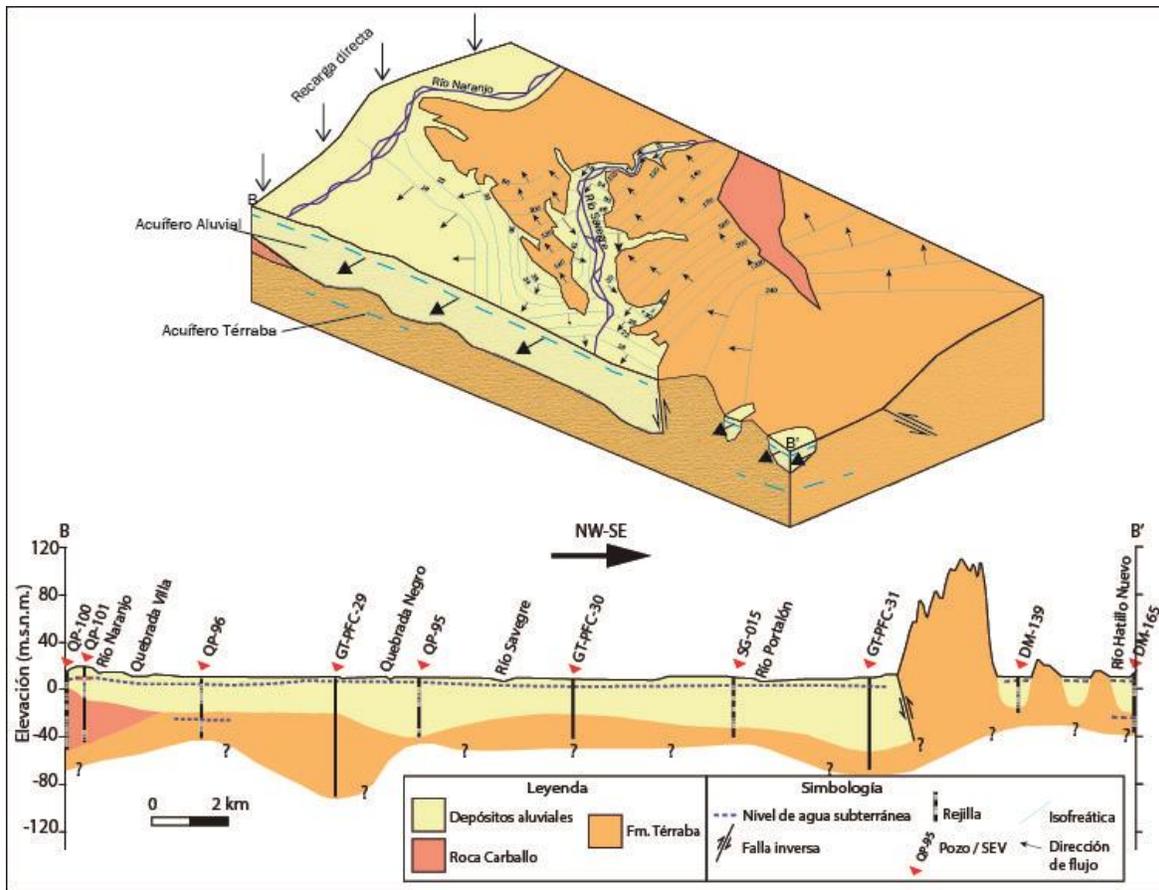


Figura 46. Modelo Hidrogeológico Conceptual.

Los Depósitos Aluviales que albergan el acuífero corresponden con materiales limo arenosos con grava, café, mezclado con lentes de gravas arenosas, gravas gruesas y arcillas aisladas, presenta un espesor mínimo y máximo aproximado de 10 y 50 m respectivamente. En algunos sitios, como por ejemplo en los alrededores de la Managua, en la parte superior desarrolla un suelo limo-arcilloso con un espesor aproximado entre 1 y 4 m, aunque no siempre se presenta esta condición. Debido a la

heterogeneidad del medio de los Depósitos Aluviales, no es posible representar la geometría de los todos los estratos que lo conforman.

Los pozos analizados que captan este acuífero son, en su mayoría, de tipo artesanales, aunque también existen perforados y en menor cantidad de investigación. Las profundidades no superan los 65 m b.n.s y presentan niveles de agua subterránea que varían entre 0,53 y 10 m b.n.s y los caudales de producción van desde 0,5 l/s hasta 10 l/s. Asimismo, las transmisividades se encuentran entre 1,45 m<sup>2</sup>/d (QP-13) y 267,8 m<sup>2</sup>/d (QP-91), aunque también se han reportado transmisividades de 1567 m<sup>2</sup>/d (QP-92). En el piezómetro QP-101 se calcularon permeabilidades entre 52,31 m/d y 251,72 m/d para los aluviones con matriz arenosa y las arenas sin consolidar, respectivamente. En el DM-138 se calculó un coeficiente de almacenamiento de  $2,7 \times 10^{-3}$ .

En la figura 47 se observan las líneas equipotenciales en los depósitos aluviales entre 2 y 98 m s.n.m. Las líneas de flujo se trazan perpendiculares a las equipotenciales, las cuales muestran una dirección de flujo preferencial hacia el sur-suroeste con un gradiente hidráulico promedio de 0,03 en la parte norte del río Savegre. En el sector central de los depósitos aluviales, al sur del área de estudio, las líneas se presentan más espaciadas, lo que evidencia una disminución del gradiente hidráulico promedio el cual es de 0,004 y en el sector sureste de los depósitos aluviales en la cuenca de interés el gradiente hidráulico promedio es de 0,01.

Castro (2010) determinó que en la parte superior de la cuenca del río Naranjo el agua subterránea se mueve de SW a EW con un gradiente hidráulico promedio de 0,04; mientras que en la parte media y baja el movimiento se da hacia el SSW, en dirección hacia el mar, con gradiente hidráulico promedio de 0,007.

La recarga de este acuífero proviene principalmente de la precipitación, mientras que la descarga ocurre principalmente hacia los lechos de los ríos y en menor proporción por pozos de extracción principalmente por la ausencia de manantiales en esta unidad.

#### ✓ Acuífero Térraba

El segundo acuífero se encuentra albergado en rocas de la Formación Térraba, distribuidas en los sectores nor-noreste del área de estudio, donde se ubican los poblados de Sábalo, Bijagual, Santo Domingo, Dos Bocas y San Andrés. Corresponde con un acuífero libre cubierto por capas de cobertura irregular de limos, arcillas y arenas

finas producto de la meteorización de lutitas y areniscas y por depósitos de coluvios. La unidad hidrogeológica está constituida por rocas sedimentarias principalmente lutitas y areniscas medias y finas que presentan alto grado de fracturación lo cual facilita el paso del agua.

Los pozos que captan este acuífero poseen profundidades que van desde los 40 m b.n.s hasta los 140 m b.n.s, caudales explotables desde 0,02 l/s hasta 2,15 l/s, niveles de agua subterránea desde los 11 m b.n.s hasta 68 m.b.n.s, además presentan transmisividades desde 22 m<sup>2</sup>/d (DM-150) hasta 52 m<sup>2</sup>/d (SG-14). En el QP-94 se determinó una permeabilidad máxima para los depósitos de esta unidad hidrogeológica de 4,07 m/d.

Las líneas equipotenciales se encuentran entre 240 y 60 m s.n.m (Figura 47). Las líneas de flujo muestran una dirección preferencial hacia el noroeste con un gradiente hidráulico de 0,01 en la mayor parte de la Formación Térraba, mientras que en el sector este de la formación, las líneas se presentan más espaciadas, lo que evidencia una disminución en el gradiente hidráulico a 0,005.

El alto grado de fracturación de las areniscas y lutitas favorece que la precipitación se infiltre hacia el acuífero generando una recarga principalmente directa.

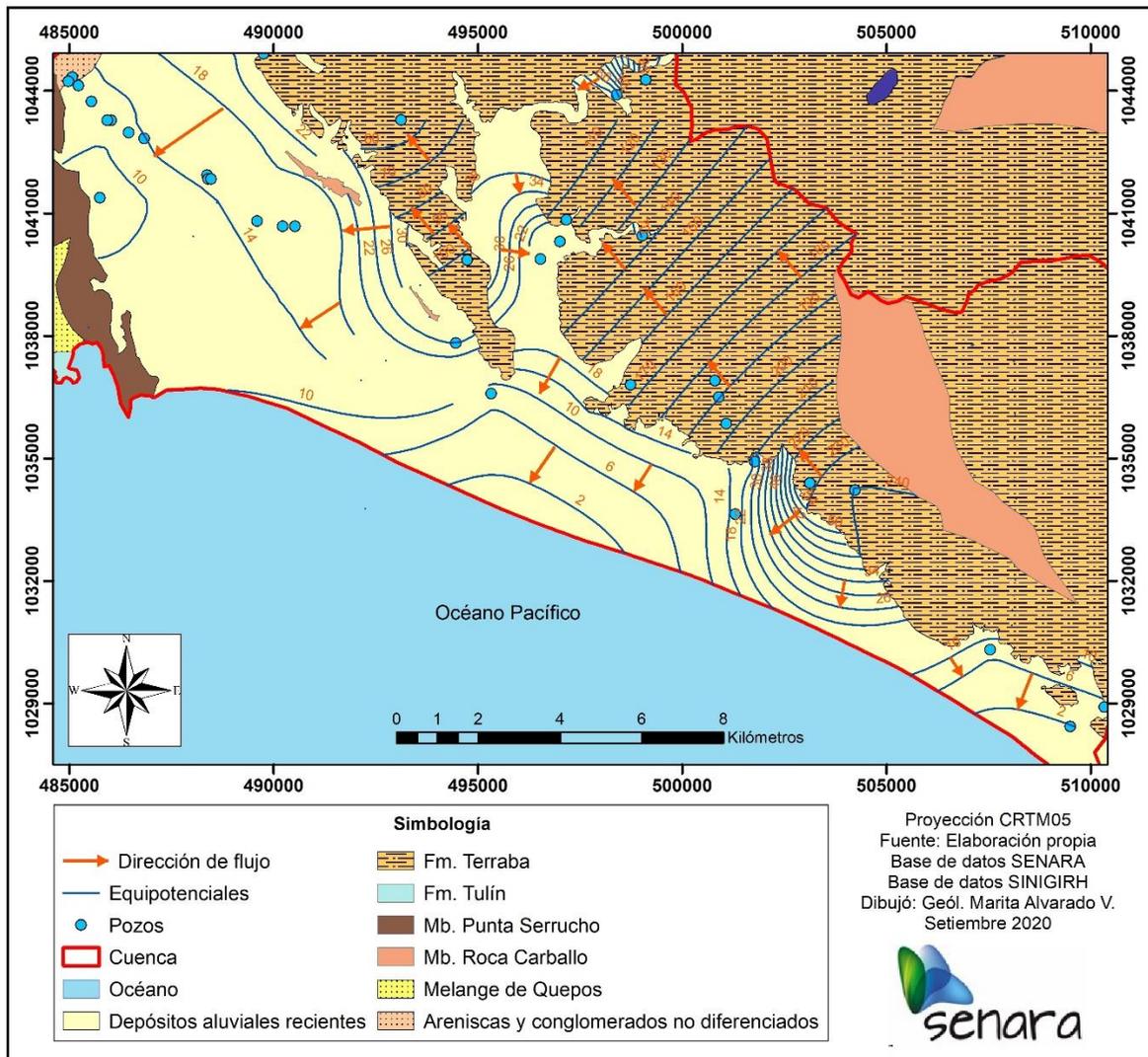


Figura 47. Equipotenciales, cuenca Naranjo - Savegre - Matapalo.

### 3.5 Sector Dominical – Ballena

#### 3.5.1 Inventario de pozos

En la base de datos del SENARA se cuenta con el registro de 214 pozos y 7 manantiales ubicados dentro del área de estudio Dominical – Ballena. De estos 214 pozos, 11 corresponden con los piezómetros exploratorios perforados por el SENARA como parte de la investigación, y además 171 cuentan con información litológica para la definición del modelo hidrogeológico conceptual (Figura 48).

Por otra parte, en la plataforma del SINIGIRH, según consulta realizada el 03 de setiembre del 2020, se contabilizan 362 expedientes de concesiones de aprovechamiento de agua para distintos usos (Figura 48).

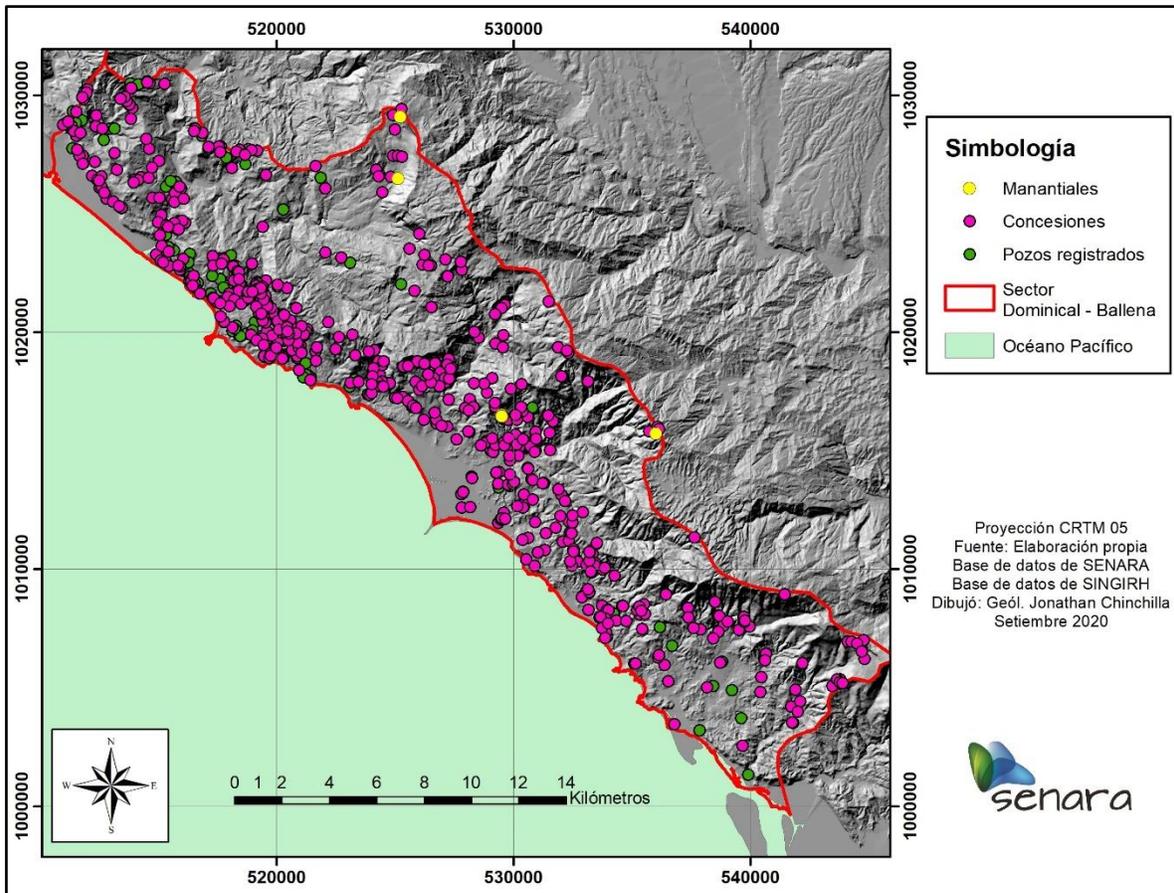


Figura 48. Pozos, manantiales y concesiones registradas en la zona de Hermosa y Esterillos.

Como parte de las labores de investigación, se procedió con la búsqueda de pozos en el campo para conformar una red de monitoreo, en la cual se pudiera medir a lo largo del año la fluctuación de niveles del agua subterránea, su temperatura y la conductividad eléctrica. La medición de niveles fue realizada en forma bimensual desde junio del 2019 a noviembre del 2020.

En total se inventariaron en campo 101 pozos y 3 nacientes, de los cuales 58 pozos son excavados y 43 perforados. De los 43 pozos perforados 11 corresponden con los piezómetros de investigación realizados por el SENARA en el área de estudio. Por otra parte, de los 101 pozos inventariados, solamente en 75 de ellos se ha logrado realizar el monitoreo parámetros desde junio del 2019.

La información de la base de datos del SENARA fue filtrada para seleccionar únicamente los reportes de perforación que contaban con información litológica, posteriormente de estos reportes se extrajo la información de importancia

hidrogeológica tal como el diseño, litología, profundidad, ubicación, profundidad del nivel de agua, pruebas de bombeo, uso, caudal de extracción, entre otros (Anexo 1).

En cuanto al uso del agua subterránea extraída de los pozos, la base de datos del SENARA reporta los usos de abastecimiento público, doméstico, riego, turismo o la combinación de estos. La tabla 23 muestra la cantidad de pozos reportados en SENARA para cada uso o sus combinaciones, así como el caudal total extraído en cada uso. Según esta información el caudal total extraído en la zona Dominical – Ballena es de 297,372 l/s, aunque cabe mencionar que se tienen un total de 22 pozos sin información de caudal extraído que no han podido ser considerados en este recuento.

Según la información de SENARA, el uso doméstico es el principal en cuanto a la utilización del recurso hídrico con 166,184 l/s, seguido de las combinaciones para uso doméstico y riego (43,35 l/s) y turismo, doméstico y riego (40,418 l/s). Los demás usos se ubican bajo los 20 l/s (Tabla 23).

Por otra parte, los registros del SINIGIRH indican la utilización del recurso hídrico para consumo humano, riego, turismo, agropecuario, comercial o la combinación de estos, no se reportan usos de tipo industrial o agroindustrial. La tabla 24 muestra los distintos usos reportados en el SINIGIRH y el total de caudal concesionado para cada uso. Es importante mencionar, que en este caso un mismo expediente puede estar asociado a varios usos, por lo que en la tabla 24 el mismo expediente puede haberse contabilizado varias veces pero separando los caudales para cada uso respectivo. Esto es importante, ya que el lector podría confundirse y a simple vista obtener una cantidad mayor de expedientes a los 362 reportados en la base de SINIGIRH. Sin embargo, lo importante es que se han logrado separar los distintos caudales concesionados para cada uso y que no existe duplicidad en la información ingresada.

Tabla 23. Usos del agua para los pozos registrados en SENARA.

Tipo de Uso	Cantidad	Caudal extraído (L/s)
Doméstico y riego	33	43,35
Doméstico	104	166,184
Abastecimiento público	3	8,42
Turístico	8	17,36
arios	1	2,28
Riego y turístico	6	9,5

Doméstico y turístico	4	7,86
Turístico, doméstico y riego	19	40,418
No indica	1	0,4
Riego	2	1,6
Piezómetros	11	0
Abastecimiento público	1	-
Doméstico	7	-
Doméstico y riego	10	-
Doméstico y turístico	1	-
Turístico	3	-
<b>TOTAL</b>	<b>214</b>	<b>297,372</b>

Según los registros del SINIGIRH en la zona Dominical – Ballena se tienen concesionados un total de 103,24 l/s, aunque se debe mencionar que en este caso se identificaron un total de 65 expedientes de concesiones sin información de caudal, que no han podido ser considerados en el recuento. En SINIGIRH el uso para consumo humano corresponde con el más concesionado con 50,93 l/s, seguido del riego (26,47 l/s) y el uso turístico (24,52 l/s).

Tabla 24. Usos del agua para las concesiones mostradas en el SINIGIRH.

Tipo de Uso	Cantidad	Caudal concesionado (L/s)
Consumo humano	273	50,93
Riego	46	26,47
Turístico	82	24,52
Agropecuario	18	1,27
Agroindustrial	0	0
Industrial	0	0
Comercial	2	0,05
Expedientes sin información de caudal	65	-
<b>TOTAL</b>		<b>103,24</b>

### 3.5.2 Aforos diferenciales

En la base de datos del SENARA se registran un total de 8 aforos para la zona de estudio Dominical – Ballena, los cuales se ubican en los cauces de los ríos Barú, Guabo e Higuerón, también conocido como río Morete. La ubicación de estos aforos se muestra

en la figura 49, mientras que en la tabla 25 se presenta un resumen de la información recopilada en cada sitio.

Tabla 25. Aforos existentes en la base de datos del SENARA.

Aforo	Cauce	Latitud	Longitud	Años	Caudal (l/s)
DB-1	Río Barú	1023659	514987	30/03/1965	355
DB-2	Río Barú	1023659	514987	08/03/1981	3324
DB-3	Río Barú	1024490	519210	28/02/2013	612.4
DB-4	Río Barú	1026203	516300	28/02/2013	521.7
DB-5	Río Guabo	1026310	516135	30/03/1965	1139
DB-6	Río Higuerón	1020060	529023	28/02/2013	66.6
DB-7	Río Higuerón	1017244	527179	28/02/2013	252.5
DB-8	Río Higuerón	1015153	527067	28/02/2013	522

Los aforos DB-1, DB-2 y DB-5, son datos muy puntuales que únicamente reflejan el caudal que pasaba por la sección en un momento dado, pero no permiten realizar algún tipo de interpretación con respecto al comportamiento efluente o influente del río.

Ahora bien, para el caso de los aforos DB-3 y DB-4 en el río Barú, realizados en febrero del 2013 y ubicados a más de 3 kilómetros de distancia entre sí, se observa una disminución en el caudal de 90,7 l/s.

Con respecto a los aforos DB-6, DB-7 y DB-8, realizado en febrero del 2013 a lo largo del cauce del río Higuerón, muestran un incremento del caudal de 455,6 l/s. Este incremento puede interpretarse como un comportamiento de tipo efluente para esta sección en el cauce, en el cual el río está recibiendo aportes desde el acuífero en la Formación Terraba.

Por otra parte, Arias (2018) reporta la existencia de 21 aforos en la cuenca del río Barú y 32 aforos en la cuenca del río Guabo que fueron realizados en el año 2010 por parte de la Dirección UEN de Gestión Ambiental del AyA. La información de estos aforos y su ubicación en el área de estudio se observan en la tabla 26 y la figura 49.

Tabla 26. Aforos elaborados por la UEN, Gestión Ambiental del AyA (2010).

Aforo	Río	Latitud	Longitud	Caudal (l/s)
G1	Río Guabo	1032619	517728	810
G2	Río Ángel antes unión con el Guabo	1032629	517638	1012
G3	Río Guabo	1032526	517635	1865
G4	Río Guabo	1031986	516851	1871
G5	Río Guabo	1031524	516865	1672
G6	Río Guabo	1031112	516497	2005
G7	Río Guabo	1031410	516714	2005
G8	Río Caña Blanca antes unión Guabo	1031195	516674	365
G9	Río Guabo	1031018	516387	2761
G10	Río Guabo	1031035	516179	2658
G11	Quebrada antes unión con Guabo	1031094	516169	13
G12	Río Guabo	1031066	516133	2194
G13	Río Guabo	1031075	516082	2675
G14	Quebrada antes unión con Guabo	1031084	515969	16
G15	Río Guabo	1030859	515970	1970
G16	Río Guabo	1030859	515926	2538
G17	Quebrada antes unión con Guabo	1030424	515875	1
G18	Río Guabo	1030212	515939	2433
G19	Río Guabo	1030064	515950	Aprox. 0.5
G20	Río Guabo	1030001	515902	1752
G21	Río Guabo	1029571	515866	2175
G22	Río Guabo	1029571	515866	2300
G23	Río Guabo	1029207	515372	2386
G24	Quebrada antes unión con Guabo	1029148	515336	3
G25	Río Guabo	1029114	515388	2970
G26	Quebrada antes unión con Guabo	1028860	515475	Aprox. 1
G27	Río Guabo	1028370	515778	1369
G28	Río Guabo	1028053	515786	2467
G29	Río Guabo	1027554	515976	2598
G30*	Río Guabo	1027309*	517635*	2570
G31	Río Guabo	1026792	515881	2547

G32	Río Guabo antes unión con Barú	1026322	516101	2660
B1	Río Barú antes unión con el Guabo	1026178	516279	658
B2	Río Barú después unión con Guabo	1026189	516082	3221
B3	Río Diamante antes unión con Barucito	1024680	520451	222.5
B4	Río Barucito antes unión Diamante	1024653	520495	477
B5	Río Barú después unión Barucito y Diamante	1024632	520420	730
B6	Río Barú	1024635	519985	442.5
B7	Río Barú	1024502	519272	450
B8	Q. Guayabales antes unión Barú	1024438	519255	28.1
B9	Río Barú después unión Q. Guayabales	1024470	519142	512.2
B10	Río Barú	1025149	518895	538
B11	Río Barú	1025435	518798	567.8
B12	Río Barú antes unión Q. Farallas	1025548	518524	453
B13	Q. Farallas antes unión Barú	1025597	518403	5.8
B14	Río Barú después unión Farallas	1025581	518397	451.9
B15	Río Barú	1025457	517943	547
B16	Río Barú	1025880	517748	453.4
B17	Río Barú antes unión Q. Salto	1026288	517571	481
B18	Río Barú abajo unión Q. Cacao	1026233	517381	382
B19	Río Barú	1026225	516769	401
B20	Río Barú antes unión Guabo	1026178	516279	616
B21	Río Barú después unión Guabo.	1026189	516082	3002

\*Coordenadas reportadas no coinciden con sitio de aforo.

A partir de estos aforos Arias (2018) demostró que el comportamiento de tipo efluente predomina en ambos cauces, evidenciándose así la conexión hidráulica con el acuífero. La condición efluente de estos cauces será considerada en el apartado de modelo hidrogeológico para la construcción de las equipotenciales de los acuíferos y la determinación de la dirección de flujo de las aguas subterráneas.

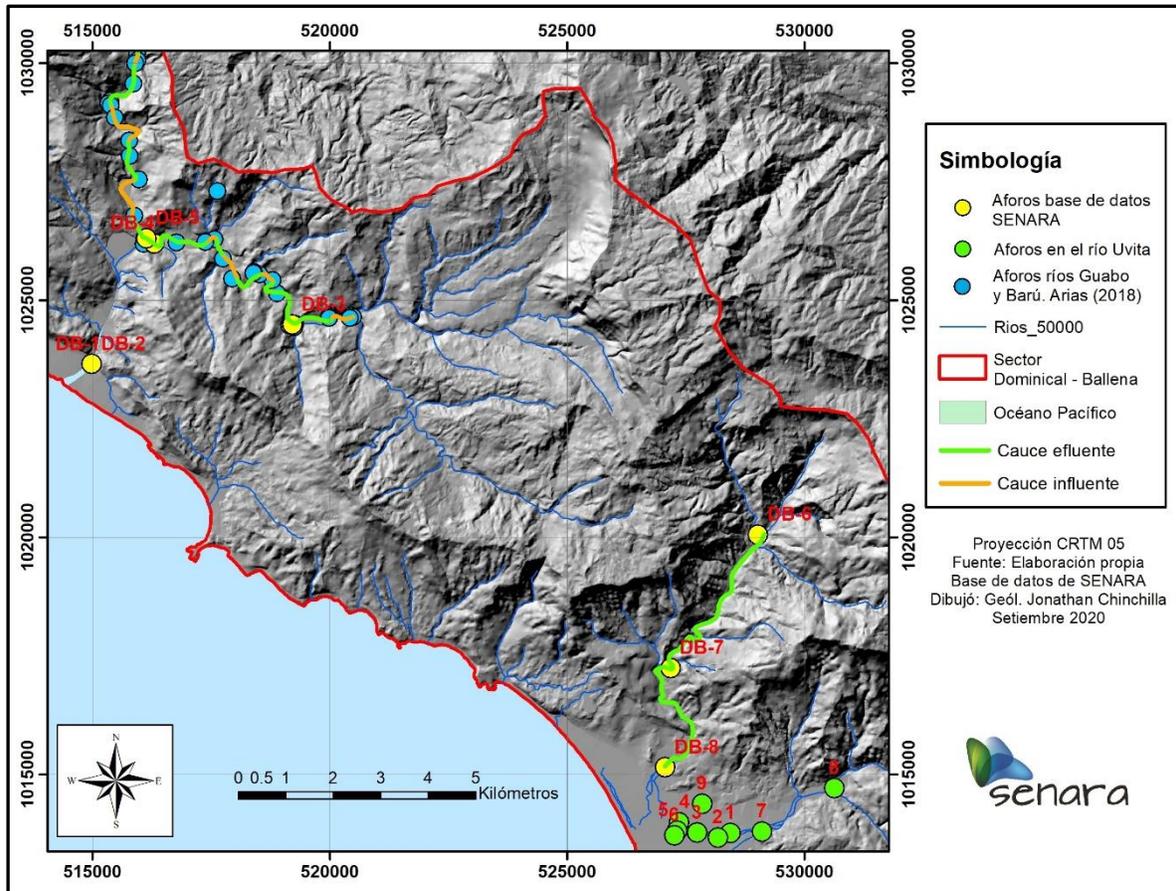


Figura 49. Ubicación de aforos en la zona de Dominical – Ballena.

Finalmente, hacia el centro del área de estudio, en el cauce del río Uvita, fueron realizados por parte del SENARA y durante la primera semana del mes de mayo del 2020, una serie de aforos diferenciales en distintos sectores a lo largo de su cauce y de algunos otros ríos y quebradas que le son tributarias. Estas mediciones fueron realizadas utilizando molinetes de la marca Gurley, específicamente los modelos 622 y 625D.

En la tabla 27 se presenta el resumen de los aforos diferenciales llevados a cabo en el río Uvita y algunos tributarios. Adicionalmente, en la figura 50 se muestra con detalle la ubicación de estos aforos a lo largo del río, su caudal, y el comportamiento interpretado para cada tramo del cauce.

Tabla 27. Aforos realizados en el cauce del río Uvita y otros cauces tributarios.

Aforo	Cauce	Latitud	Longitud	Caudal (l/s)
Q1	Río Uvita	1013773	528439	1417.8
Q2	Río Uvita	1013671	528179	1093.2
Q3	Río Uvita	1013777	527739	911.2
Q4	Quebrada (Margen derecha)	1013997	527363	44.3
Q5	Río Uvita	1013819	527316	672.1
Q6	Quebrada (Margen izquierda)	1013719	527258	48.9
Q7	Río Uvita	1013802	529102	782.6
Q8	Río Uvita	1014721	530633	229.4
Q9	Quebrada (Margen derecha)	1014386	527844	10.2

Entre los sitios de aforo Q7 y Q1 (Figura 50) se observa un incremento en el caudal de 635,2 l/s, lo que sugiere la existencia de un aporte de agua subterránea desde el acuífero hacia el río, y que se ha interpretado como un comportamiento de tipo efluente en este sector del cauce.

Esta zona, entre los sitios Q7 y Q1 (Figura 50), corresponde precisamente con un área de transición entre la Formación Térraba y la zona de planos aluviales del río Uvita, por lo que se ha interpretado, que posiblemente este aumento esté relacionado precisamente con la zona de descarga de parte de las aguas subterráneas provenientes del acuífero en la Formación Térraba, las cuales aportarían caudal tanto al cauce del río Uvita como a los depósitos aluviales.

En una quebrada sin nombre localizada hacia el NW del río Uvita, entre los sitios de aforo Q9 y Q4, se ha interpretado también la existencia de un comportamiento de tipo efluente en el cauce, en el cual el agua subterránea del acuífero aluvial estaría generando un incremento de 34,1 l/s.

A lo largo del río Uvita, entre los sitios de aforo Q1 a Q5 (Figura 50), se nota una disminución progresiva en el caudal de 745,1 l/s, lo cual indica un comportamiento de tipo influente en esta sección, en la cual el río aporta agua al acuífero al generarse infiltración en el lecho del cauce. Finalmente, a partir del sitio de aforo Q5 y hasta la desembocadura en el mar, no fue posible realizar aforos debido a que esta es una zona con una importante influencia de las mareas.

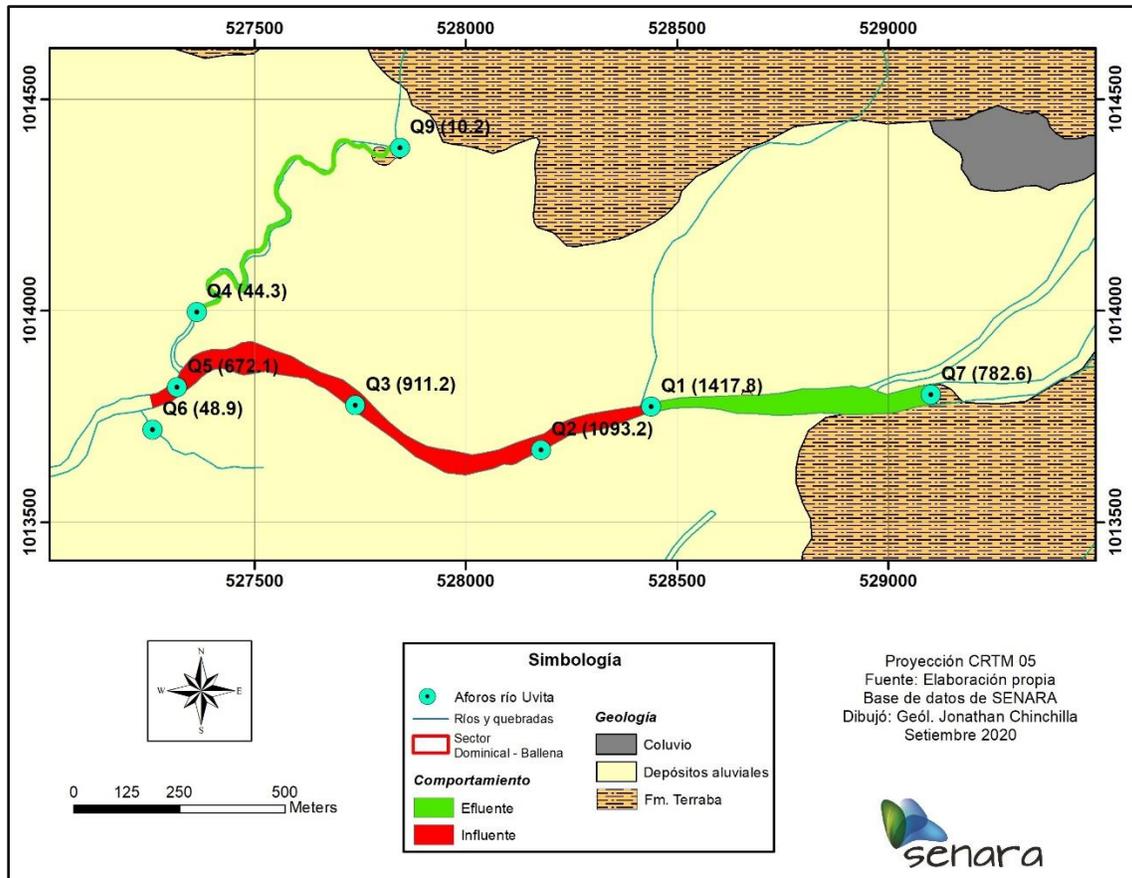


Figura 50. Ubicación de aforos en el río Uvita y comportamiento de efluencia - influencia.

### 3.5.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual

En general, esta zona presenta un modelo geológico bastante homogéneo, en el que hacia los sectores montañosos de la Fila Costeña se presentan rocas asociadas a la Formación Térraba, mientras que en las zonas planas cercanas a la costa se ubican depósitos de tipo aluvial sobreyaciendo al basamento conformado por la misma Formación Térraba. Adicionalmente, se localizan rocas de la Formación Puerto Nuevo intruyendo los materiales sedimentarios de la Formación Térraba. Según la información disponible, tanto las rocas de la Formación Térraba, como de Puerto Nuevo y los Depósitos Aluviales Recientes, tienen la capacidad de generar acuíferos, aunque de muy diferente potencial y extensión en función de su génesis y propiedades hidráulicas.

De esta forma, en la zona de estudio se tiene la presencia de un sistema que incluye varias unidades hidrogeológicas acuíferas, siendo las principales las rocas asociadas con la Formación Térraba y los depósitos aluviales recientes. En este sistema, parte del agua de precipitación se infiltra en el terreno y se incorpora al flujo subterráneo

como recarga. De modo muy general, la tendencia del flujo subterráneo en el área de estudio es predominantemente hacia el SW, en donde va a descargar directamente al mar o previamente en algunos cursos superficiales. Es muy probable que exista conexión hidráulica entre las distintas unidades acuíferas, sin embargo, la información hidrogeológica disponible no ha permitido comprobar con total certeza esta condición. Los perfiles hidrogeológicos de las figuras 18, 19 y 20 muestran el modelo hidrogeológico general para distintos sectores del área estudiada.

Se describe a continuación las principales características hidrogeológicas de las unidades acuíferas presentes en el área de estudio.

#### ✓ Formación Térraba

Se origina en rocas sedimentarias (lutitas, areniscas y gravas) con presencia principalmente de porosidad secundaria debido al fracturamiento de las rocas por tectonismo y meteorización, aunque también presenta un componente de porosidad primaria debido al origen de las rocas (sedimentarias). Corresponde con el acuífero más explotado en la zona de estudio, reportándose en la base de datos del SENARA un total de 189 pozos de extracción, así como 28 pozos adicionales que fueron inventariados en las labores de campo y que se incorporaron en la red de monitoreo de niveles. Adicionalmente, en la base de concesiones del SINIGIRH se reportan 202 expedientes para aprovechamiento de aguas de manantiales que representan un caudal total de 52,87 l/s.

Por otra parte, en la base de datos del SENARA se registran también 7 manantiales cuya información básica se incorpora en la tabla 28.

Tabla 28. Manantiales registrados en la base de datos de SENARA.

Código	Propietario	Latitud	Longitud	Uso
NAC-182	AYA	1026492	525130	Abastecimiento Público
NAC-7	AYA	1029091	525233	Abastecimiento Público
NAC-85	AYA	1015733	536014	Abastecimiento Público
NAC-2459	ASADA UVITA	1016425	529548	Consumo Humano
NAC-2460	ASADA UVITA	1016445	529524	Consumo Humano
NAC-2461	ASADA UVITA	1016470	529512	Consumo Humano
NAC-2462	ASADA UVITA	1016466	529517	Consumo Humano

El 66,07% de los caudales de extracción se localizan bajo los 2 l/s, un 33,3% corresponden con pozos de caudales entre los 2 a 5 l/s y solamente se tiene registro de un pozo con un caudal extraordinario de 8,34 l/s (DM-136).

En este mismo sentido, luego de un tamizaje de la información reportada, se cuenta con el registro de 57 pozos con pruebas de bombeo realizadas para la Formación Térraba. De estos 57 pozos, 20 reportan transmisividades menores a los 10 m<sup>2</sup>/d (0,52 a 9), 25 con transmisividades entre los 10 a 100 m<sup>2</sup>/d (10 a 96) y solamente 12 con transmisividades superiores a los 100 m<sup>2</sup>/d (115 a 527). Estas diferencias en los datos de transmisividad pone en evidencia la variabilidad del medio y la influencia que pueden tener sobre estos parámetros la granulometría de las litologías, así como el fracturamiento y meteorización de los materiales. Incluso, en algunos casos se llegan a reportar pozos de hasta 110 metros de profundidad totalmente secos, tal es el caso del pozo DM-131 ubicado al nor-oeste de Uvita.

La mayoría de datos con transmisividades por debajo de los 100 m<sup>2</sup>/d se localizan hacia el NW del área de estudio, desde la zona de Dominicalito y Escaleras hasta Dominical y Hatillo, sin embargo, esta distribución no necesariamente indica que las condiciones del medio sean más desfavorables en esos sectores, sino que es posible que se deba a la existencia de una mayor cantidad de información de pruebas de bombeo asociadas a las perforaciones en ese sector. De hecho, analizando la ubicación de los valores, se considera que no es posible establecer con certeza un patrón de distribución para estos rangos, pudiendo tener en algunos sectores valores totalmente contrastantes, tal es el caso del pozo COR-34 con transmisividad de 25 m<sup>2</sup>/d y el pozo COR-23 con transmisividad de 527 m<sup>2</sup>/d, ambos localizados en la cuenca del río Uvita a solamente 340 metros de distancia. Esta condición refleja una vez más la heterogeneidad del medio y la importancia que a nivel local pueden ejercer las condiciones del acuífero sobre el potencial de extracción de agua subterránea.

La gran mayoría de pozos existentes en SENARA registran este acuífero como de tipo libre, sin embargo, se tiene el reporte de al menos 51 pozos en los que se indica algún grado de confinamiento para las aguas subterráneas. Ahora bien, tampoco ha sido posible establecer una distribución particular para los sectores confinados o libres en el acuífero, pudiendo registrar cambios en esta condición incluso entre pozos localizados

a menos de 100 metros entre sí, tal es el caso de la zona de Dominicalito o Escaleras, en la cual se ubica una alta densidad de pozos.

A partir del análisis de los pozos en que se registra algún tipo de confinamiento, si se ha podido determinar que en varios sectores de este acuífero se localizan de 2 a 3 niveles principales de aguas subterráneas. El nivel más superficial suele ubicarse a profundidades menores a los 40 metros aproximadamente, existen pozos en los cuales no se registra este nivel, y además no en todos los pozos presenta confinamiento. El segundo nivel se registra en la mayoría de los pozos a profundidades entre los 45 a 90 metros y según los registros este nivel se presenta confinado. Finalmente, el nivel más profundo también es de tipo confinado y se localiza a partir de los 100 y hasta los 140 metros de profundidad aproximadamente. El grado de confinamiento en este nivel más profundo es variable, y en aquellos pozos en que únicamente se llegó a registrar este nivel, la carga hidráulica generó ascensos de entre 4 y hasta 70 metros.

Los reportes de perforación indican espesores de saturación en el acuífero de hasta 126 metros, con localización de niveles estáticos muy variables entre los 3 y hasta los 160 metros de profundidad.

En cuanto a los mecanismos de recarga para este acuífero, se considera que los sectores libres tienen recarga directa por infiltración de un porcentaje de las aguas de precipitación en el terreno y la percolación hacia niveles más profundos, ahora bien, los niveles confinados que han sido registrados en ciertos pozos del área, sugieren también la existencia de recarga desde zonas localizadas topográficamente a mayor elevación, en las cercanías de las divisorias de aguas de la Fila Costeña.

La información de aforos ha demostrado que ciertos tramos de los ríos Uvita, Higuierón, Barú y Guabo presentan un comportamiento de tipo efluente, en el cual el acuífero le aporta caudal a los ríos. Esta condición ha sido considerada al momento de construir las curvas equipotenciales que representan la dirección de flujo predominante para el agua subterránea en el acuífero.

Solamente se ha logrado la elaboración de equipotenciales para ciertos sectores de la Formación Terraba, aun así, debido a su extensión se ha optado por mostrar estas equipotenciales por sectores, de tal manera que la escala de los mapas generados permita una visualización adecuada de la información.

Como se observa en las figuras 51, 52 y 53, la dirección de flujo predominante para el agua subterránea es hacia el SW, en dirección al mar, aunque en forma localizada pueden existir variaciones en la dirección de flujo, tal como sucede en las cuencas de los ríos Barú o Guabo, en donde parte del flujo subterráneo se dirige hacia el cauce principal, evidenciándose así el comportamiento de tipo efluente (Figuras 52 y 53). El gradiente hidráulico es variable y se ubica aproximadamente entre 0,09 hasta 0,35.

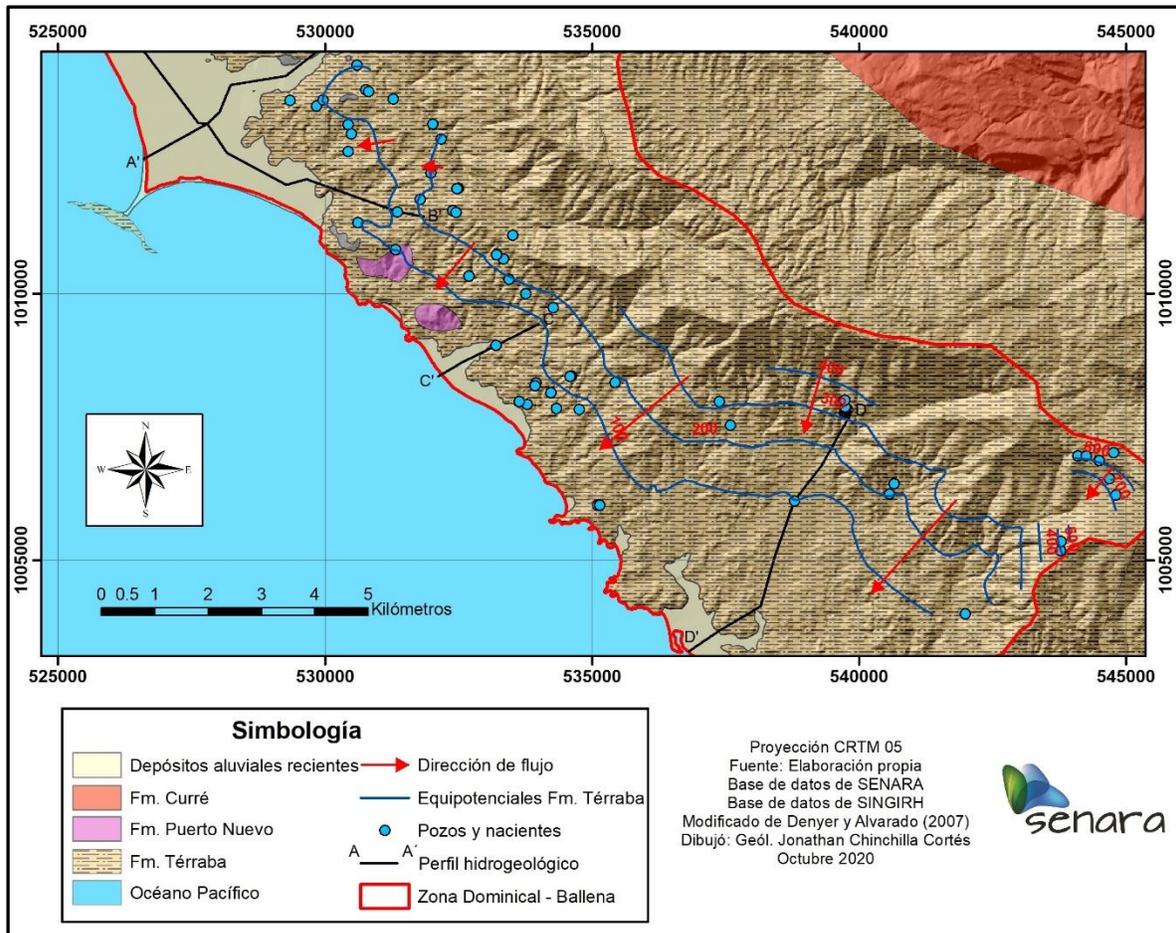


Figura 51. Equipotenciales de la unidad acuífera Térraba, sector Uvita-Ballena.

A partir de las direcciones de flujo determinadas, se interpreta que la descarga del agua subterránea se da en ciertos sectores en forma directa al mar, mientras que en las zonas de plano aluvial muy probablemente recarga en forma lateral los depósitos de tipo aluvial. También, parte de la descarga se da hacia algunos cursos superficiales debido al comportamiento efluente, como sucede en la cuenca del río Barú, Higuerón y Uvita. Otros mecanismos de descarga para este acuífero lo representan los abundantes

manantiales que se registran en la zona de estudio, así como la extracción artificial generada mediante pozos.

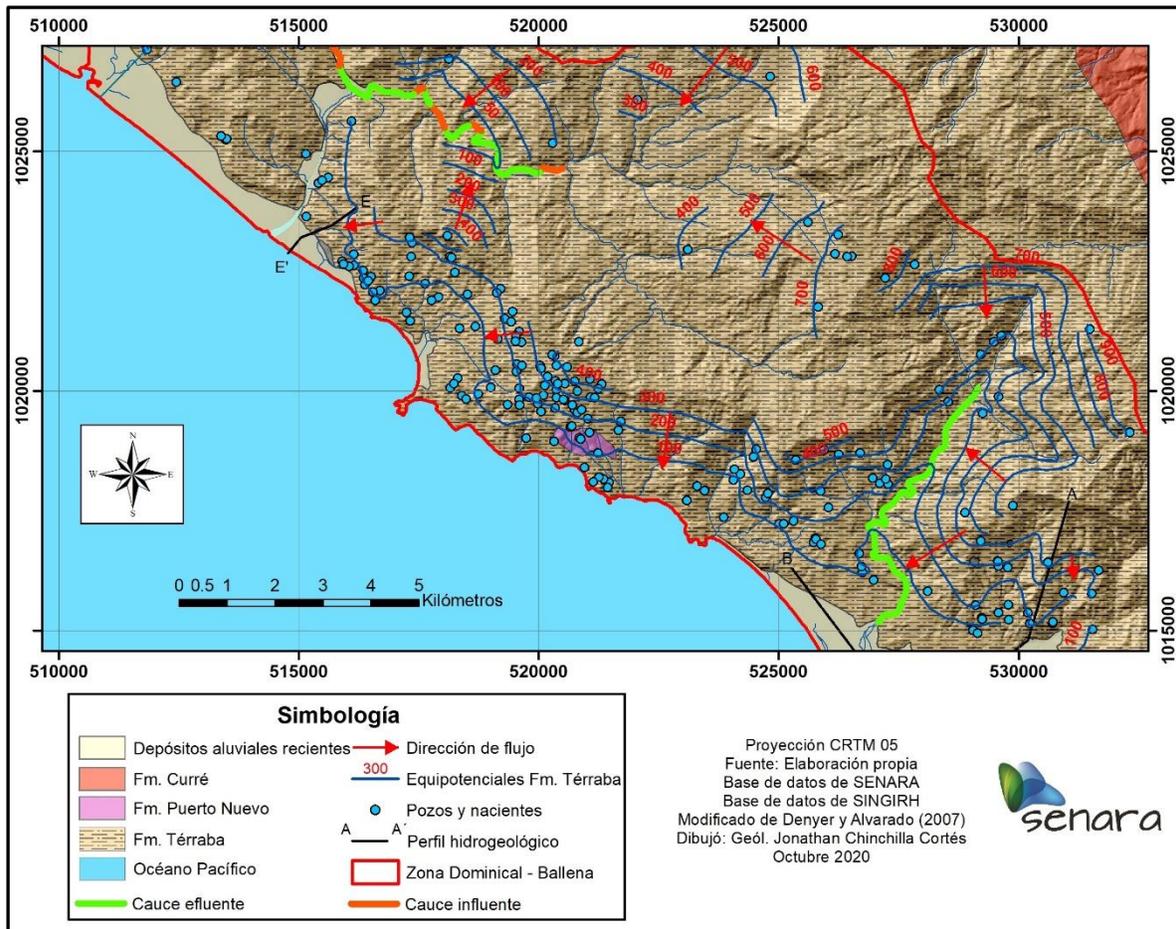


Figura 52. Equipotenciales de la unidad acuífera Térraba, sector Dominical-Uvita.

Todos los registros de conductividad eléctrica efectuados en los pozos de monitoreo indicaron valores por debajo de los 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Anexo 6), cumpliendo de esta forma con el valor recomendado según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, decreto 32327-S. Incluso, se tienen varios pozos de esta red (10, 12 (COR-48), 13 y 24) en que los valores son bajos y se ubican entre los 50 a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pudiendo estar relacionados con una rápida recarga del agua de precipitación.

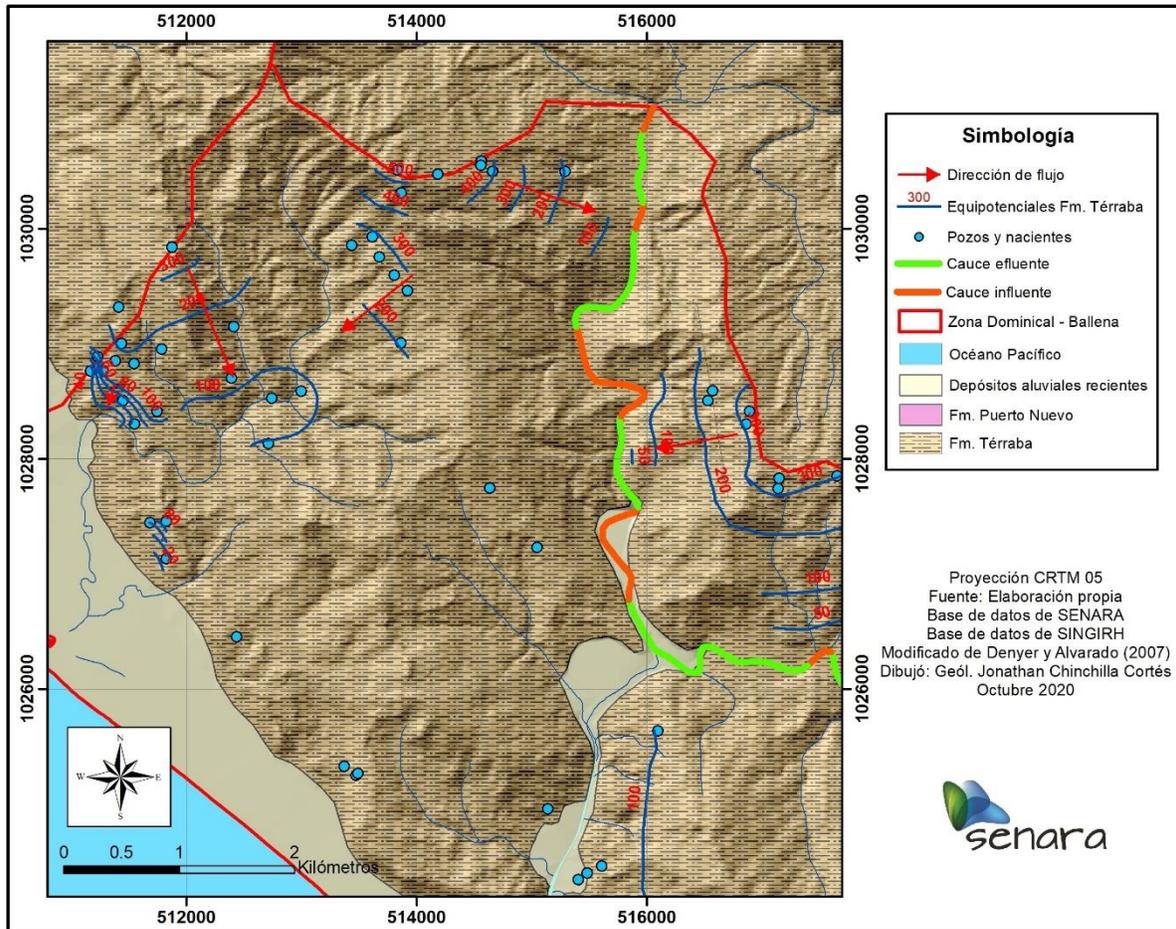


Figura 53. Equipotenciales de la unidad acuífera Terraba, sector Hatillo-Dominical.

Finalmente, a partir de los registros de pozos y análisis de laboratorio, se ha determinado que la cobertura de suelos que se desarrolla sobre esta unidad puede tener entre 1 y 32 metros de espesor (COR-42). Además, reflejando la relación con las rocas que los originan (lutitas, areniscas y gravas), los suelos se clasifican desde arcillas hasta gravas con presencia de arenas y limos, los valores de conductividad hidráulica determinados mediante la metodología de doble anillo se ubican entre 0,01 a 9,63 m/d, y la porosidad esta entre el 17,61 a 83,98% (Anexo 5).

✓ **Formación Puerto Nuevo**

La información sobre esta unidad es muy limitada, y se considera que debido a su naturaleza ígnea e intrusiva, únicamente tiene la capacidad de almacenar y transmitir el agua subterránea cuando presenta porosidad secundaria por fracturas generadas a partir de la actividad tectónica o la meteorización.

En la zona de estudio se reportan únicamente 8 pozos en esta unidad, aunque cabe mencionar que el pozo RE-28, con 135 metros de profundidad y un espesor de 79 metros de intrusivos reportados, se selló debido a que no se encontró nivel de agua subterránea.

Cinco de los pozos que captan este acuífero reportan caudales por debajo de los 3 l/s, mientras que los otros dos pozos restantes reportan un caudal de 4 l/s (DM-56) y 6 l/s (DM-57). En cuanto a la transmisividad del acuífero únicamente se tiene reporte de dos pruebas de bombeo en los pozos DM-159 y RE-14, en las que se determinó una transmisividad de 1.27 y 10 m<sup>2</sup>/d respectivamente. Adicionalmente, únicamente el pozo DM-159, localizado en la cuenca del río Barú, reporta un grado de confinamiento para las aguas subterráneas localizadas en esta unidad.

Los pozos reportan este acuífero con una cobertura de suelos limo-arcillosos rojizos o amarillentos de entre 3 y hasta 35 metros de espesor, así como de lutitas y areniscas asociadas con la Formación Térraba. Cuando se encuentra aflorando sobre el terreno, la recarga puede generarse por infiltración directa del agua de precipitación, o de lo contrario puede provenir de percolación vertical o recarga lateral a partir de los sedimentos saturados asociados con la Formación Térraba.

No fue posible la construcción de equipotenciales exclusivas para esta unidad debido a la poca cantidad de pozos que la captan, así como por su distribución en el área de estudio. Adicionalmente, por su naturaleza intrusiva y poca información disponible, tampoco se tiene conocimiento sobre la extensión que pueda tener esta unidad en profundidad.

La información sobre la cobertura de suelos desarrollados a partir de esta unidad es sumamente escasa y solamente se cuenta con dos datos de conductividad hidráulica y porosidad tomados en depósitos coluviales generados a partir de estas litologías. La conductividad hidráulica se ubica entre 0,67 a 1,24 m/d mientras que la porosidad va de 48,07 a 65,29% (Anexo 5).

#### ✓ Depósitos Aluviales

Estos acuíferos son de naturaleza porosa y se desarrollan en materiales sedimentarios recientes (gravas, arenas y limos) acarreados y depositados por los ríos y quebradas de la zona. La ubicación de los principales depósitos aluviales en que se

desarrolla esta unidad acuífera corresponde a las zonas de Hatillo – Dominical, Uvita, Ballena y Punta Mala.

En la base de datos del SENARA únicamente se reportan 6 pozos de extracción sobre esta unidad (COR-1, DM-1, DM-30, DM-129, DM-130 e ILG-23), no se reportan nacientes y se cuenta con 8 piezómetros exploratorios que la caracterizan. Además, en la base de concesiones del SINIGIRH solamente se reportan 8 expedientes de pozos sobre esta unidad, de los cuales 4 se encuentran inscritos u otorgados para un caudal total autorizado de apenas 1,8 l/s.

No obstante, a pesar de la poca información reportada en las bases de datos institucionales, durante la elaboración de este estudio el SENARA logró inventariar en el campo un total de 59 pozos, la mayoría de ellos excavados, que son utilizados en la zona principalmente para usos domésticos y turísticos.

Los informes de perforación de pozos y piezómetros exploratorios realizados en esta unidad no reportan un nivel de confinamiento para el acuífero. Por otra parte, se considera que la recarga a este acuífero se genera por infiltración directa de un porcentaje de la precipitación, aunque también es muy probable que se presente recarga lateral a partir de la unidad acuífera desarrollada en las rocas de la Formación Terraba. Adicionalmente, para la época de estiaje ciertos cauces representan un mecanismo de recarga importante para el acuífero debido a la existencia de sectores influentes, tal y como fue determinado mediante aforos realizados en la zona de Uvita.

A partir de las direcciones de flujo determinadas, se interpreta que la principal descarga natural del agua subterránea se da en forma directa al mar, aunque también se puede dar el aporte hacia algunos cursos superficiales debido al comportamiento efluente, como se evidenció en los aforos realizados en una quebrada sin nombre localizada hacia el NW de la cuenca del río Uvita (Figura 50).

Como se indicó anteriormente, los principales acuíferos aluviales se ubican en las zonas de Hatillo - Dominical, Uvita, Ballena y Punta Mala, aunque esto no es exclusivo para estos sitios, ya que también se han registrado este tipo de depósitos y pozos asociados en otros sectores mucho más limitados geográficamente, tal es el caso de Cambutal y Piñuela. Considerando su distribución en el área de estudio, así como la mayor disponibilidad de información hidrogeológica, se procede a continuación a describir con mayor detalle las condiciones acuíferas en las zonas mencionadas.

### Hatillo – Dominical

En este sector se registran 5 pozos en la base de datos del SENARA con caudales de extracción entre 0,5 y 2,5 l/s. Por otra parte, no se cuenta con pozos en que se haya realizado prueba de bombeo, por lo que no se tienen datos de transmisividad o coeficiente de almacenamiento para esta zona.

La ubicación de los niveles estáticos es bastante somera, entre los 2 a 3 metros de profundidad para el sector más cercano a la costa de Dominical, mientras que otros pozos más próximos al piedemonte de la Fila Costeña reportan niveles entre los 3,8 a 6 m de profundidad. En cuanto al espesor de este acuífero el pozo DM-1, ubicado en la zona de Dominical, reporta un espesor de 12 metros de arenas y gravas, mientras que el DM-30, ubicado en la margen derecha del río Barú a unos 3 km al norte de Dominical, reporta un espesor de 14 metros de aluviones muy limpios.

Para este sector no se encontraron evidencias de intrusión marina en el acuífero a partir de los monitoreos realizados. Los valores de conductividad eléctrica se ubican en general por debajo de los 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cumpliendo con el valor recomendado de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  establecido en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable. Únicamente se registró un dato sobre este límite de 538  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el pozo de monitoreo 40 (Anexo 6 – monitoreo de conductividad Dominical - Ballena), que sin embargo en los meses posteriores fue decreciendo.

Debido a la poca información disponible, únicamente se logró la construcción de equipotenciales para un pequeño sector del acuífero ubicado en Dominical, donde además, el modelo de elevación digital disponible tiene la limitación que no brinda a cabalidad el detalle deseado en los sectores más próximos a la costa y al río Barú. Sin embargo, como se observa en la figura 54 se generaron unas equipotenciales para este sitio que describen una dirección de flujo general hacia el oeste y suroeste con un gradiente aproximado entre 0,006 a 0,01. Estas direcciones de flujo sugieren la descarga acuífera tanto hacia el mar como hacia el cauce del río Barú en esta zona. El perfil E-E´ de la figura 20, muestra el modelo hidrogeológico general para la zona de Dominical.

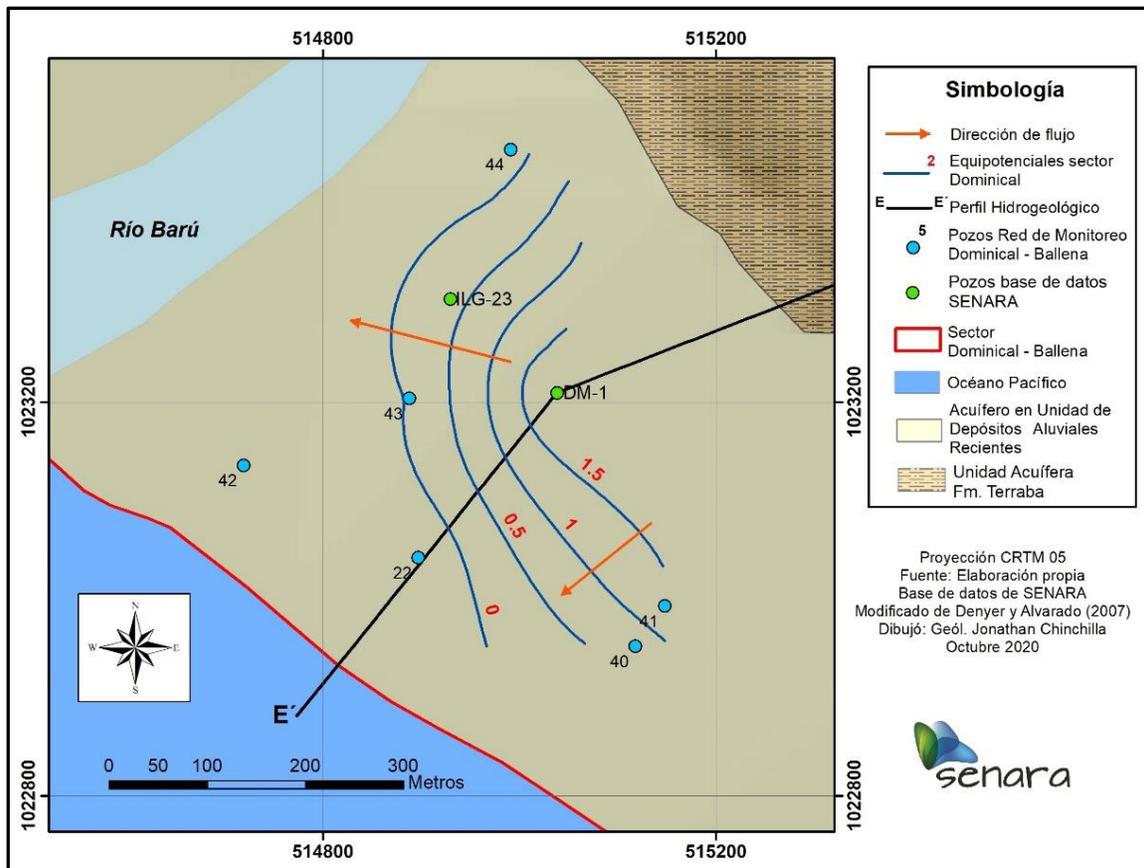


Figura 54. Equipotenciales para un sector del acuífero aluvial en Dominical.

### Uvita

Según la información existente en las bases de datos de SENARA y SINIGIRH, para esta zona únicamente, se reportan caudales de extracción máximos de 0,9 l/s, sin embargo, el SENARA determinó caudales de extracción entre 28,78 l/s (Pozo 2) y 33,4 l/s (Pozo 1), mediante aforos y pruebas de bombeo realizados en los pozos de abastecimiento público de la ASADA de Uvita.

En cuanto a los parámetros hidráulicos del acuífero, se cuenta con las pruebas de bombeo realizadas por el SENARA en los pozos de la ASADA de Uvita, a partir de las cuales se determinaron transmisividades para el acuífero de 7376 m<sup>2</sup>/d en el pozo 1 y entre 3121 y 7861 m<sup>2</sup>/d en el pozo 2. Estos valores resultan muy altos, pero se aclara que deben ser considerados con precaución ya que las pruebas de bombeo no pudieron tener una duración superior a los 180 minutos debido a problemas eléctricos con los equipos de bombeo.

Ahora bien, en los piezómetros exploratorios COR-51, COR-52, COR-53, RE-32 y RE-33, se realizaron ensayos para determinación de la conductividad hidráulica mediante la metodología Hvorslev a caudal constante. En estos ensayos se obtuvieron valores de conductividad hidráulica entre 1,42 y hasta 237 m/d, lo cual pone en evidencia la variabilidad de este parámetro en función de las granulometrías captadas y que tan libre de finos se presente el aluvión. También se determinaron conductividades hidráulicas del orden de 0,0034 m/d en algunos estratos de arcillas que se encuentran intercalados en los depósitos aluviales.

El espesor de esta unidad es variable, pero puede alcanzar hasta los 35 metros tal y como se registró en el piezómetro COR-51. Se ha considerado, que muy posiblemente el incremento de espesor para esta unidad y en esta área, se encuentre influenciado por la actividad tectónica de la región.

Para esta zona los niveles del agua subterránea en la unidad aluvial se encuentran bastante someros, a menos de 5 metros de profundidad, y solamente en el caso del piezómetro RE-32 y un pozo excavado, ambos localizados en las cercanías del salón comunal de Uvita, se tiene registro de un nivel del agua subterránea aproximadamente a los 7 m de profundidad.

A partir de la información de los pozos inventariados en campo, los piezómetros exploratorios, así como los aforos realizados en el cauce del río Uvita y una quebrada cercana, se trazaron equipotenciales para la determinación de la dirección de flujo en el acuífero aluvial de este sector (Figura 55). Es importante mencionar, que en estas equipotenciales no se ha considerado el piezómetro RE-32, debido a que su dato de nivel estático tiende a generar una distorsión en el trazado de las equipotenciales. Analizando la información de elevaciones que proporciona el modelo de elevación digital disponible, es posible que este efecto se deba a la falta de detalle en este sitio y en el cauce del río Uvita. Tampoco se descarta la existencia de una condición particular para el acuífero en esta zona, sin embargo, la información disponible en el piezómetro y la poca cantidad de pozos en sus alrededores, no permiten realizar un análisis más detallado de las condiciones acuíferas, de ahí, que se ha optado por no utilizar su dato de nivel estático en la construcción de equipotenciales.

Como se observa en la figura 55, en el área de Uvita esta unidad muestra una dirección de flujo subterráneo predominante hacia el SW, con gradientes hidráulicos que varían

entre 0,004 y hasta 0,02 aproximadamente. Para la zona de Bahía el gradiente hidráulico es bajo, alrededor de 0,007, en el sector de Colonia o Chaman es un poco más alto en el orden de 0,013, mientras que los mayores gradientes se registran hacia el NE de Uvita, alcanzando hasta 0,02.

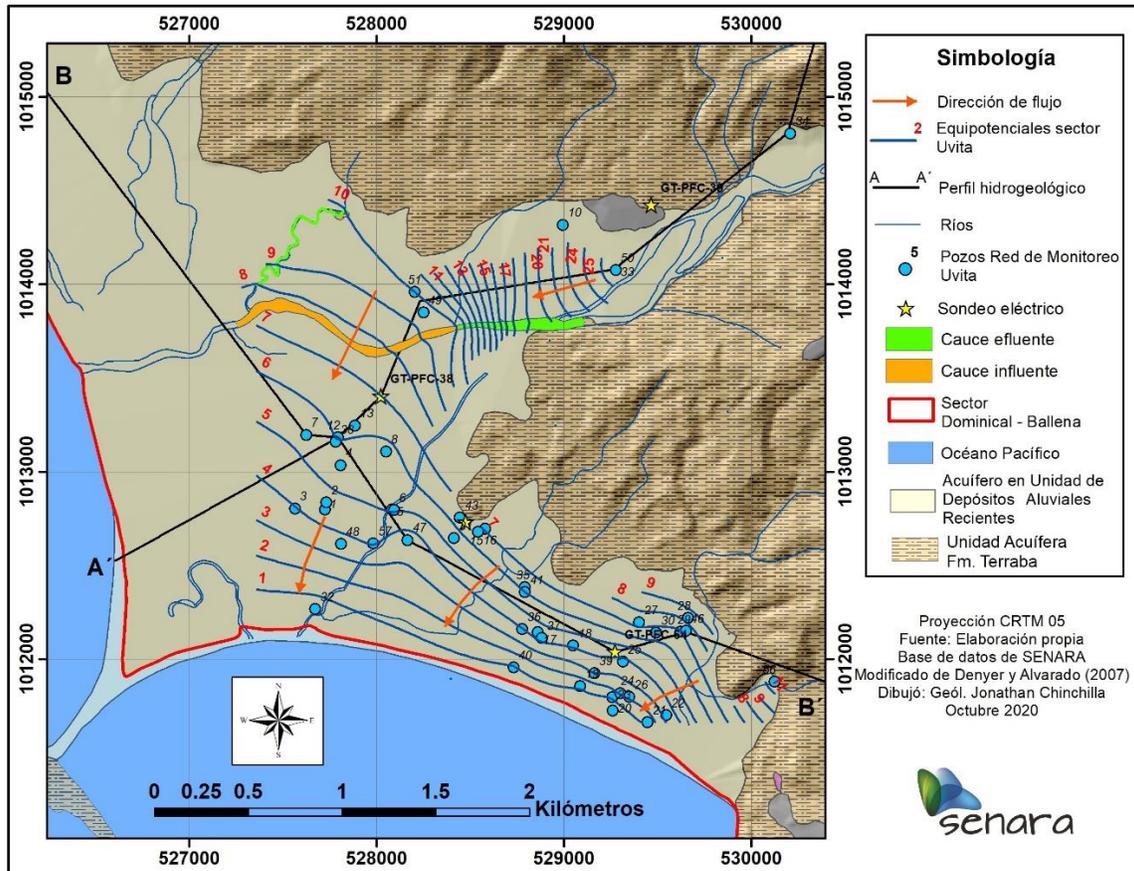


Figura 55. Equipotenciales para un sector del acuífero aluvial en Uvita.

Para el caso del río Uvita se tiene un tramo en el cual el cauce se comporta de manera efluente, es decir que el techo del acuífero se localiza sobre el nivel del lecho del cauce, de tal manera que el acuífero logra ceder en este caso un caudal de 635,2 l/s al río. Por otra parte, aguas abajo de este sector (Figura 55) el río cambia su comportamiento a influente, en el cual el techo del acuífero más bien se localiza bajo el nivel del lecho del cauce, de tal manera que en esta zona es el río el que aporta al acuífero un caudal de 745,1 l/s. Cabe mencionar, que esta condición fue registrada para el mes de mayo del 2020 y es muy posible que conforme avanza la época lluviosa y se incrementan los niveles del acuífero, se tenga una variación a lo largo del cauce en el comportamiento efluente o influente.

No se observaron evidencias de intrusión marina en el acuífero a partir de los monitoreos realizados, determinando que en general la conductividad eléctrica del agua subterránea se ubica bajo los 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cumpliendo de esta forma con el valor recomendado según el Reglamento para la Calidad de Agua Potable, decreto No. 32327-S. Únicamente se tiene el registro de 3 pozos (Anexo 6 – monitoreo Uvita) en los cuales se detectaron valores superiores a los 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (valor máximo medido de 760  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pero se considera que responden a condiciones muy específicas, tal es el caso de la cercanía con una zona de manglar (Anexo 6 – pozo 32 red de Uvita) o el hecho que anteriormente el pozo se encontrara seco y al momento de monitorearlo apenas estaba recuperando el nivel por efecto de la recarga acuífera (Anexo 6, pozo 19 red de Uvita). Finalmente, hacia el inicio de la temporada de lluvias algunos pozos muestran un decrecimiento importante en los valores de conductividad eléctrica, lo cual se ha interpretado como el efecto generado a partir de la rápida recarga directa del agua de precipitación.

Los perfiles A-A' y B-B' de las figuras 18 y 19 muestran el modelo hidrogeológico general para la zona de Uvita.

### **Ballena**

Los depósitos aluviales en este sector son restringidos y cuentan con un área aproximada de apenas 1  $\text{km}^2$ , asociados con la actividad de las quebradas Ballena, Simón y Mercedes. Además, dada la cercanía con el piedemonte de la Fila Costeña, se presenta cierta interdigitación con depósitos de tipo coluvial, tal como se observa en el piezómetro exploratorio COR-50.

La profundidad de los niveles estáticos se ubica entre los 6 m para el piezómetro COR-50 más cercano al piedemonte de la Fila Costeña, a apenas 1 m para el pozo de monitoreo localizado en las instalaciones del SINAC en playa Ballena. Por otra parte, en el piezómetro exploratorio COR-50 se reporta un espesor para los depósitos recientes de 12,6 metros, no se reportan condiciones de confinamiento para el acuífero, y no se cuenta con datos de transmisividad en el área.

No se encontraron evidencias de intrusión marina en el acuífero a partir de los monitoreos realizados. Más bien, los valores registrados en los dos pozos que se ubican en este sector se ubican entre los 64 y 71  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores muy bajos que más bien

pueden estar reflejando un tiempo corto de residencia en el acuífero y la rápida recarga generada a partir de la infiltración directa del agua de precipitación (Anexo 6).

A partir de los niveles reportados en el piezómetro COR-50 y el pozo de monitoreo del SINAC en playa Ballena, se han construido equipotenciales para el acuífero aluvial en este sector. La dirección de flujo es hacia el SW, descargando hacia el mar, con un gradiente aproximado de 0,025. Las equipotenciales para esta zona se observan en el mapa de la figura 56, mientras que el perfil C-C´ de la figura 19 muestra el modelo hidrogeológico general para este sector.

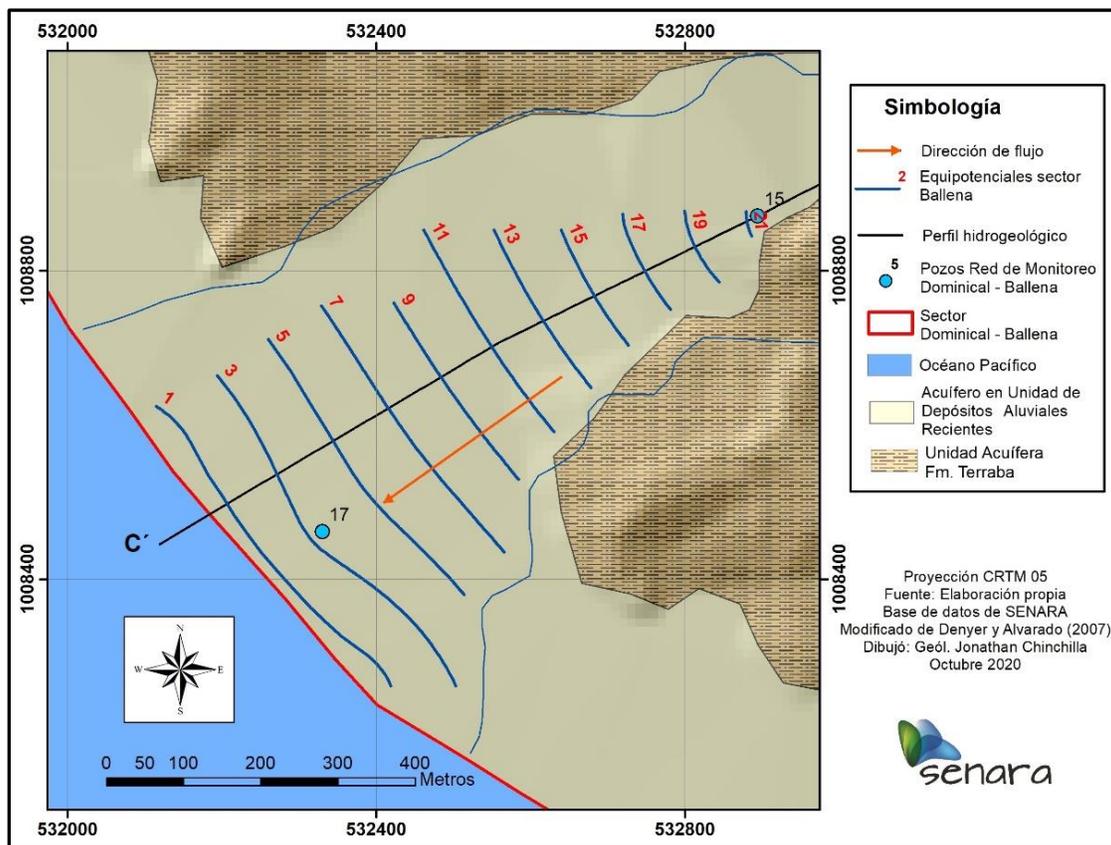


Figura 56. Equipotenciales para un sector del acuífero aluvial en Ballena.

### Punta Mala

Corresponde con el sector ubicado hacia el extremo SE del área de estudio en el que los depósitos aluviales se relacionan con la actividad de los ríos Coronado, Punta Mala, Balso, Tortuga y Media Luna.

La información hidrogeológica para esta zona es sumamente escasa, por lo que no se tiene información sobre los espesores de este acuífero o sus parámetros hidráulicos. Solamente se han logrado inventariar siete pozos excavados en el sector conocido como “Barrio Canduchos”, todos utilizados para fines domésticos, con profundidad máxima de 4 metros y cuyo nivel estático es sumamente somero, entre 1 a 1,2 metros de profundidad. Con la información de estos pozos se trazaron curvas equipotenciales, las cuales describen una tendencia de flujo hacia el SW con gradiente aproximado de 0,021, en dirección al mar (Figura 57).

La zona donde se ubican estos pozos corresponde con un área en la que predominan los depósitos arenosos y existe una fuerte influencia de las mareas. De hecho, en esta zona se han medido conductividades eléctricas en algunos de los pozos de hasta 6289  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores que ponen en evidencia el efecto del agua marina en esta zona, que además, en caso de consumo humano, pone en riesgo la salud de las personas, ya que se supera por mucho el valor recomendado de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  establecido en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, decreto No. 32327-S.

En el anexo 9 se muestra de forma esquemática un cuadro resumen con las principales características de los acuíferos modelados para cada sector en las partes bajas de las subcuencas del Pacífico, descritos en las secciones anteriores.

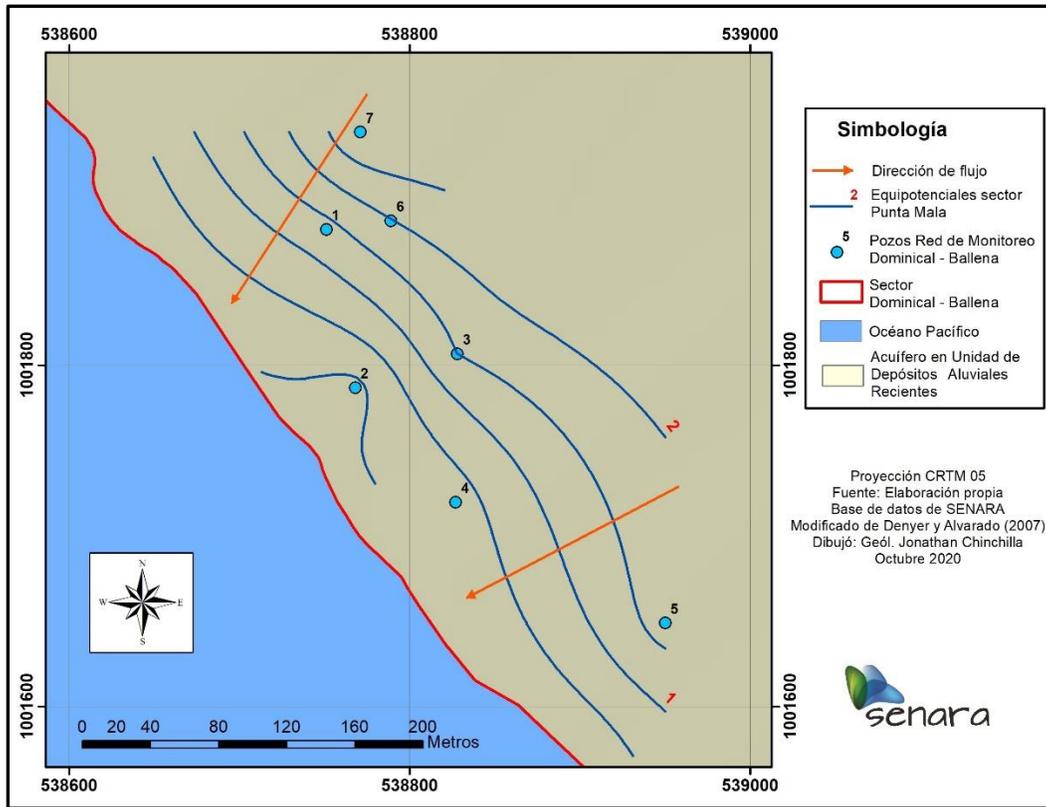


Figura 57. Equipotenciales para un sector del acuífero aluvial en Punta Mala (barrio Canduchos).

## 4. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN

---

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero representa la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante impuesta, según las características propias del medio acuífero y su cobertura. La vulnerabilidad específica de un acuífero evalúa su sensibilidad ante un contaminante concreto o grupos de contaminantes que se comportan de igual o similar manera (SENARA, 2017b).

Entonces la vulnerabilidad intrínseca es función de:

- ✓ La accesibilidad de la zona saturada a la penetración de contaminantes.
- ✓ La capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada resultante de la retención o reacción físico-química de los contaminantes.

Para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca se pueden utilizar varias metodologías, entre ellas GOD, Drastic, Epik, etc, cuya utilización depende del medio hidrogeológico y de la información disponible.

Tomando en consideración los tipos de acuíferos existentes en la zona de estudio en el Pacífico Central, así como la información técnica disponible, se utilizará para el análisis de vulnerabilidad intrínseca la metodología GOD (por sus siglas en inglés: Groundwater hydraulic confinement, Overlaying strata and Depth to groundwater table) descrita por Foster et al. (2002). Adicionalmente, para la asignación del parámetro G, se utilizará la metodología de análisis desarrollada por SENARA (2017a), que toma en consideración la conductividad hidráulica de la zona no saturada.

El índice de vulnerabilidad GOD caracteriza la vulnerabilidad a la contaminación en función de los siguientes parámetros:

- ✓ Grado de confinamiento hidráulico del acuífero (parámetro categorizado con índices en una escala de 0,0 a 1,0).
- ✓ Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes (parámetro categorizado con índices en una escala de 0,4 a 1,0). Cuando se presenta una secuencia de

depósitos diferentes, se debe seleccionar la litología predominante o limitante para caracterizar el sustrato suprayacente.

- ✓ Distancia al agua determinada como: la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados (parámetro categorizado con índices en una escala de 0,6 a 1,0).

El valor final de vulnerabilidad intrínseca del acuífero es el producto de los índices obtenidos para cada uno de los parámetros. Este valor se ubica entre 0 a 1 y se subdivide en cinco categorías distintas de vulnerabilidad: despreciable, baja, media, alta y extrema (Figura 58).

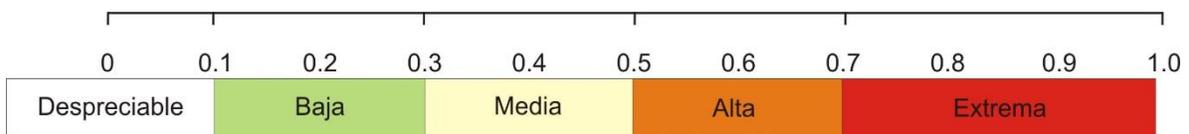


Figura 58. Categorías de vulnerabilidad, método GOD.

Se debe aclarar que, en el área de estudio este análisis de vulnerabilidad hidrogeológica únicamente se ha podido realizar para ciertos acuíferos y en determinadas zonas, debido a que se requiere que la información técnica de los parámetros G, O y D a considerar, tenga una distribución tal que permita realizar en forma adecuada la determinación de la categoría de vulnerabilidad intrínseca GOD.

La asignación de los parámetros G, O y D se realizó para distintos puntos de control en cada unidad acuífera, tomando en consideración las descripciones de los reportes de perforación de los pozos y piezómetros, los análisis de clasificación de suelos, las conductividades hidráulicas en la zona no saturada, los niveles registrados en las redes de monitoreo de pozos y las interpretaciones realizadas a través de los sondeos eléctricos verticales. Estos puntos de control con información de parámetros G, O y D se observa para cada zona de estudio en los mapas de las figuras 60, 61, 62, 63, 64, 65 y 66.

### **Parámetro G**

Los acuíferos en la zona de estudio se han descrito tanto de tipo confinados como libres, sin embargo, en la metodología GOD la valoración del parámetro G para acuíferos

libres va de 0,7 a 1,0, por lo que se requiere de un parámetro que permita discretizar cuantitativamente el valor a asignar en cada punto de control.

Precisamente, la metodología desarrollada por SENARA (2017a) toma en cuenta la conductividad hidráulica (K) de la zona no saturada, para asignar con mayor detalle los valores de parámetro G en aquellos puntos de control que se ubican dentro de los rangos de acuífero libre a libre cubierto (Figura 59). En este caso, en cada punto de control no existe necesariamente una caracterización completa de la conductividad hidráulica en todo el espesor de la zona no saturada, por lo que, para asignar el valor respectivo se ha recurrido también a considerar el dato de K obtenido a partir de las pruebas de doble anillo.

En el anexo 7 se incluyen los archivos Excel con los valores asignados de parámetro G en cada punto de control en función de la conductividad hidráulica. Se incluyen además los mapas raster generados para cada zona en que se ha podido realizar este análisis.

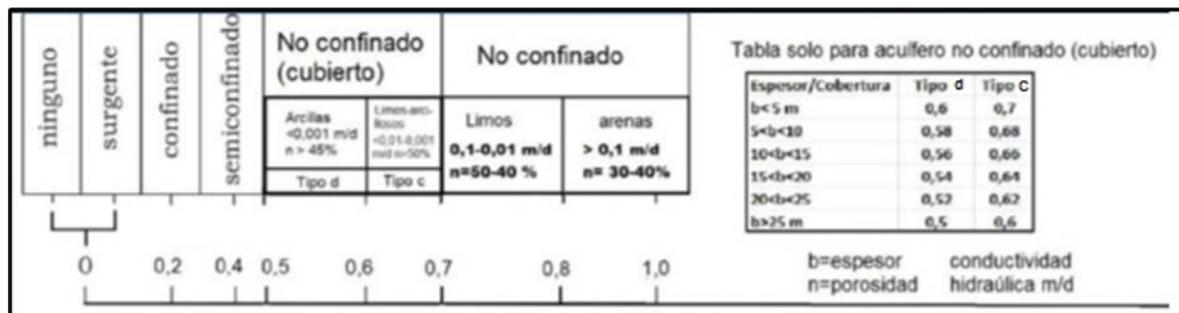


Figura 59. Clasificación del parámetro G en acuíferos libre a cubierto, según SENARA (2017 a).

### Parámetro O

Los valores de este parámetro fueron asignados según las descripciones de la zona no saturada en cada punto de control. Por otra parte, en aquellos sitios donde se ubican diferentes litologías en la zona no saturada, se ha realizado una ponderación con los valores asociados a cada estrato, de tal forma que el valor final asignado sea más representativo para la totalidad de la zona no saturada.

En el anexo 7 se incluyen los archivos Excel con los valores asignados de parámetro O en cada punto de control. Se incluyen además los mapas raster generados para cada zona en que se ha podido realizar este análisis.

### Parámetro D

En este caso los valores fueron asignados tomando en consideración la profundidad del agua reportada en los pozos de la base de datos, o los niveles más someros que fueron monitoreados en los piezómetros o pozos que se inventariaron en el campo. En el caso de niveles reportados en sondeos eléctricos verticales, únicamente se tomaron en consideración cuando el nivel coincidía con valores reportados para pozos cercanos.

En el anexo 7 se incluyen los archivos Excel con los valores asignados de parámetro D en cada punto de control, así como los mapas raster generados para cada zona en que se ha podido realizar este análisis.

Una vez asignado para cada punto de control el respectivo valor de parámetro G, O y D, se procedió a realizar una interpolación de los valores en toda el área de análisis. A partir de la interpolación realizada se generaron las curvas de contornos de los distintos parámetros. La interpolación fue realizada en un programa de interpolación y utilizando el método Kriging, cuyos contornos fueron los que mejor se ajustaron a las condiciones reales de sitio.

Los contornos generados se exportaron a un sistema de información geográfica, en este caso el ArcGis Desktop 10.5, a partir de los cuales se generaron archivos raster con un tamaño de celda de 10 metros según la escala de trabajo (1:25 000). Con los archivos raster de los parámetros se realizó el álgebra de mapas ( $G \times O \times D$ ), a partir de esta última se obtuvieron los mapas de vulnerabilidad intrínseca GOD para cada sector. Este mapa de vulnerabilidad GOD, posteriormente fue reclasificado según los rangos de la metodología que se observan en la figura 58.

A continuación se presentan los mapas de vulnerabilidad GOD finales determinados para cada zona de estudio y una descripción de los resultados obtenidos.

## **4.1 Herradura – Jacó**

### **4.1.1 Acuífero Herradura**

Con base en los pozos con suficiente información, se procedió a designar el parámetro G y luego se realizó la interpolación en el sistema de información geográfico para obtener una distribución del parámetro G en una capa raster, los valores obtenidos oscilan entre 0,4 y 0,8 (Anexo 7). A partir del modelo hidrogeológico conceptual se definió que la ocurrencia del sustrato suprayacente al acuífero Herradura es una mezcla

de limos aluviales, suelos residuales y arenas aluviales, por lo que se le ha asignado un valor de 0,6 al parámetro O. Con la información de los niveles de agua subterránea, de la red de monitoreo para el mes de octubre del 2020 (Anexo 6, red Herradura – Jacó), se procedió a realizar la interpolación de los datos de la profundidad del agua en el sistema de información geográfica para definir el parámetro D.

Es así como, realizando el álgebra de mapas en el sistema de información geográfica con la función GxOxD, se obtiene el mapa de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero Herradura (Figura 60). Hacia el sector NE de Herradura la vulnerabilidad se clasifica como media mientras que en la zona SW del acuífero Herradura la vulnerabilidad se clasifica como baja, debido al confinamiento que tiene el acuífero en dicho sector hacia la playa Herradura.

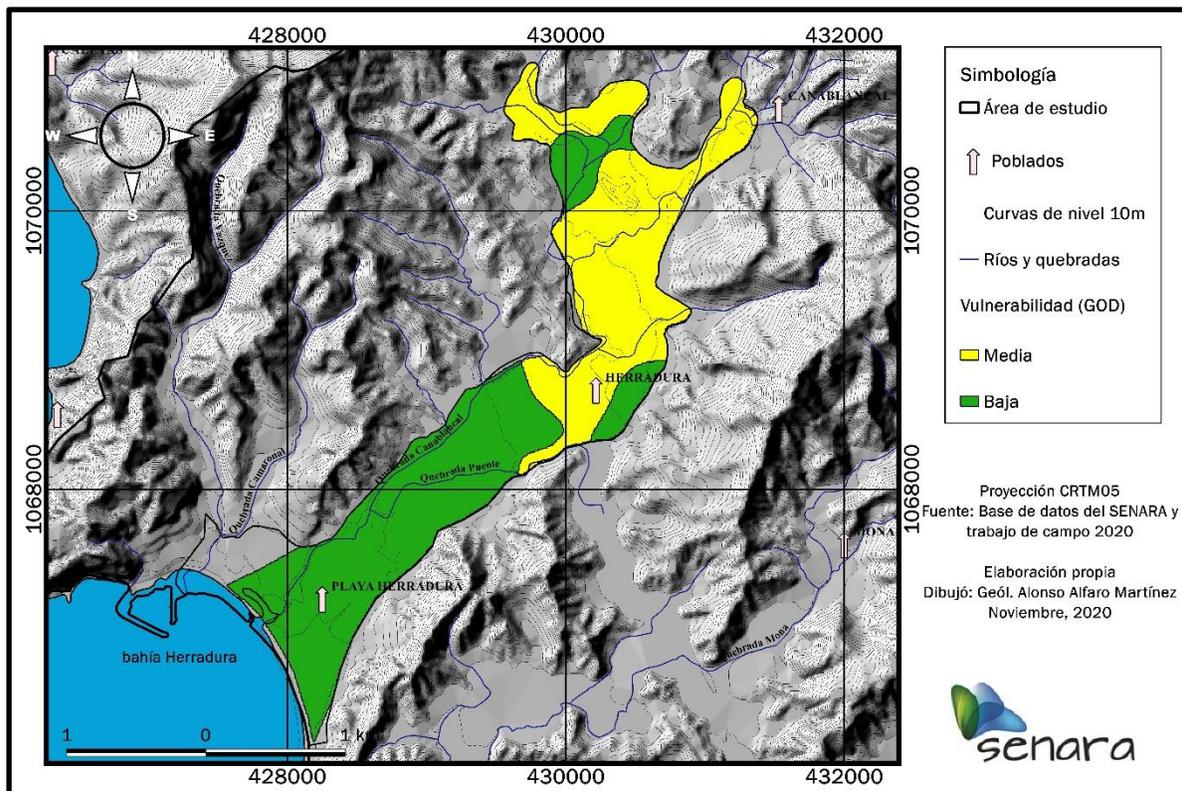


Figura 60. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, acuífero Herradura.

Al sobreponer los mapas de uso del suelo y vulnerabilidad para la zona de Herradura, se determina que, para las zonas con vulnerabilidad media el uso de suelo es variable, desde bosque, plantaciones y zacate, con predominancia de último.

Mientras que en zonas de vulnerabilidad baja prevalece el dominio de usos correspondientes al urbano y zacate, favorecidos por la morfología del terreno (Figura 61).

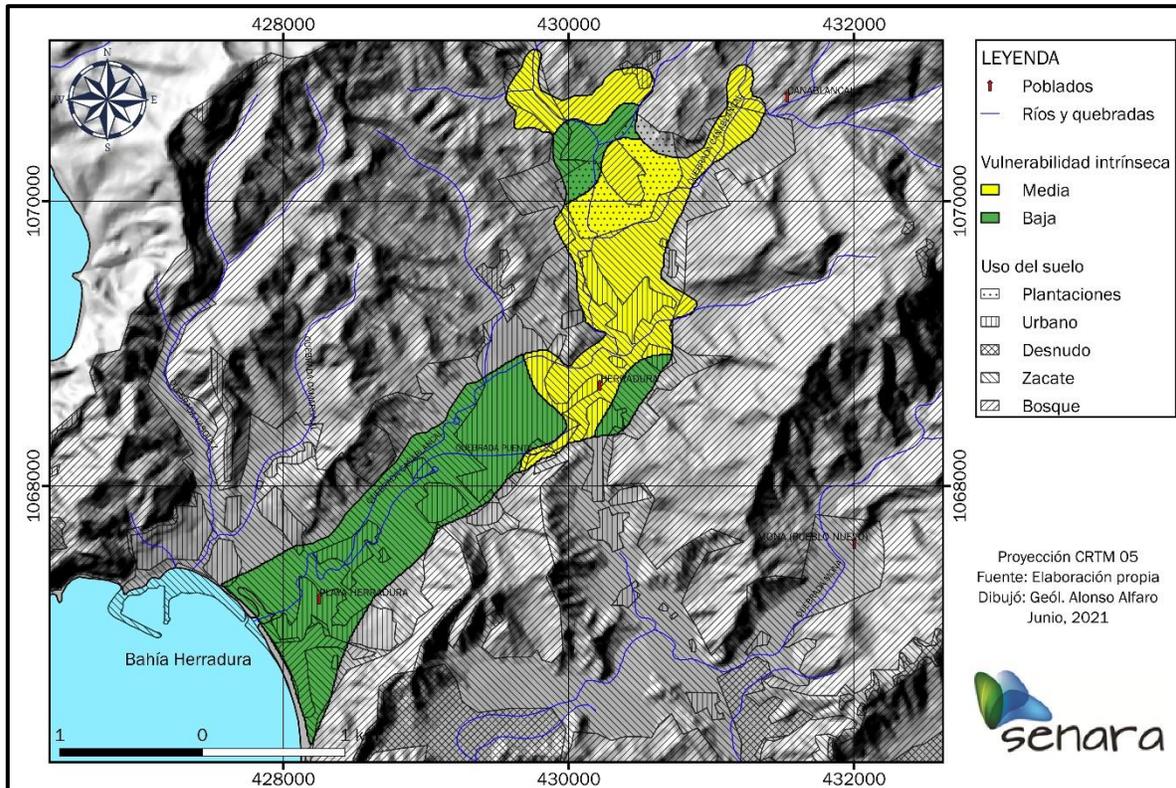


Figura 61. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y el uso de suelo, acuífero Herradura.

#### 4.1.2 Acuífero Jacó.

Para construir el mapa de vulnerabilidad en el sector Este de Jacó se simplificaron los bordes y la geometría en los depósitos cuaternarios aluviales debido a la falta de información de pozos y por ende niveles de agua en el sector Este de Jacó, la geometría simplificada se muestra en la figura 62.

Con base en los pozos con suficiente información, al parámetro G se le asignó un valor de 0,2 ya que se definió que el acuífero Jacó es confinado, mientras que para el valor de 0 se consideró 0,6 debido a que el sustrato suprayacente al acuífero Jacó, es una mezcla de limos aluviales, suelos residuales y arenas aluviales. Mientras que, con los datos de los niveles de agua reportados en los pozos para la zona de Jacó, se realizó una interpolación de estos para obtener el parámetro D, el cual oscila entre 0,8 y 1. Resultando que la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero Jacó se

clasifica como baja, debido principalmente al confinamiento de los aluviones por los sedimentos finos de limos y arcillas suprayacentes.

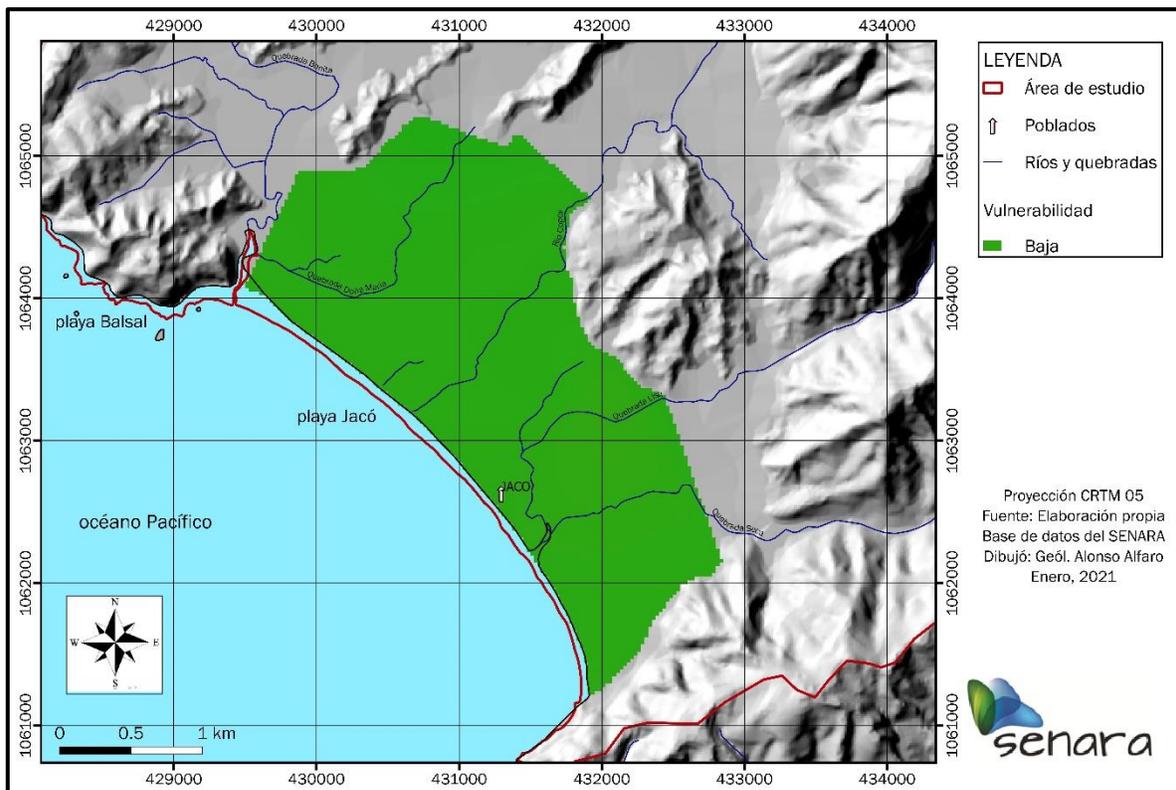


Figura 62. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, acuífero Jacó.

Al sobreponer los mapas de uso del suelo y vulnerabilidad para la zona de Jacó, se determina que, los usos urbano y zacate predominan en las zonas con vulnerabilidad baja, (Figura 63).

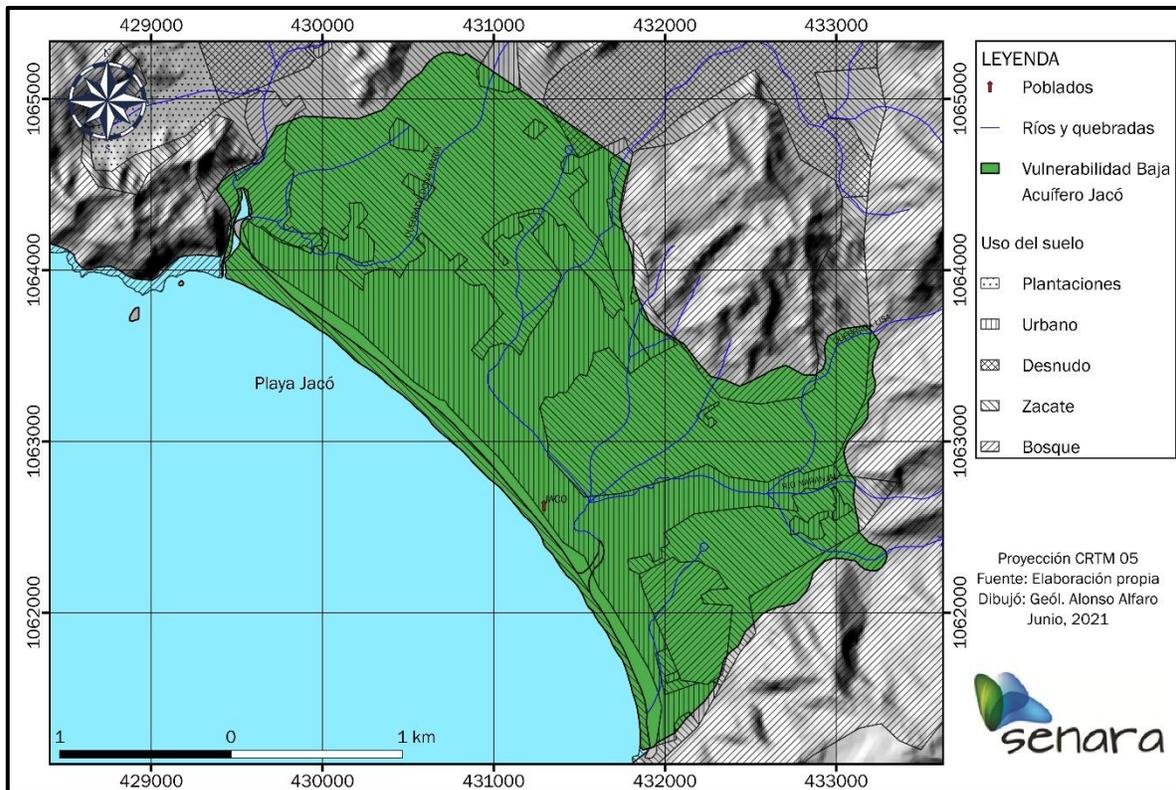


Figura 63. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso de suelo, acuífero Jacó.

#### 4.2 Hermosa – Esterillos

En el sector de Hermosa y Esterillos, la mayor cantidad de pozos se encuentran ubicados en los alrededores de Pochotal y una menor cantidad en la zona de Esterillos, por lo que solamente en estas 2 áreas se realiza el cálculo de vulnerabilidad intrínseca, en virtud que, de los 138 pozos registrados en la zona de estudio, solo 80 contaban con la información necesaria para la asignación de los parámetros de GOD.

Para la parte más al norte del sector de Hermosa y Esterillos, la información de pozos es muy aislada y no hay suficiente densidad para generar los mapas de vulnerabilidad en el acuífero de la Formación Tulín.

Para el parámetro G, se consideraron las descripciones de los pozos registrados en la Base de Datos de SENARA, para determinar si existía confinamiento o no. En el caso que se determinó confinamiento, se tomó un valor de 0,2. Cuando el acuífero se estimó como libre, se verificaron los ensayos de suelos y las pruebas de infiltración en las capas más superficiales, para determinar su condición de acuífero libre o por el

contrario, libre cubierto. Dadas las condiciones de los suelos, solo se encontraron suelos con conductividades hidráulicas altas, por lo que se asignó un valor de 0,8. En los casos donde no se contó con pruebas de infiltración o análisis de suelos cercanos, se asumió un valor conservador de 0,7 para el parámetro G.

En el parámetro O, también se tomaron en cuenta las descripciones de los pozos de la Base de Datos de SENARA, no obstante, en los casos en que la zona no saturada se compone de distintas litologías, se procedió a realizar una ponderación según su espesor. Para el parámetro O se consideraron litologías entre arcillas y arenas, así como lavas volcánicas recientes.

Para el parámetro D, se consideró la profundidad del nivel del agua para los sitios donde el acuífero se definió libre y la profundidad del techo del acuífero, en los casos de acuífero confinado, abarcando así todas las categorías del parámetro D. Como resultado, se obtuvo el mapa de vulnerabilidad intrínseca para el sector de Hermosa y Esterillos (Figura 64).

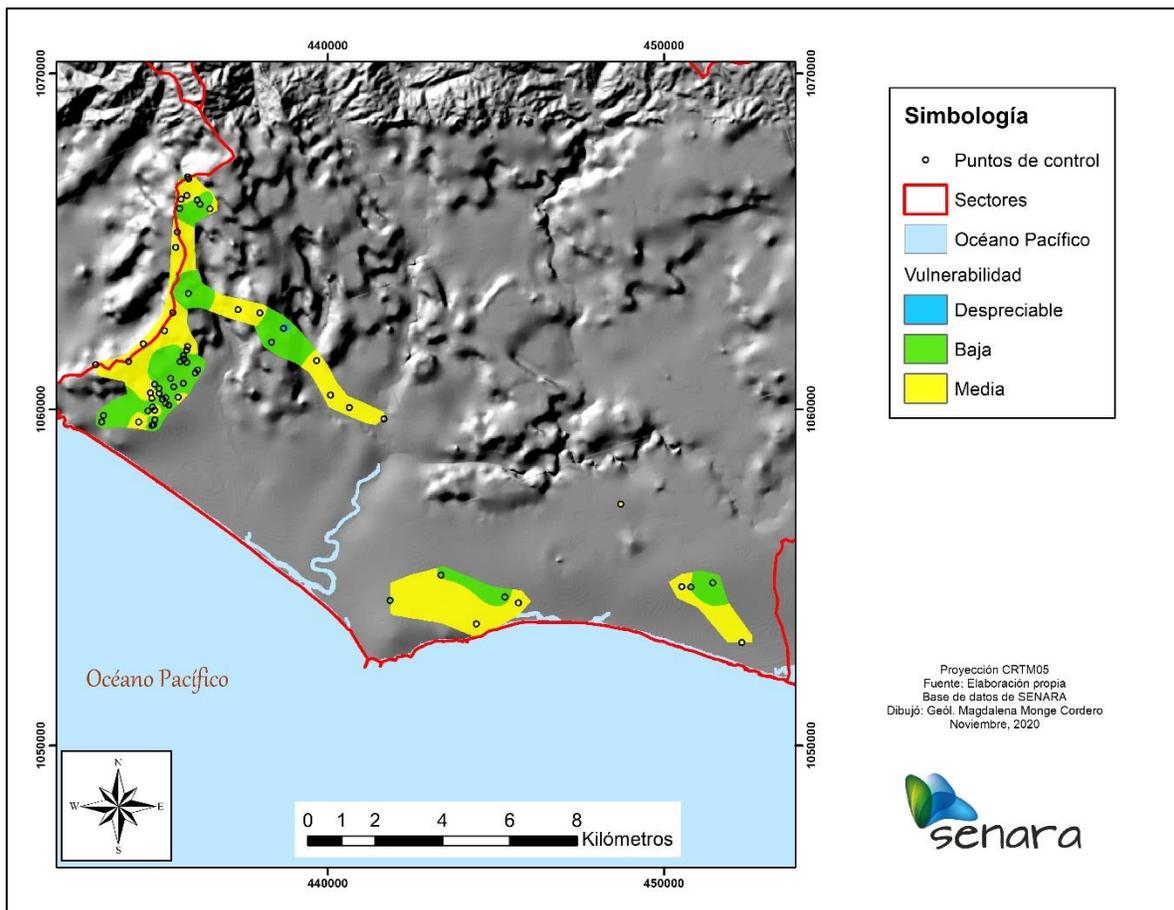


Figura 64. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para la zona de Hermosa - Esterillos.

Como resultado se obtuvo la vulnerabilidad intrínseca para el sector de Hermosa y Esterillos (Figura 64). En los alrededores de Pochotal (oeste del área de estudio) se obtuvieron vulnerabilidades entre baja y media, con algunos sitios muy localizados donde la vulnerabilidad es despreciable debido a que los pozos utilizados reflejan confinamiento en el acuífero. En esta zona prevalece el uso de suelo de bosque y un área pequeña corresponde a terrenos cultivados (Figura 65).

Para el sector de Esterillos, se obtuvieron vulnerabilidades entre baja y media, de manera muy localizada, ya que no se contaba con suficiente información de pozos en el área. De la misma manera, el uso de suelo que se encuentra en estas áreas corresponde a bosque y a cobertura con pastizal.

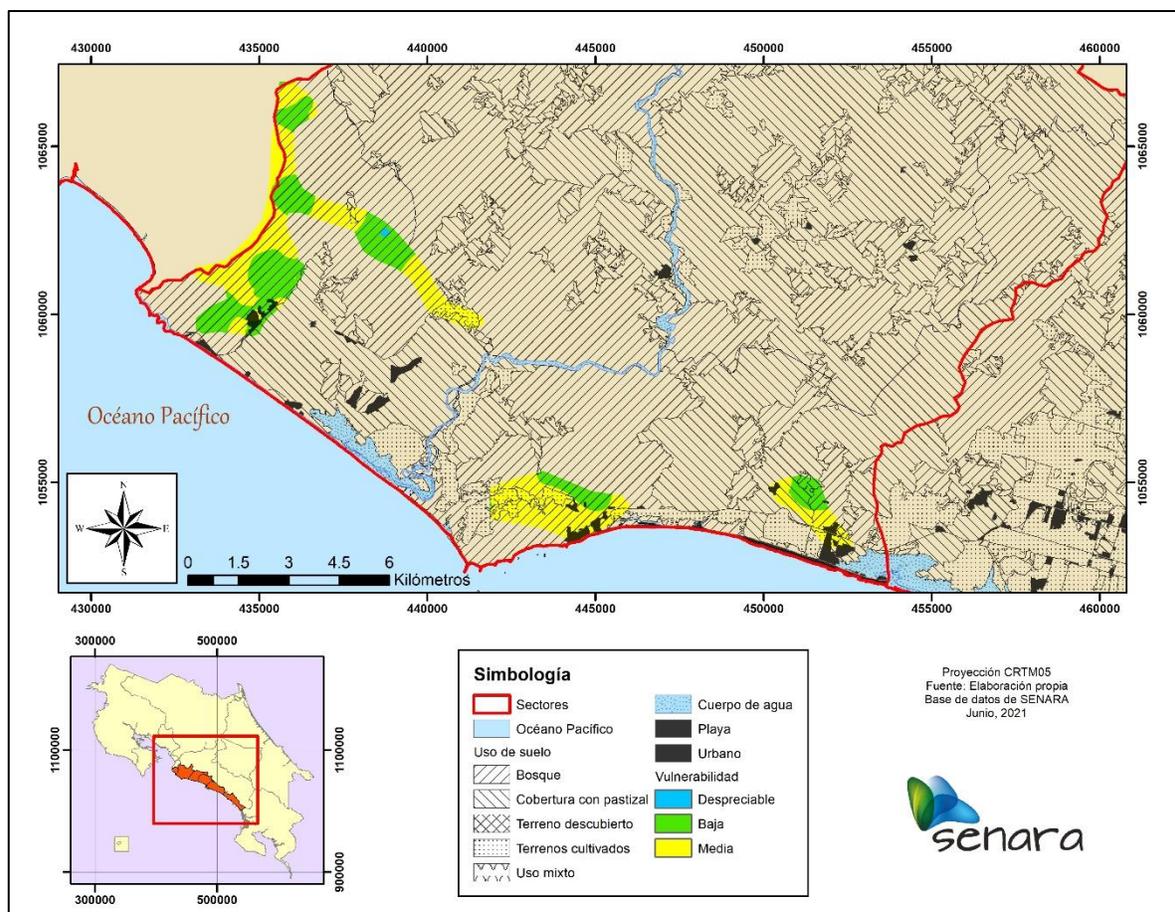


Figura 65. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso de suelo, Hermosa-Esterillos.

### 4.3 Parrita – Quepos

Para la zona comprendida dentro de las microcuencas de Parrita y Quepos, el análisis de vulnerabilidad se limitó a las áreas donde se localizan pozos con la información necesaria para la asignación de los parámetros GOD. Del total de 101 pozos registrados, solo 40 de ellos cuentan con datos suficientes para realizar el análisis de vulnerabilidad intrínseca en las localidades de Bandera, Parrita y Sardinal (sector Parrita) y en Damas, Paquita y San Rafael en Quepos.

La asignación de los parámetros G, O y D se realizó para distintos puntos de control en la unidad acuífera, tomando en consideración las descripciones de los reportes de perforación de los pozos y piezómetros, los análisis de clasificación de suelos, las conductividades hidráulicas en la zona no saturada y las interpretaciones realizadas a través de los sondeos eléctricos verticales. Estos puntos de control con información de parámetros G, O y D se muestran en el anexo 7 y en la figura 63, que contiene el número asignado a cada parámetro según punto de control.

Para la asignación del parámetro G, en las zonas de Parrita y Quepos, específicamente para la unidad aluvial, se ha descrito el acuífero como de tipo libre, conforme a la metodología GOD. Se utilizó la descripción litológica de cada pozo, el dato de conductividad hidráulica de los estudios de suelos (pruebas de infiltración) para definir los sectores donde el acuífero se comporta como libre o libre cubierto. Con respecto a este parámetro, hacia la zona de Parrita el acuífero aluvial tiene una mayor tendencia a comportarse como libre-cubierto, mientras que hacia Quepos el comportamiento es predominantemente como acuífero libre.

Los valores del parámetro O, fueron asignados de acuerdo con la descripción litológica de la zona no saturada de cada pozo, cuando se componía de varias litologías se ponderaba según su espesor y además se comparaba con el tipo de granulometría, inmediata más cercana, obtenida en el estudio de suelos. Predominando las granulometrías de arcilla y arena en Parrita, mientras que en el sector de Quepos predomina la combinación de arcillas y aluvión y solo aluvión.

El parámetro D fue fijado tomando en consideración la profundidad del agua reportada en los pozos de la base de datos, en virtud que en toda la zona de estudio se comporta como libre.

Como resultado del análisis anterior, la interpolación y el álgebra de los mapas asociados, se obtuvo el mapa de vulnerabilidad intrínseca por sectores. En Bandera y Parrita es alta, mientras que, hacia Sardinal, que comprende las localidades de Tigre, Ligia, Nicoya la vulnerabilidad es media y en Julieta, Jicote y hacia Bejuco es baja. Para el sector de Quepos, solo se logró calcular la vulnerabilidad intrínseca en Paquita y Damas que es alta, y hacia San Rafael es media. En la figura 66, se muestra el mapa de vulnerabilidad intrínseca elaborado para las zonas con información.

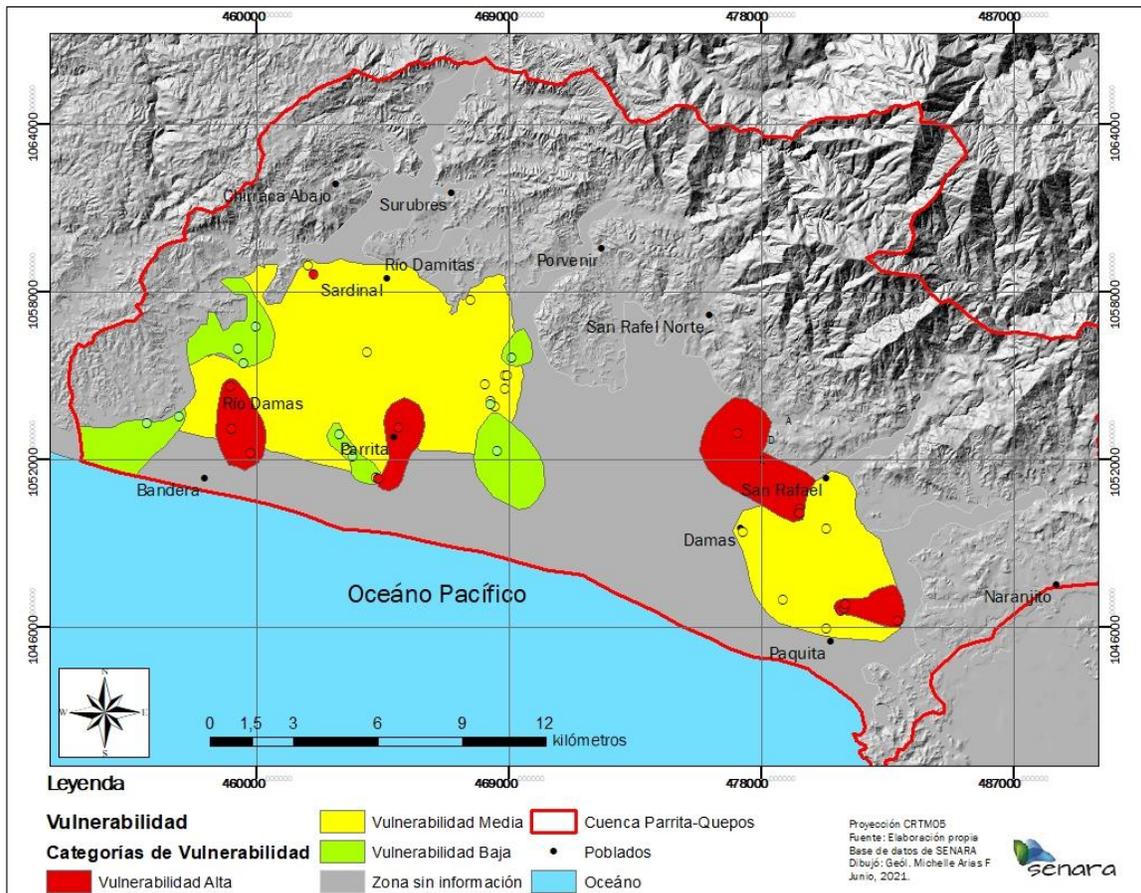


Figura 66. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para la zona Parrita - Quepos.

A partir de la figura 67, se desprende que en las áreas con vulnerabilidad baja predomina la presencia de cultivos como palma y arroz, mientras que en las zonas de vulnerabilidad media la palma abarca grandes extensiones en los sectores de Palo Seco, y Tigre. Hacia el oeste de la zona de estudio, sector de La Ligia destacan extensas áreas cultivadas de banano. En las zonas de vulnerabilidad alta, Parrita, Pueblo Nuevo y al

Norte de Bandera se identifica un potencial conflicto de uso debido a las actividades agrícolas que predominan (cultivos de palma y arroz), así como la huella urbana. Hacia Quepos las zonas con mayor conflicto se localizan hacia San Rafael, NE de Paquita, donde los cultivos prevalecen y las áreas con uso de bosque están restringidas al nor-este.

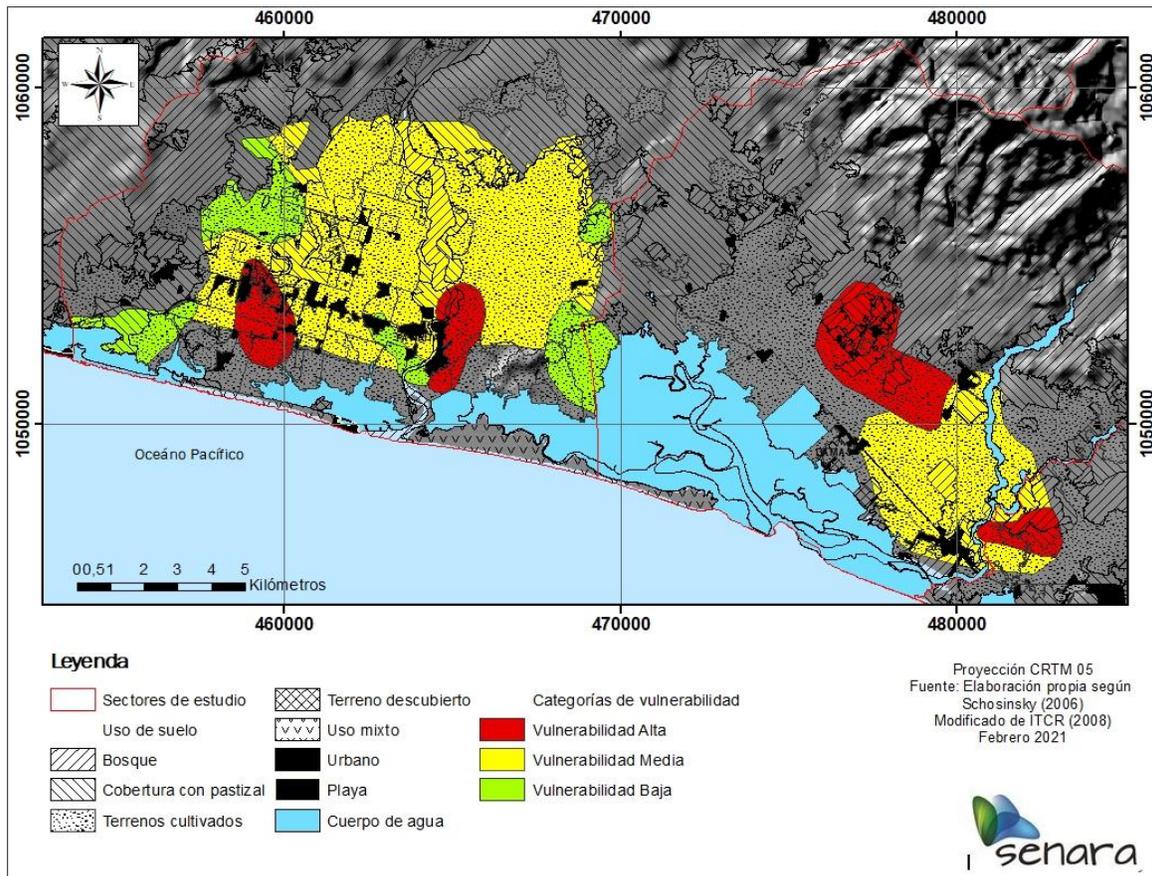


Figura 67. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso del suelo, sector Parrita - Quepos.

#### 4.4 Naranjo - Savegre - Matapalo

La metodología GOD se aplicó en la microcuenca Naranjo-Savegre-Matapalo únicamente en los sectores donde se localizan pozos con información de litología y niveles estáticos que permite determinar los parámetros G, O y D. Por lo anterior únicamente se tomaron en cuenta 25 pozos que permitieron realizar el análisis en los sectores noroeste, central y sureste de la microcuenca, específicamente para los depósitos aluviales. Para complementar lo anterior, también se utilizó información de

estudios de suelos, pruebas de infiltración y sondeos eléctricos verticales realizados en el área.

Para la determinación del parámetro G se tomó en cuenta la descripción litológica de los pozos, piezómetros y los sondeos eléctricos verticales, además de las conductividades hidráulicas obtenidas a partir de pruebas de infiltración en los suelos. Se determinó que el acuífero albergado en depósitos aluviales es de tipo libre en todos los sectores analizados.

El parámetro O se estableció según la descripción litológica de la zona no saturada (ZNS) en cada uno de los puntos de control obteniéndose así ZNS constituidas principalmente por limos, arcillas, arenas y aluvión.

En la determinación del parámetro D se consideró la profundidad hasta el nivel de agua subterránea en los puntos de control en el acuífero aluvial de tipo libre.

Finalmente, el mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas subterráneas (Figura 68), realizado mediante la metodología GOD, muestra la distribución espacial de los diferentes grados de vulnerabilidad, donde puede observarse que la mayoría de las áreas analizadas presentan vulnerabilidad media incluyendo los poblados de Lllamarón, Bartolo y Roncador al suroeste del área de estudio y Portalón en la zona central del área de estudio, asimismo, en sectores al noreste del Silencio y al sureste de Palma Quemada. En La Managua de Quepos y al noroeste de Hatillo se determinó un grado de vulnerabilidad media, mientras que, al este de Roncador, El Silencio y al oeste de Portalón la vulnerabilidad se determinó como alta.

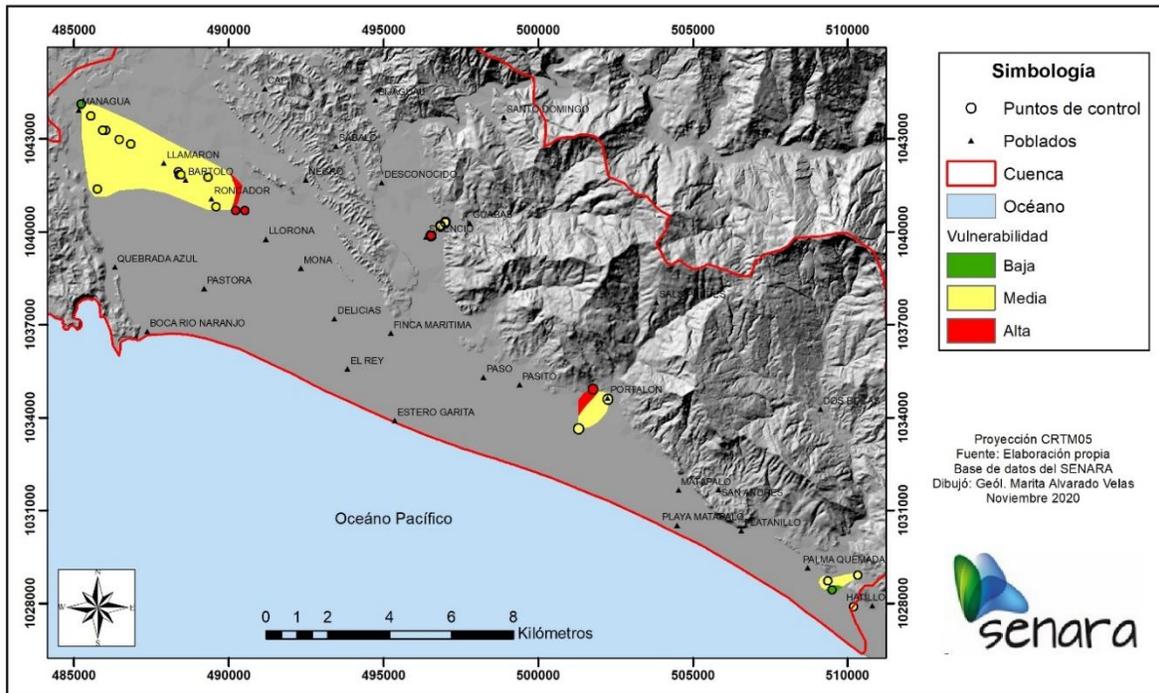


Figura 68. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para la zona de Naranjo - Matapalo - Savegre.

Tal y como se observa en la figura 69 las zonas con vulnerabilidad media en las cercanías de los poblados de Managua, Lllamarón, Bartolo y Roncador corresponden en su mayoría con uso del suelo clasificado como terrenos cultivados, mientras que en las cercanías de Portalón corresponde principalmente con cobertura con pastizal y en menor cantidad con terrenos cultivados. Al sureste del área de estudio, cerca del poblado de Palma Quemada existe un sector con vulnerabilidad media dedicado a terrenos cultivados y cobertura con pastizal, al igual que el área con vulnerabilidad baja. Asimismo, en el área de estudio, las zonas con vulnerabilidad alta presentan cobertura con pastizal y terrenos cultivados.

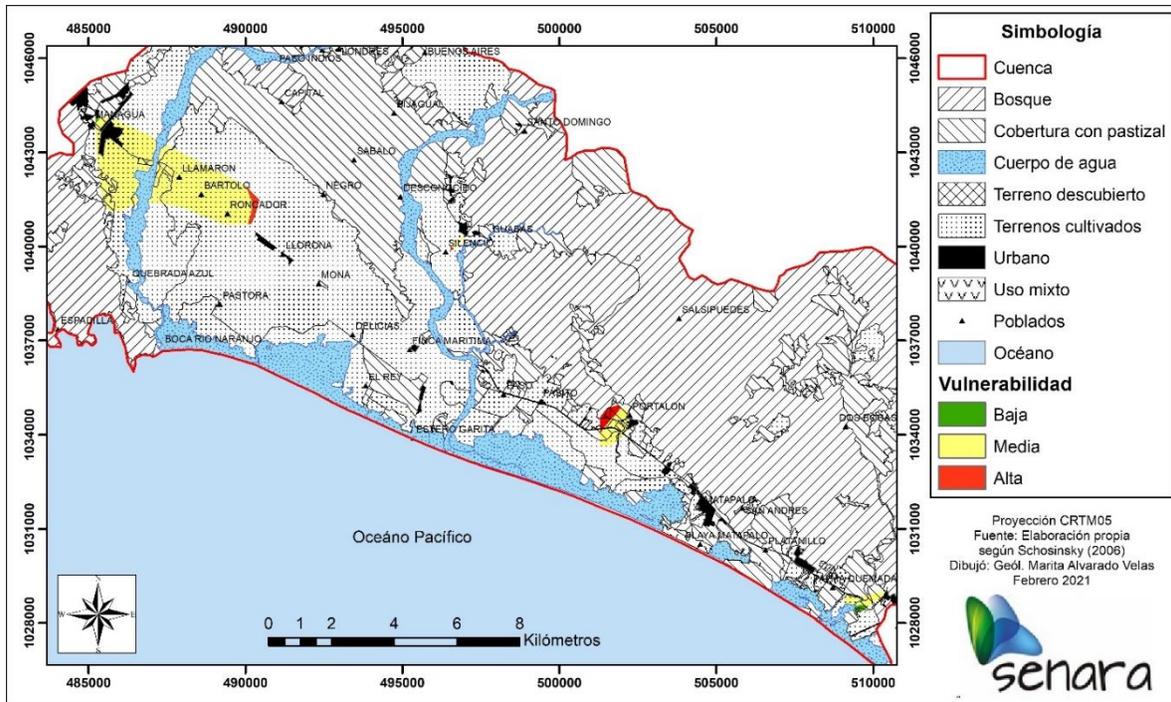


Figura 69. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso del suelo, sector Naranjo - Matapalo - Savegre.

#### 4.5 Dominical - Ballena

Para esta zona se contó con un total de 186 sitios puntuales en los cuales fue posible realizar el análisis de vulnerabilidad intrínseca mediante la metodología GOD. Estos sitios corresponden con pozos existentes en la base de datos del SENARA, sondeos eléctricos verticales y los piezómetros exploratorios que fueron perforados en esta área. Ahora bien, esta información se encuentra concentrada en ciertos sectores del área de estudio, de tal manera que solamente se ha logrado construir los mapas de vulnerabilidad para 8 zonas, tal y como se observa en los mapas de las figuras 70 y 71.

Para el sector comprendido entre Hatillo y Puerto Nuevo (al SE de Dominical), el análisis de vulnerabilidad se concentró principalmente en los sectores montañosos donde se desarrolla el acuífero en materiales de la Formación Térraba.

Una vez realizada la interpolación de la información, generados los mapas raster para cada parámetro G, O y D, y efectuada el álgebra de mapas respectiva, se han determinado para este sector categorías de vulnerabilidad que van desde despreciable hasta media, con un evidente predominio de la categoría de vulnerabilidad baja según

se observa en el mapa de la figura 70. El predominio de estas categorías se asocia con la condición de confinamiento presente en muchos pozos, pero a la vez, en aquellos en que no se presenta confinamiento, se relaciona más bien con la presencia de niveles de agua subterránea relativamente profundos y la existencia de coberturas arcillosas y limo-arcillosas que generan cierta protección al acuífero.

Las zonas de los sectores montañosos comprendidos entre playa Hermosa y playa Ballena muestran un comportamiento muy similar para el análisis desarrollado en los materiales de la Formación Térraba, con presencia de categorías de vulnerabilidad de despreciable a media y un predominio de la condición de baja vulnerabilidad (Figura 70).

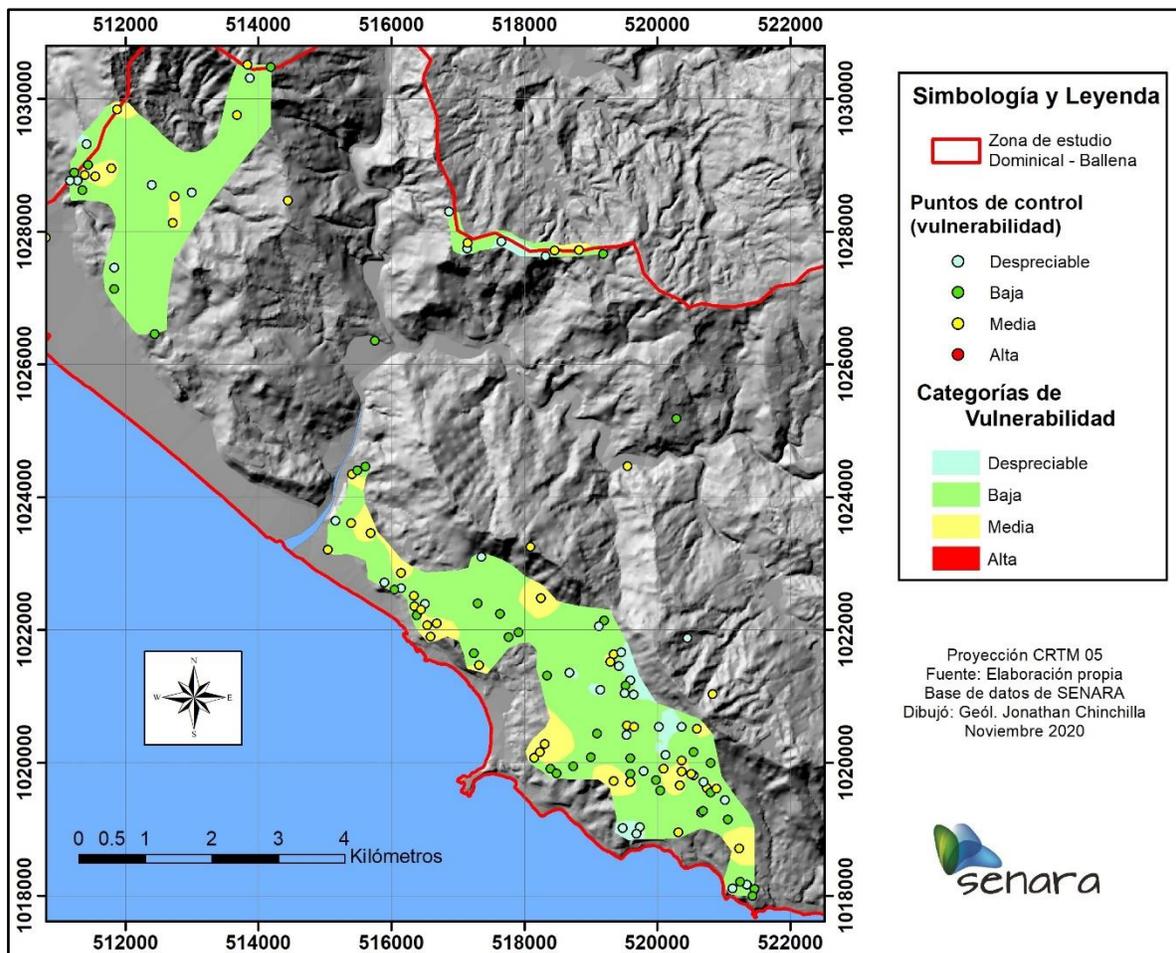


Figura 70. Mapa de vulnerabilidad intrínseca para algunos sectores entre Hatillo y Puerto Nuevo.

Por otra parte, para la zona de Uvita el análisis de vulnerabilidad intrínseca desarrollado en el acuífero aluvial muestra los valores más altos obtenidos en la zona

de estudio, con categorías de vulnerabilidad que van de media a alta. Estas categorías de vulnerabilidad se asocian en esta zona a que el acuífero aluvial es descrito en su totalidad como libre, presenta niveles del agua subterráneos muy someros (en general menor a los 5 metros) y la zona no saturada se encuentra constituida principalmente por materiales limosos y arenosos, con conductividades hidráulicas relativamente altas que facilitan la percolación de los posibles contaminantes al acuífero. La categoría de vulnerabilidad alta se concentra principalmente en el sector de Colonia (Chaman), así como en el área de Bahía en donde se ubican actualmente los pozos de abastecimiento público de la ASADA de Uvita, lo cual es un aspecto relevante en cuanto al ordenamiento territorial que se debe dar en estos sectores con miras a la protección del recurso hídrico y el abastecimiento poblacional (Figura 71).

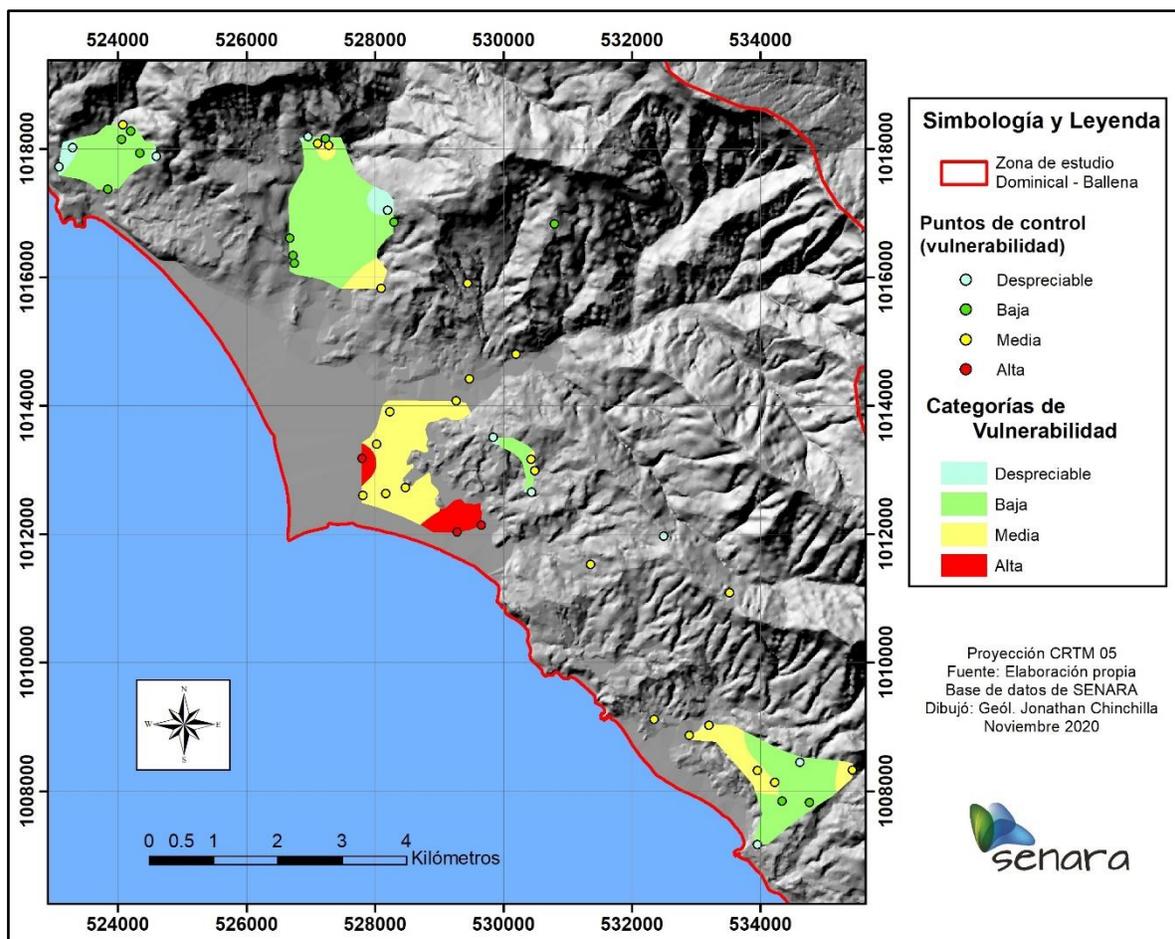


Figura 71. Mapa de vulnerabilidad intrínseca para algunos sectores entre las playas Hermosa y Ballena.

Es importante mencionar, que durante las inspecciones de campo se identificaron muchos terrenos colindantes con el Parque Nacional Marino Ballena, en los que la presencia de niveles de agua subterránea muy someros genera condiciones de alta humedad en el suelo. Es probable que estos sectores se asocien con condiciones de vulnerabilidad alta o extrema, sin embargo, la información disponible reciente no ha permitido la generación de mapas que incluyan estos sectores. En la actualidad, estos sitios se asocian principalmente con actividad ganadera, pero es importante poner atención a su desarrollo y a las actividades futuras que se quieran realizar en ellos, debiendo contar de previo con estudios hidrogeológicos detallados que caractericen adecuadamente el medio y garanticen la protección del recurso hídrico.

En el anexo 7 se incluyen los análisis de vulnerabilidad realizados para cada uno de los 186 sitios de control considerados en el análisis, además de los mapas generados para cada uno de los parámetros G, O y D que dieron origen a los mapas de vulnerabilidad de las figuras 70 y 71.

Las figuras 72 y 73 muestran, para cada uno de los sectores en que fue posible determinar una categoría de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, cual es en la actualidad el uso de suelo predominante que se desarrolla en el área. En los sectores montañosos con categorías de vulnerabilidad predominante baja y despreciables es común el uso boscoso y de pastizal, sin embargo, hacia la zona plana en el sector de Uvita, con categorías de vulnerabilidad media y alta, se observa un uso más extendido de pastizales, actividades mixtas, urbano y en menor grado bosque, lo cual podría eventualmente generar algún tipo de conflicto con respecto a la protección del recurso hídrico en esos sectores.

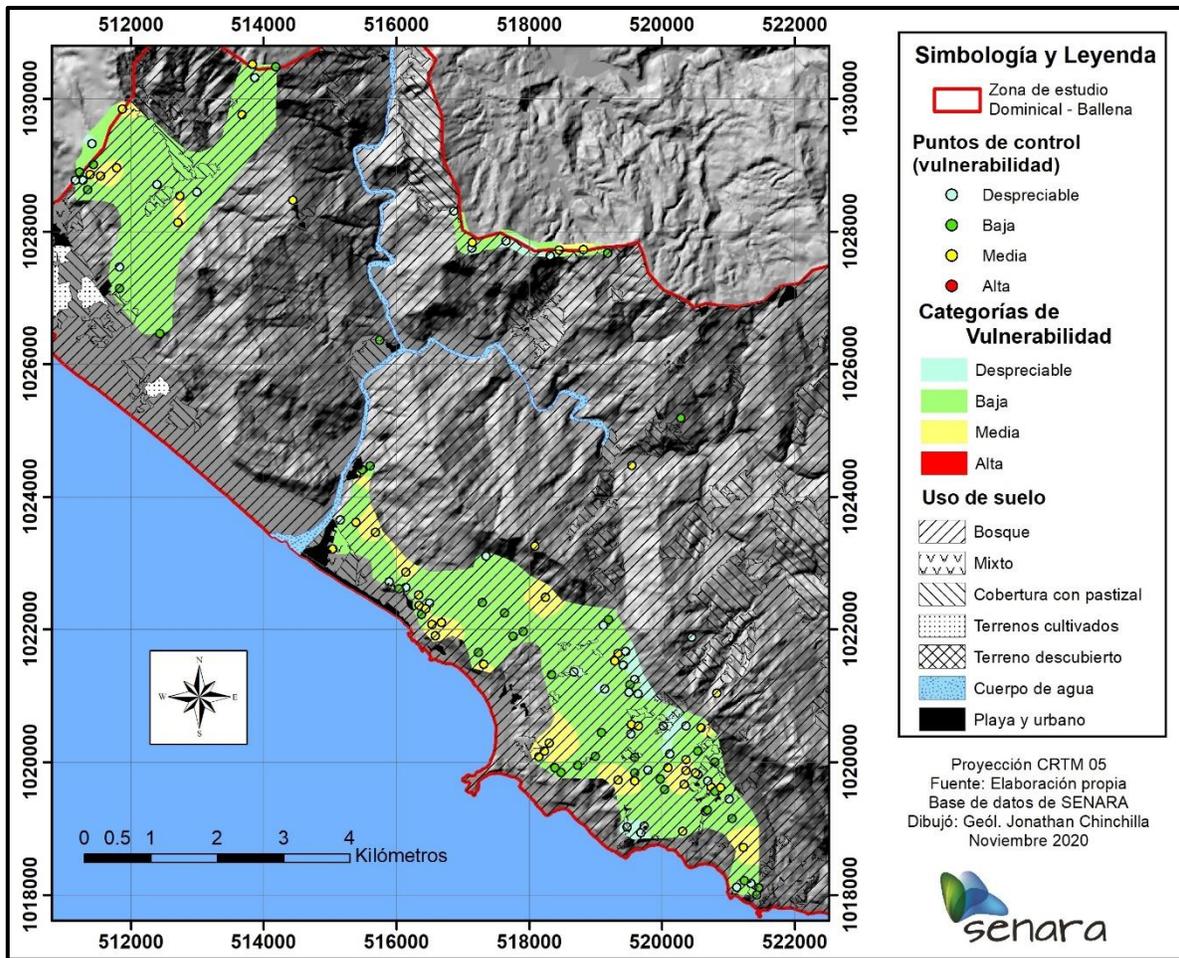


Figura 72. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y el uso de suelo, sectores Hatillo y Puerto Nuevo.

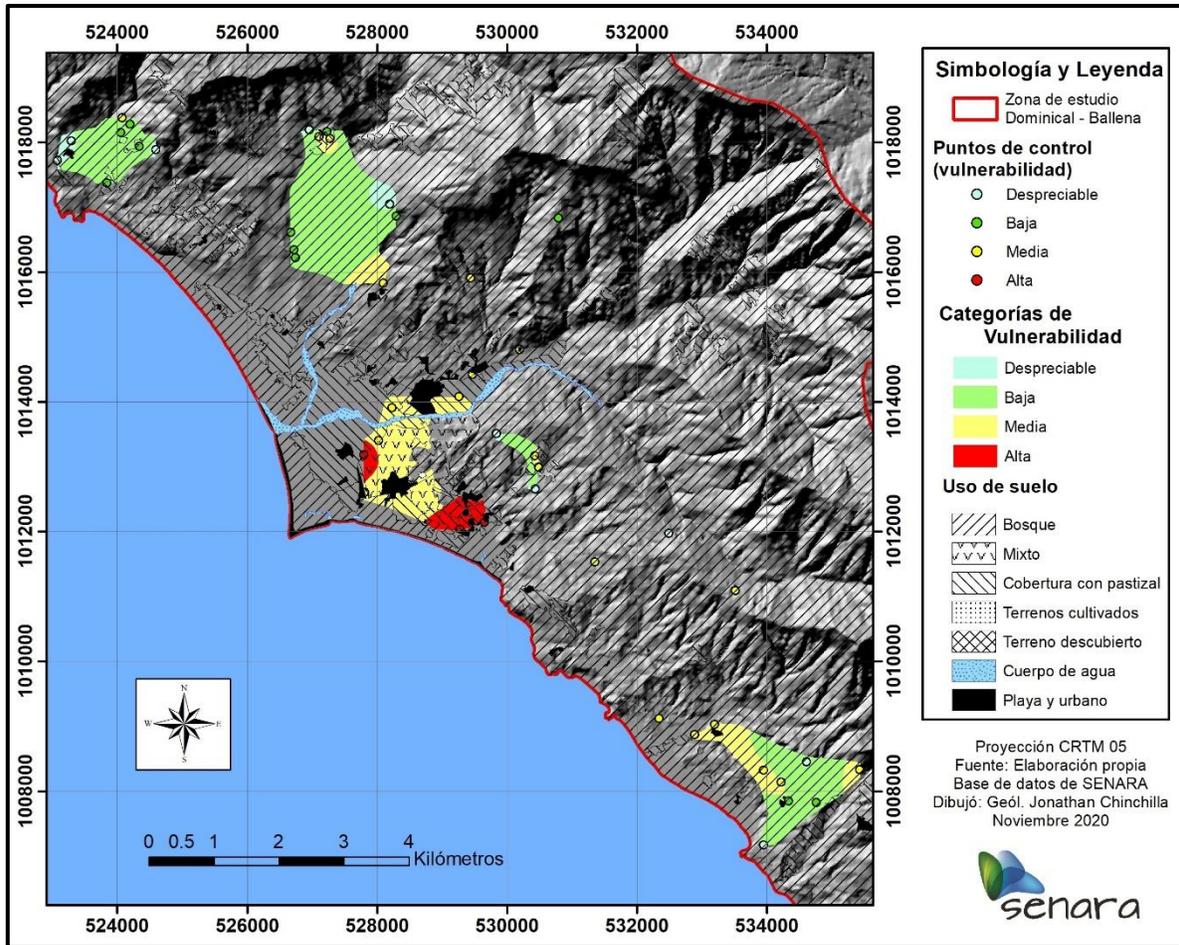


Figura 73. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y uso del suelo entre playa Hermosa y Ballena.

## 5. RECARGA POTENCIAL

### 5.1 Clima

Dentro del área de estudio se encuentran 16 estaciones meteorológicas y en los alrededores cercanos se ubican 11 estaciones (Figura 74). Estas estaciones pertenecen al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y a la Compañía Bananera de Costa Rica (CBCR).

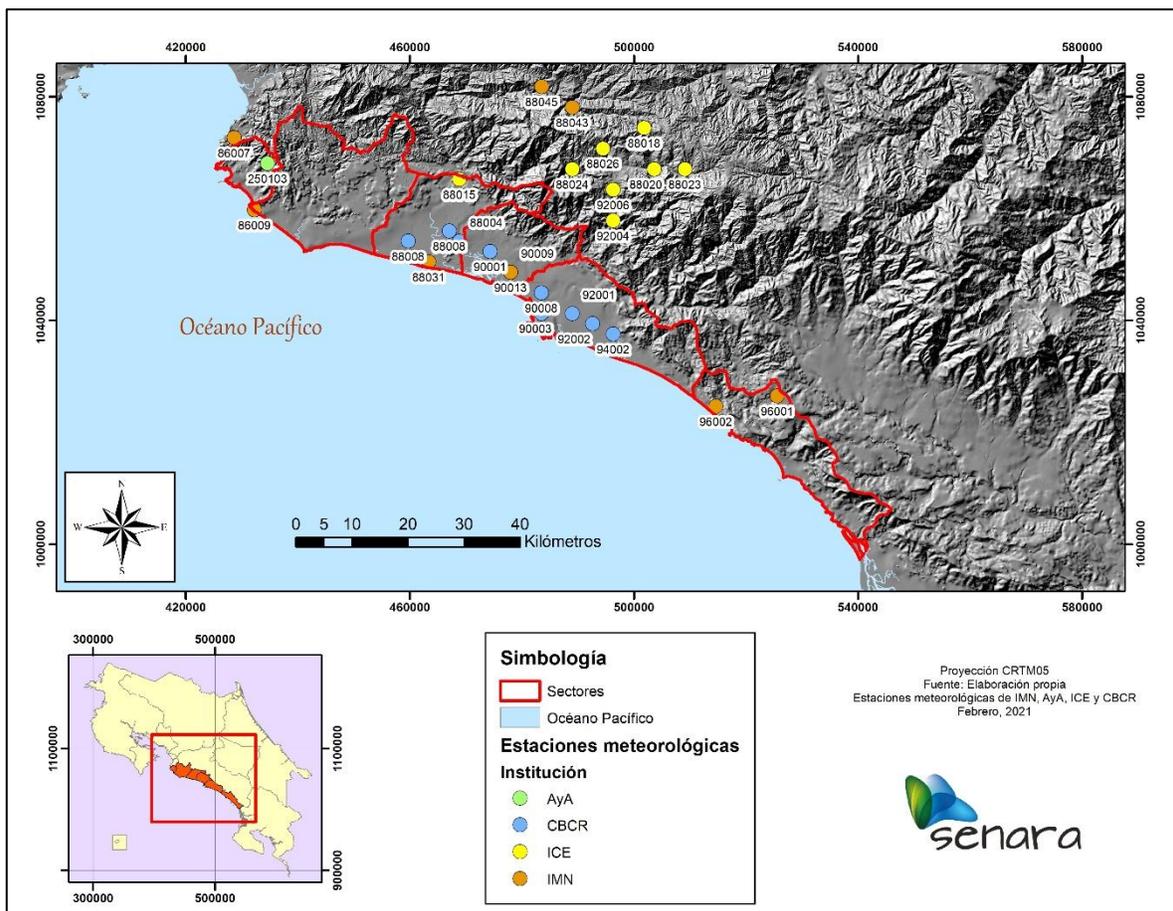


Figura 74. Estaciones meteorológicas en el área de estudio.

En la tabla 29 se muestran las características de las estaciones consultadas y los registros asociados para el análisis de datos de precipitación y temperatura.

Tabla 29. Estaciones meteorológicas consultadas en el estudio.

Estación	Número	Institución	Años	Precip.	Temp.
Damas	90009	IMN	1984-2018	Sí	Sí

La Ligua	88031	IMN	1988-2018	Sí	Sí
Tinamaste	96001	IMN	1986-2006	Sí	Sí
Hda. Barú	96002	IMN	1981-2015	Sí	Sí
Punta Leona	86007	IMN	1990-2018	Sí	No
Jacó	86009	IMN	1997-2018	Sí	No
Monterrey, Aserrí	88043	IMN	2004-2018	Sí	No
San Ignacio	88045	IMN	1995-2018	Sí	Sí
Finca Damas	90013	IMN	2009-2018	Sí	Sí
Quepos	90003	CBCR	1941-2010	Sí	No
Pocares	90001	CBCR	1950-2015	Sí	No
Finca Palo Seco	88004	CBCR	1941-2015	Sí	No
Finca Ángeles	88008	CBCR	1941-1994	Sí	No
Anita	90008	CBCR	1977-2015	Sí	No
Bartolo	92001	CBCR	1945-2015	Sí	No
Llorona	92002	CBCR	1957-2015	Sí	No
Marítima	94002	CBCR	1949-2015	Sí	No
Finca Nicoya	88008	CBCR	1941-2015	Sí	No
Playón	88015	IMN	1975-1990	Sí	No
Piedra Bruja	250103	AyA	2015-2019	Sí	Sí

En esta zona del país en general se tiene una época seca de diciembre a abril y dos épocas lluviosas separadas por un veranillo en julio, característico de la vertiente del Pacífico. Sin embargo, hacia el sector central y sureste, se presenta mayor precipitación (Figuras 75 y 76).

En promedio, la mayor precipitación se da en la parte alta de la zona de Dominical, en Barú, con precipitaciones de 4416 mm; mientras que las precipitaciones más bajas se dan en la parte alta de las cuencas del Río Grande de Candelaria y Río Pirrís, en las cercanías de Aserrí y San Ignacio, con precipitaciones de 2000 a 2500 mm, y en el sector de Punta Leona con 2342 mm de lluvia anual.

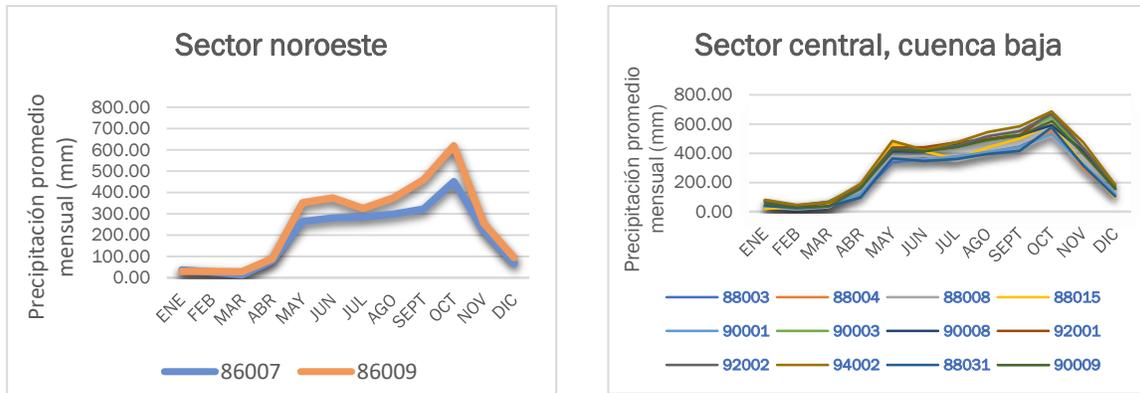


Figura 75. Comportamiento de la precipitación en los sectores noroeste y central (cuenca baja) del área de estudio.

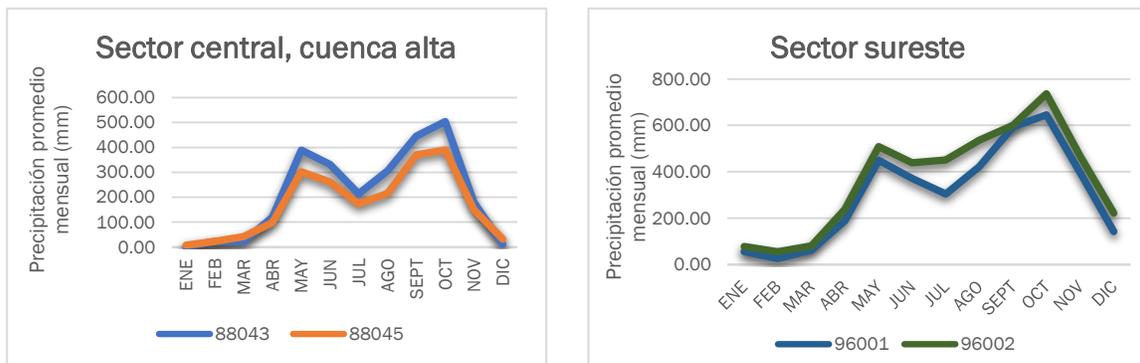


Figura 76. Comportamiento de la precipitación en los sectores central (cuenca alta) y sureste del área de estudio.

La temperatura máxima alcanza hasta 32,9°C en el mes de abril, en la zona de Parrita. La temperatura mínima baja hasta 18,6°C en el mes de enero, en la parte alta de Dominical, en Tinamaste. En los siguientes gráficos (Figura 77), se muestran las temperaturas representativas para la parte sureste (Tinamaste) y la parte central (La Ligua).

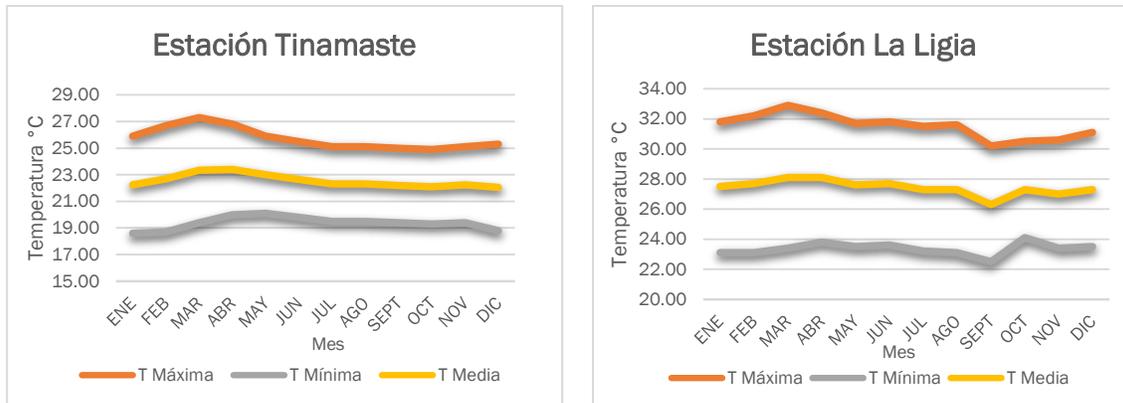


Figura 77. Registros de temperaturas para las estaciones de Tinamaste y La Ligia (Parrita).

## 5.2 Balance Hídrico de Suelos

Para la estimación de la recarga potencial a los acuíferos en la zona de estudio, se ha utilizado como primera herramienta la metodología desarrollada por Schosinsky (2006), la cual evalúa la recarga a partir de un balance hídrico de suelos, en el cual el agua de lluvia que se infiltra en el terreno y completa su ciclo, eventualmente puede percolar, alcanzar y recargar los niveles acuíferos.

Para el procesamiento de la información y el desarrollo de las distintas ecuaciones que involucra esta metodología, se construyeron los mapas de los distintos parámetros y se aplicó el álgebra correspondiente mediante la utilización del sistema de información geográfica ArcGis 10.5. Se utilizó un tamaño de celda de 100 x 100 metros para todos los mapas raster involucrados en este análisis.

Por otra parte, la unidad básica de balance que se ha utilizado para determinar la recarga potencial, corresponde con los polígonos asociados a las diversas litologías en el área. Algunas de las litologías descritas no contaban con todos los parámetros de entrada necesarios para el análisis, y también representaban un pequeño porcentaje del área en estudio, por lo que se tomaron en cuenta dentro de otras litologías de mayor área para la estimación de la recarga.

Los parámetros básicos de entrada en esta metodología se describen a continuación y se muestran los valores asignados a cada uno de ellos. Esta descripción aplica para la totalidad del área de estudio y más adelante en el capítulo se detallarán los resultados por sectores.

✓ Kv, Kp, Kfc y Profundidad de raíces

Se elaboró el mapa de uso de suelo para toda el área de estudio, por parte de la Geógrafa Katherine Briones de una Unidad de Investigación Hidrogeológica. A partir de este se determinó que los usos de suelo que predominan en la zona de estudio corresponden con bosques, cobertura con pastizal y terrenos cultivados, con presencia de pocas áreas asociadas a la parte urbana, terreno descubierto y usos mixtos (pastos con árboles o algunas viviendas). Las áreas y porcentajes por tipo de uso se muestran en la tabla 30, mientras que la distribución de todos los usos en las figuras 78, 79 y 80.

Tabla 30. Uso del suelo en la zona de estudio.

Clasificación Uso de suelo	Area (km <sup>2</sup> )	Porcentaje del área de estudio
Bosque	961,79982	54,92
Cobertura con pastizal	406,73273	23,22
Terrenos cultivados	248,96348	14,22
Cuerpo de agua	86,48925	4,94
Urbano	22,47333	1,28
Uso mixto	10,59950	0,60
Terreno descubierto	9,45883	0,54
Playa	4,49583	0,26
Mar	0,18527	0,01
<b>Total</b>	<b>1751,198</b>	

El mapa de uso de suelo se reclasificó con respecto a la tabla 31, para la asignación del parámetro Kv.

Tabla 31. Valores de Kv para el Pacífico Central.

Clasificación de Uso de suelo	Kv
Terreno descubierto	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Uso mixto	0,12
Cobertura con pastizal	0,18
Bosque	0,20
Urbano	0
Playa	0
Cuerpo de agua	0
Mar	0

Fuente: Schosinsky (2006), Ramírez (2007) e interpretación personal.

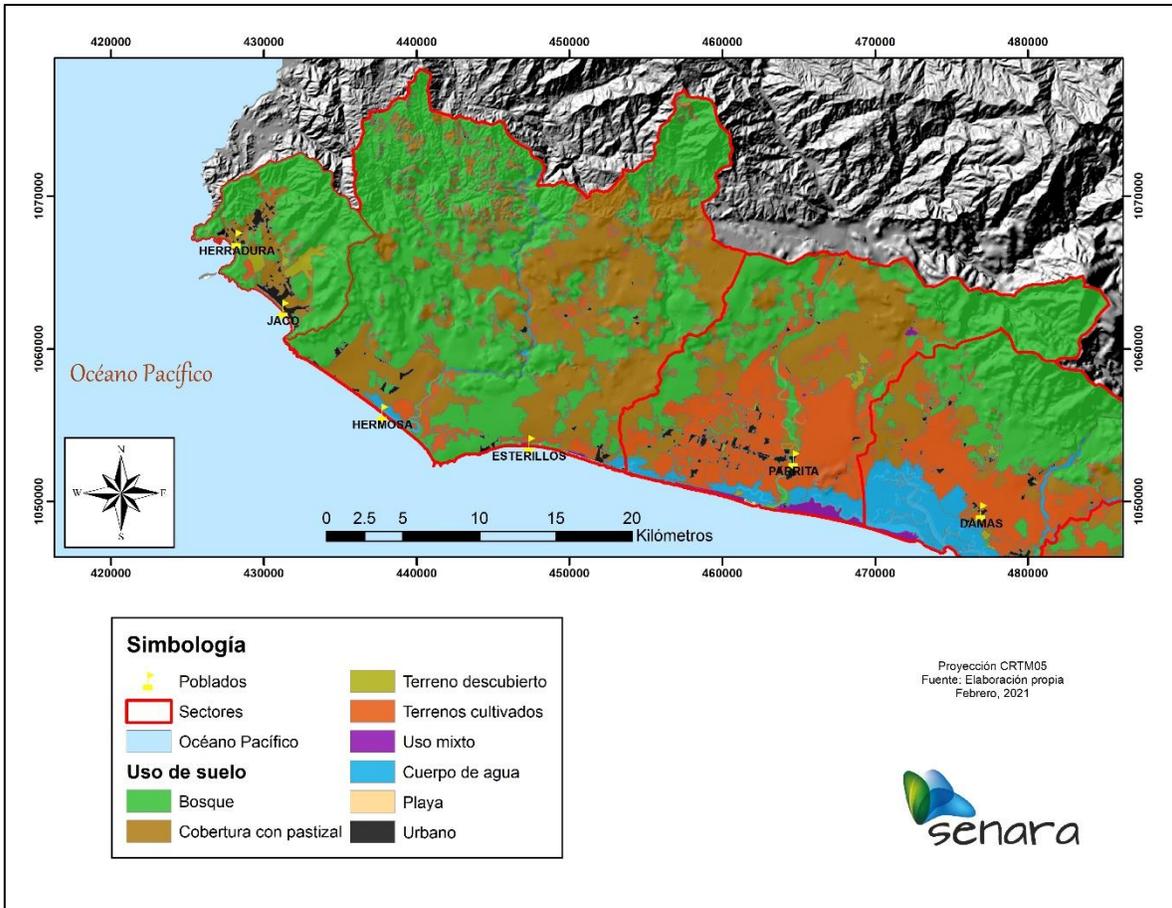


Figura 78. Mapa de uso de suelo en las zonas de Herradura, Jacó, Hermosa, Esterillos y Parrita.

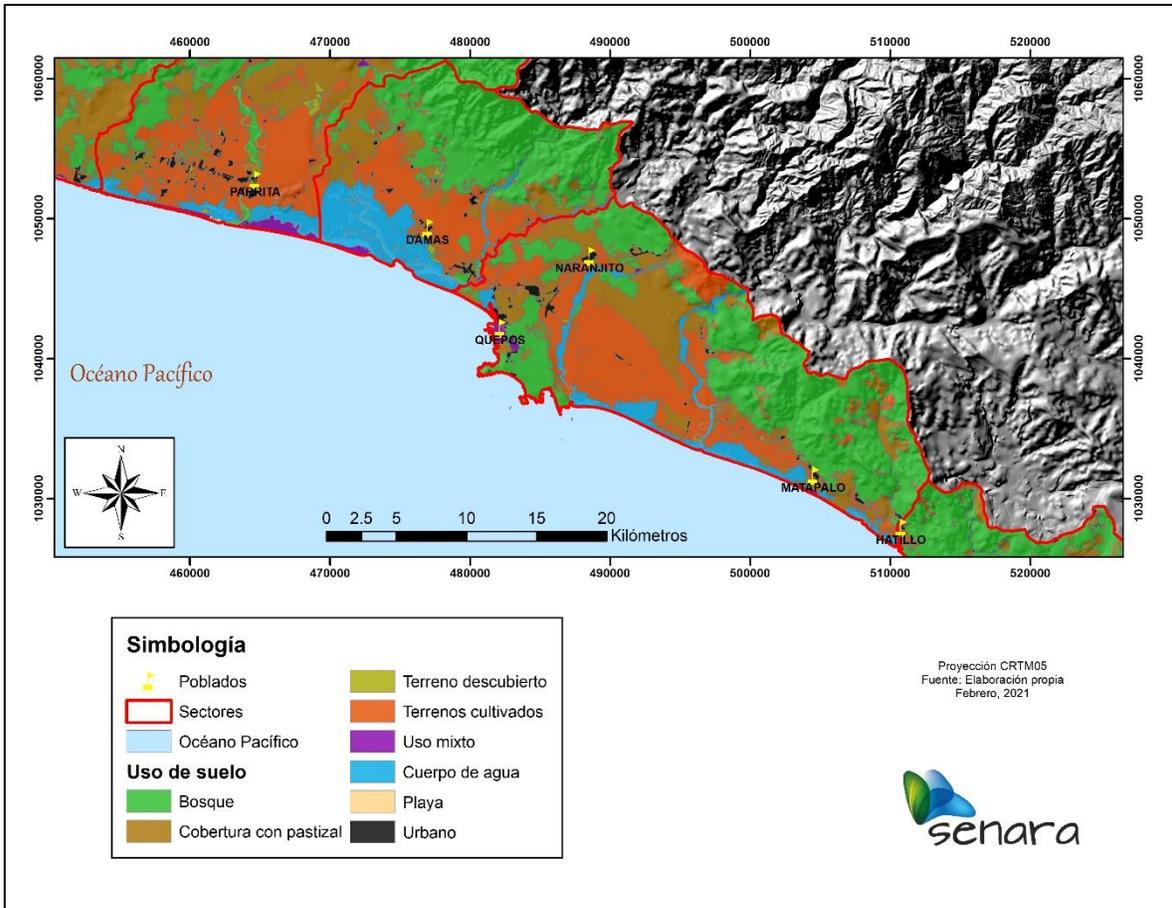


Figura 79. Mapa de uso de suelo en las zonas de Damas, Quepos, Naranjito y Matapalo.

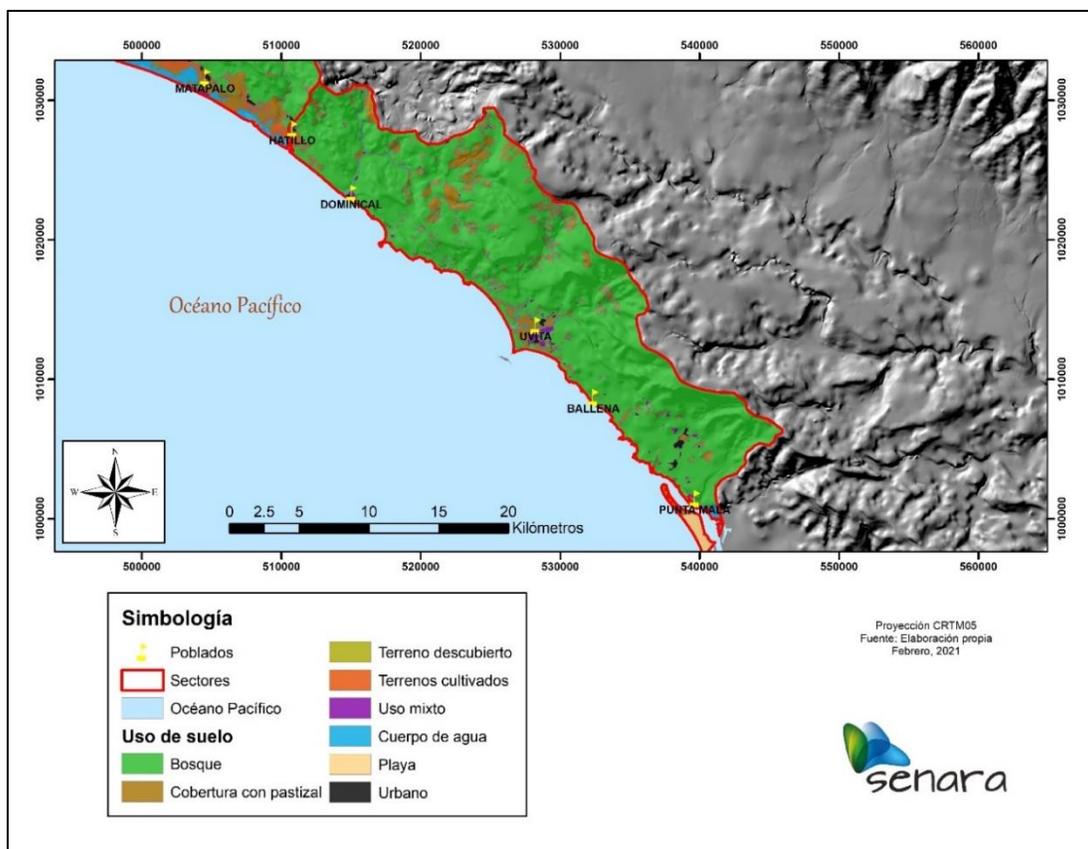


Figura 80. Mapa de uso de suelo en las zonas de Dominical Uvita, Ballena y Punta Mala.

A partir del mapa de uso de suelo, también se asignaron los valores de profundidad de raíces, los cuales se muestran en la tabla 32.

Tabla 32. Valores de profundidad de raíces en el Pacífico Central.

Uso de suelo	Profundidad de raíces (m)
Terreno descubierto	0
Cuerpo de agua	0
Arroz	0,75
Cultivo de papaya	1
Cultivos no diferenciados	0,50
Cultivos de maíz	1,35
Palma	0,9
Plantación de banano	0,65
Teca	0,30
Playa	0
Bosque	2,5
Uso mixto	0,45
Mar	0
Cobertura con pastizal	0,40
Urbano	0

Fuente: FAO (2006), Jiménez (2002), Schosinsky (2006), Fonseca (2003) y Ramírez (2007).

Para definir el parámetro de  $K_{fc}$ , se consideraron 464 pruebas de infiltración distribuidas a lo largo de toda el área de estudio (Anexo 5). La asignación de valores de  $f_c$  y posterior  $K_{fc}$  se realizó a partir de polígonos de Thiessen, tomando en consideración el mapa geológico como base.

En el caso del parámetro  $K_p$ , se realizó un Modelo de Elevación Digital del terreno, a partir de las curvas 1:25 000 disponibles en la plataforma del SNIT, se elaboró un mapa de pendientes y se procedió a reclasificar el mapa con base a los siguientes valores (Tabla 33).

Tabla 33. Valores de  $K_p$  en el Pacífico Central.

Descripción de pendiente	Pendiente (%)	Factor $K_p$
	<0,02	0,35
Muy plana	0,02 – 0,06	0,30
	0,06 – 0,3	0,25
Plana	0,3 – 0,4	0,20
	0,4 – 1	0,175
Algo plana	1 – 2	0,15
Promedio	2 – 7	0,10
Fuerte	>7	0,06

Fuente: Modificado de Schosinsky (2006).

- ✓ Fracción de lluvia interceptada por el follaje y coeficiente de retención ( $C_{fo}$ )

Según la metodología Schosinsky (2006), para el caso de bosques se asume un  $C_{fo}$  de 0,2, mientras que para otros usos este coeficiente es de 0,12. Adicionalmente, en forma conservadora se ha asignado a las zonas con uso urbano un coeficiente de 1 tomando en consideración la impermeabilización del terreno, y para los cuerpos de agua, este coeficiente se ha asignado como 0.

- ✓ Capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente

Para el manejo de los datos asociados con los parámetros de capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente de suelos, se ha optado por utilizar el método de polígonos de Thiessen en la generación de los mapas respectivos, al considerarse como un método más adecuado para extender la validez áreal de datos puntuales que no necesariamente presentan una variación continua entre dos o más puntos de observación.

Se consideraron 359 muestras a lo largo del área de estudio y se tomó como base el mapa geológico, para asignar los valores por litología asociada. La información completa de las muestras se puede consultar en el Anexo 5.

Finalmente, aplicando la metodología desarrollada por SENARA, para la elaboración de estudios hidrogeológicos de planes reguladores, la cual se encuentra publicada en el periódico oficial La Gaceta No. 137 del 16 de julio del 2015, se llevó a cabo el mapa de recarga potencial, el cual considera cinco clases a través del método de rango, donde los intervalos se definen tomando el valor máximo y mínimo de recarga y dividiendo entre el número de clases.

### **5.3 Resultados de Recarga Potencial por sectores**

#### **5.3.1 Recarga potencial Herradura – Jacó**

##### ✓ Precipitación

Para este sector el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) cuenta con la información de tres estaciones meteorológicas, Punta Leona (86007), Jacó (86009) y Muelle Herradura (86013). Por otra parte, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) tiene instalada la estación meteorológica Piedra Bruja (250103). Las estaciones Jacó y Punta Leona tienen solo información de la precipitación con registros de 30 y 23 años de registro respectivamente, a su vez, las estaciones Piedra Bruja y Muelle Herradura cuentan con solo 5 años de registro de información de precipitación y de temperatura promedio media también. Los datos de las precipitaciones promedio para cada estación se encuentran en la tabla 34, así como el dato del promedio ponderado con base en todas las estaciones, el cual será utilizado para calcular la recarga potencial por medio del balance de humedad de suelos en las microcuencas de la zona de estudio.

Tabla 34. Precipitación promedio mensual para las estaciones localizadas en el sector Herradura-Jacó.

Estación y datos de precipitación en (mm)					
Mes	Punta Leona	Jacó	Piedra Bruja	Muelle Herradura	Promedio ponderado
Enero	35,62	28,16	29	40,40	32,71
Febrero	25,25	28,05	2	0,05	23,13
Marzo	12,13	28,22	15	5,35	17,94
Abril	80,82	86,09	120	70,85	84,74
Mayo	260,7	351,42	323	232,45	296,73
Junio	273,04	370,42	285	248,20	307,58
Julio	278,39	341,87	281	301,28	303,61
Agosto	302,3	37373,3	318	400,50	336,56
Setiembre	326,61	456,9	349	441,05	384,1
Octubre	444,71	609,36	583	630,85	528,93
Noviembre	214,47	246,86	273	224,00	231,72
Diciembre	65,25	88,72	96	72,08	76,79

Con los datos de la tabla anterior se tiene una precipitación promedio mensual de 2624,54 mm para la zona de Herradura y Jacó.

✓ Evapotranspiración

La estación meteorológica Damas (90009) se encuentra en la zona de Quepos a unos 45 km de distancia hacia el SE del sector de Herradura y Jacó, sin embargo es la más cercana con información de temperatura media en el período que abarca los años de 1984 al 2017, insumo fundamental para el cálculo de la evapotranspiración potencial.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial en el área de estudio se utilizó el método empírico de Blaney-Criddle, que considera los datos de la temperatura media y las horas promedio mensuales de sol para la latitud en que se ubica la estación meteorológica Damas. En la tabla 35 se muestran los resultados de evapotranspiración obtenidos.

Tabla 35. Datos climáticos utilizados en el sector de Herradura-Jacó.

Estación Damas 90 009			
Mes	PS (% horas luz)	Temp media	ETP (mm)
Enero	8,13	26,55	165,14
Febrero	7,47	27	153,28
Marzo	8,45	27,6	175,73
Abril	8,37	27,85	175,03
Mayo	8,81	27,35	182,2
Junio	6,6	27,05	176,67
Julio	8,86	26,8	180,99
Agosto	8,71	26,7	177,53
Setiembre	8,25	26,55	167,58
Octubre	8,34	26,45	169,03
Noviembre	7,91	26,35	159,95
Diciembre	8,1	26,55	164,54

## ✓ Recarga

Una vez aplicada la metodología de Schosinsky (2006) la recarga potencial para el sector de Herradura y Jacó está en un rango de 0 mm y 879 mm anuales que corresponde a un 0 y un 33,5% respectivamente de los 2625 mm de precipitación promedio anual, en las zonas urbanas se ha determinado una recarga potencial de 0 mm. El promedio de recarga potencial para toda la zona es de 549 mm anuales, por lo que para un área de 77,89 km<sup>2</sup> se tiene un caudal de 1356 l/s ( $4,28 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/año). En la tabla 36, se muestra la recarga potencial por unidad hidrogeológica.

Tabla 36. Recarga potencial por litología, sector Herradura-Jacó.

Unidad hidrogeológica	Recarga potencial (mm/año)	Área (m <sup>2</sup> )	Q promd (m <sup>3</sup> /año)	Q promd (l/año)	Q (l/s)
Complejo de Nicoya (basaltos)	554,16	50467574,7	0,89	27967261552	886,84
Complejo de Nicoya (basaltos)	515	2349269,25	0,04	1209882687	38,37
Depósitos aluviales recientes	592,46	10174515,2	0,19	6028041947	191,15
Depósitos aluviales recientes	533,15	4296506,49	0,07	2290673039	72,64
Formación Punta Carballo	497,98	10610295,4	0,17	5283691469	167,54

Totales	2692,76	77898161,1	1,36	42779550692	1356,53
---------	---------	------------	------	-------------	---------

En la zona de estudio el valor máximo de recarga obtenido fue de 879 mm y el mínimo de 0 mm, por lo que los rangos para las cinco clases de recarga potencial se establecen según se muestra en la tabla 37.

Tabla 37. Clases de recarga en función del rango, sector Herradura – Jacó.

CLASE	RECARGA POTENCIAL	RANGO (mm)
1	Muy baja	0 – 176
2	Baja	176 – 352
3	Media	352 – 528
4	Alta	528 – 704
5	Muy Alta	704 – 879

Los aluviones en el sector del acuífero Herradura tienen una capacidad de recarga potencial media-alta con un intervalo entre 454 y 809 mm/año respectivamente, esto se debe a la baja pendiente del terreno y los usos de suelo predominante de zacate, algunas plantaciones y por lo tanto se ha modelado con baja profundidad de raíces que disminuye la evapotranspiración, favoreciendo así la infiltración eficaz o profunda en el balance de humedad de suelos.

Los aluviones en el sector del acuífero Jacó tienen una capacidad de recarga potencial media-alta con un intervalo entre 509 y 874 mm/año, esto se debe a la baja pendiente del terreno y los usos de suelo predominante de zacate, algunas plantaciones las cuales en ciertas épocas del año se encuentran sin ningún tipo de cobertura ya que los están preparando para la siembra de los cultivos y por lo tanto se ha modelado con baja profundidad de raíces que disminuye la evapotranspiración, favoreciendo así la infiltración eficaz o profunda en el balance de suelos.

En el sector plano al NW de Jacó, específicamente en la zona plana que comunica Herradura y Jacó en los basaltos del Complejo de Nicoya; la recarga potencial es alta con valores entre los 664 y 874 mm/año ya que es un sector plano y se destaca que en el momento de realizar esta investigación contaba con poca cobertura vegetal, disminuyendo así la evapotranspiración.

Para los basaltos del Complejo de Nicoya, en los sectores con las mayores pendientes en las filas y cerros, se tiene un potencial de recarga medio con 518 mm/año, este se debe a que la gran mayoría de estas unidades están cubiertas por

bosques primarios y/o secundarios, los cuales por su profundidad de raíces de la variada cantidad de árboles y arbustos favorecen la evapotranspiración.

Las rocas sedimentarias de la Formación Punta Carballo, específicamente en los sectores con las mayores pendientes en las filas y cerros en la zona norte del área de estudio, tienen potencial de recarga medio a alto, con un intervalo entre los 461 y los 848 mm anuales, debido a que la gran mayoría, al igual que el Complejo de Nicoya; está cubierta por bosques primarios y/o secundarios, los cuales por su profundidad de raíces de la variada cantidad de árboles y arbustos favorecen la evapotranspiración.

También estas zonas en las rocas del Complejo de Nicoya y las areniscas de la Formación Punta Carballo tienen pendientes mayores al 7% sin embargo favorece muy poco la escorrentía, a pesar que estas unidades tienen las recargas más bajas en la zona de estudio, las mismas tienen un área muy significativa de captación y la recarga en estas rocas juega un papel muy importante en el flujo base de los ríos y las quebradas en la época seca, que en las zonas influentes recargan los depósitos aluviales en las zonas más bajas y de menor pendiente.

En la figura 81 se muestra el mapa de recarga potencial anual para el sector de Herradura y Jacó y en la figura 82 se realiza la sobreposición del mapa de Recarga Potencial y el Mapa de Uso del Suelo.

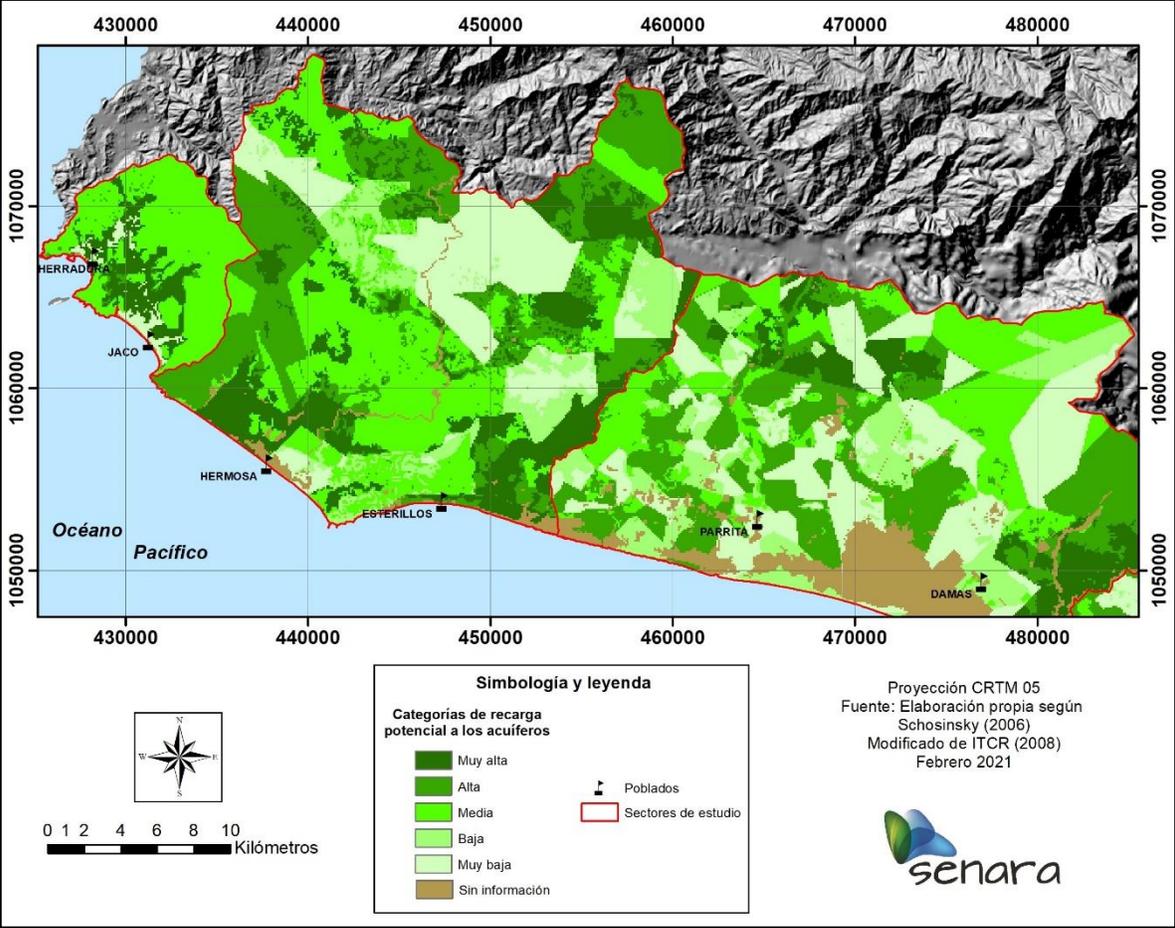


Figura 81. Mapa de recarga potencial, sectores de Herradura, Jacó, Hermosa, Esterillos y Parrita.

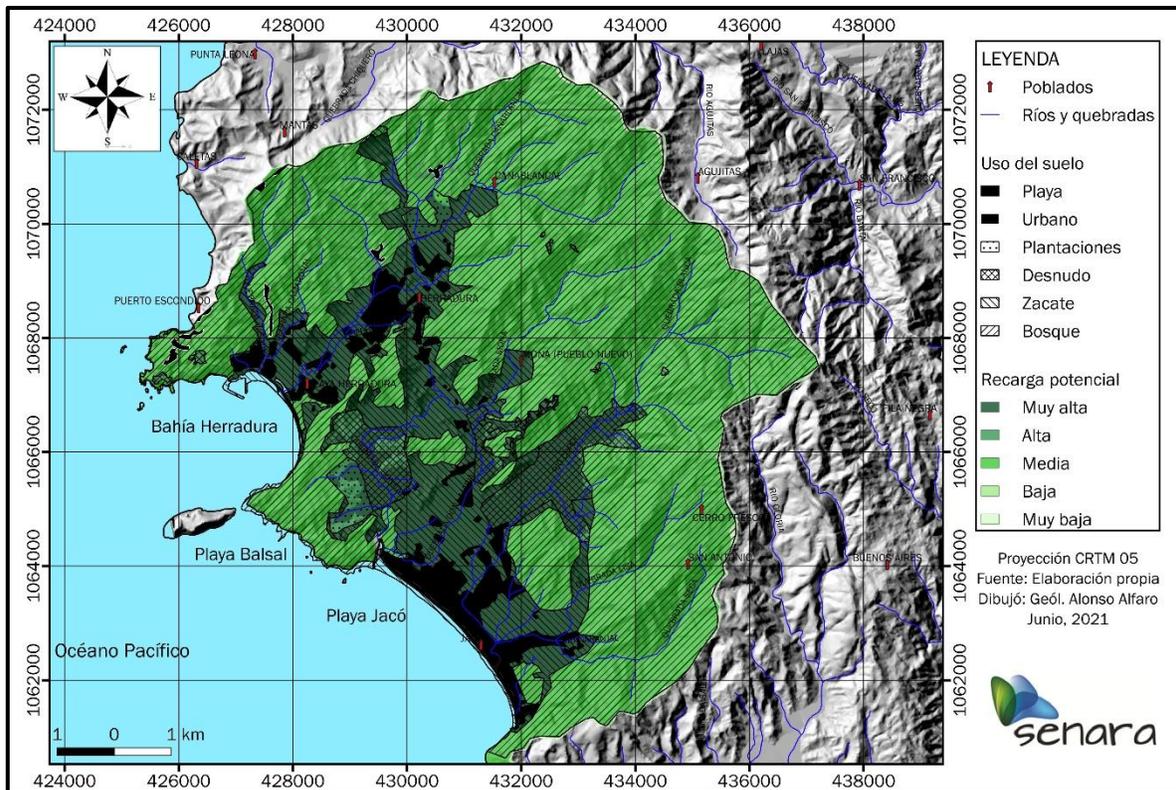


Figura 82. Mapa de recarga potencial y uso del suelo, sector Herradura y Jacó.

### 5.3.2 Recarga potencial Hermosa – Esterillos

✓ Precipitación y evapotranspiración

Para el área de Hermosa y Esterillos, se utilizaron los datos de precipitación de las estaciones Jacó y Finca Ángeles, ya que eran las más cercanas a este sector y porque cuentan con 21 años y 53 años de registro respectivamente. Los meses más lluviosos fueron setiembre y octubre, por lo que la estimación de la recarga inició en el mes de noviembre.

En cuanto a la temperatura, la estación más cercana que registra este parámetro es la estación Damas, con 34 años de registro. En la tabla 38 se muestran los datos de precipitación, temperatura y ETP utilizados para el cálculo de recarga.

Tabla 38. Datos climáticos utilizados en el sector de Hermosa y Esterillos.

Mes	PS (% horas luz)	T media Damas (°C)	ETP	Precipitación Finca Ángeles (mm)	Precipitación Jacó (mm)
Enero	8,13	26,6	165,332	36,9	29,6

Febrero	7,47	27	153,284	15,9	29,5
Marzo	8,45	27,6	175,726	32,3	28
Abril	8,37	27,9	175.218	116,4	88,5
Mayo	8,81	27,3	181,997	336,2	352
Junio	8,6	27	176,472	364,9	374,2
Julio	8,86	26,8	180,992	364,6	325,5
Agosto	8,71	26,7	177,527	404,6	374,6
Septiembre	8,25	26,6	167,772	445,1	460,1
Octubre	8,34	26,4	168,835	543,7	619,2
Noviembre	7,91	26,4	160,130	305,6	255,3
Diciembre	8,1	26,5	164,349	110,6	93,6
Total				3076,8	3030,1

Fuente: IMN y cálculo de ETP mediante metodología de Blanney & Criddle.

#### ✓ Recarga

Para las zonas de Hermosa y Esterillos, la recarga potencial es de 9916,02 l/s, equivalente a  $312,71 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año, en la tabla 39 se muestra la distribución de la recarga según la unidad hidrogeológica litológica.

Tabla 39. Recarga potencial por litología.

Litología	Recarga (l/s)
Complejo de Nicoya (basaltos)	1993,698
Areniscas y conglomerados (no diferenciados)	614,449
Fm. Tulín	3468,511
Fm. Punta Carballo	2631,070
Depósitos aluviales recientes	1208,288
<b>TOTAL</b>	<b>9916,02</b>

La recarga potencial anual va desde los 0 mm a los 1238,79 mm, para un rango de entre 21% y 22% de la precipitación que cae en la zona.

En la figura 81 se observa el mapa de recarga clasificado en 5 rangos, los cuales son Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta. Las recargas muy bajas están asociadas a la parte alta de la cuenca, en las formaciones Tulín y Punta Carballo, mientras que las recargas muy altas están asociadas principalmente al Complejo de Nicoya y Depósitos Aluviales recientes. También se observan zonas sin información de recarga, que corresponden a cuerpos de agua y zonas urbanas.

En el sector de Hermosa y Esterillos, las recargas muy altas corresponden con zonas con cobertura con pastizales y algunos terrenos cultivados. En el caso de los

bosques, estos presentan recargas potenciales desde muy baja hasta alta. Los cultivos presentan recargas muy bajas y en algunos sectores, recargas muy altas (Figura 83).

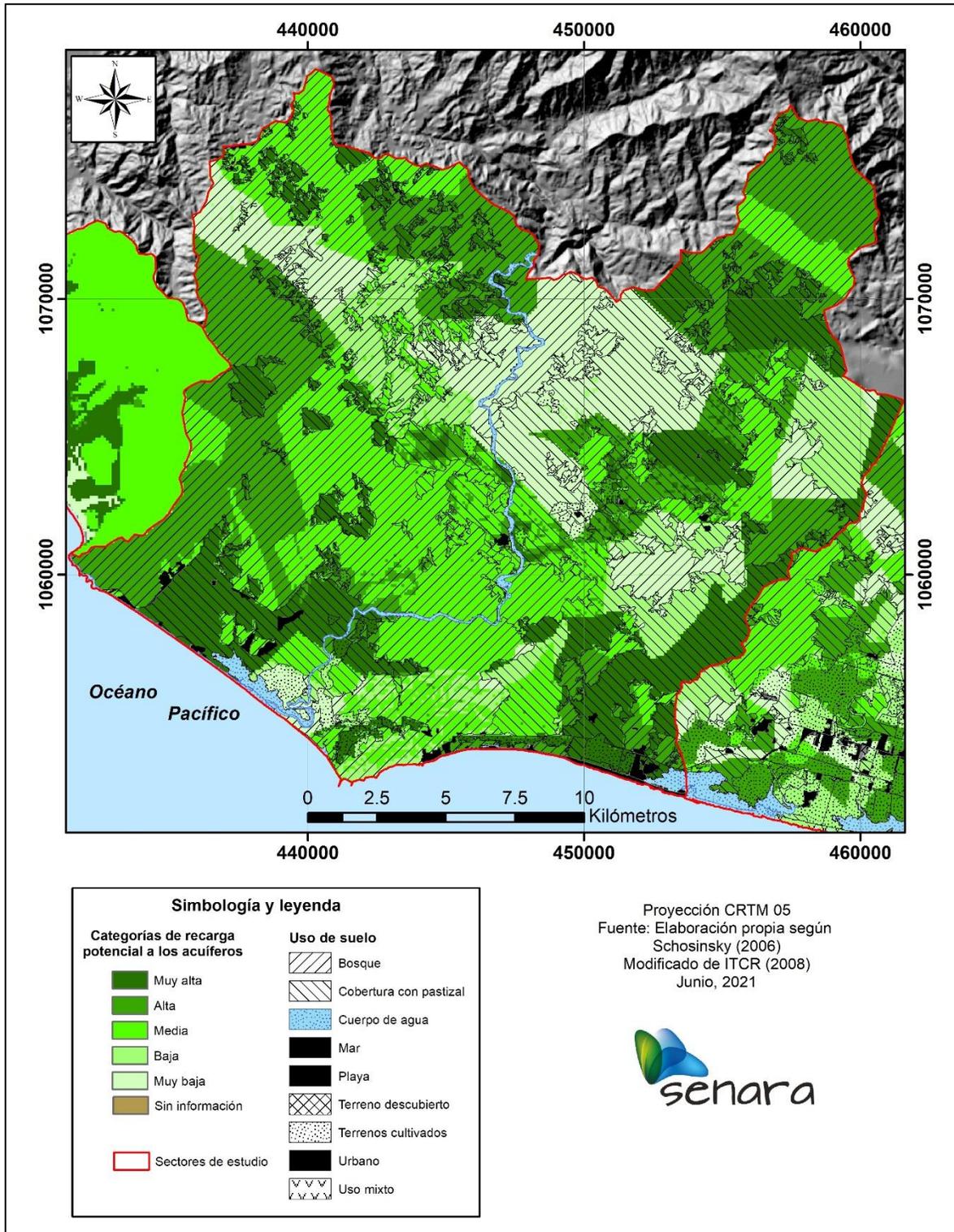


Figura 83. Mapa de recarga potencial y uso de suelo , sector Hermosa-Esterillos.

### 5.3.3 Recarga potencial Parrita – Damas - Quepos

#### ✓ Precipitación

Para las zonas de Parrita y Quepos se utilizaron los datos de precipitación de las estaciones indicadas en la tabla 40. De la misma se observa que, a partir del mes de mayo la precipitación incrementa de manera acelerada, teniendo su máximo en octubre con precipitaciones que varían de 543,70 mm para la estación Finca Ángeles hasta 619,3 mm en la estación de Damas. Se hace la aclaración que, para el caso de Damas de Quepos, existen dos estaciones en las mismas coordenadas, no obstante, son distintas por cuanto una es mecánica (90 009) y la otra automática (90013). La razón principal de la diferencia en los valores de precipitación y temperatura son los periodos con lo que se generaron. La estación 90 009 de 1984 a 2018 (lluvia) y 1984 a 2017 (temperaturas), en el caso de la automática de 2009 a 2018. Para el presente análisis se utilizaron los datos de la estación 90 009 que representa mejor la zona, ya que ha registrado eventos Niño y Niña, en mayor cantidad.

Tabla 40. Datos climáticos del sector Parrita-Quepos.

Estación y datos de precipitación en (mm).					
Mes	Damas 90 009	Fc La ligia 88 031	Playon 88 015	Fc Angeles 88 003	Anita 90 008
Enero	60,0	40,5	19	36,90	69,40
Febrero	28,2	25,9	33	15,90	31,90
Marzo	40,3	36,9	52	32,20	65,70
Abril	160,4	96,7	192	116,40	176,10
Mayo	423,5	365,3	466	336,20	411,90
Junio	414,16	347,1	412	364,90	412,00
Julio	440,5	361,2	362	364,60	458,80
Agosto	491,0	395,9	441	404,60	496,20
Setiembre	521,6	417,9	501	445,10	523,80
Octubre	619,3	577,8	600	543,70	592,60
Noviembre	392,7	313,7	324	305,60	413,50
Diciembre	158,4	105,5	98	110,60	158,10

Fuente: IMN.

En virtud que se contaba con datos de precipitación de cinco estaciones, se procedió a aplicar el método de polígonos de Thiessen a través de la herramienta de ARcGis, con el fin de asignarle a cada zona el dato respectivo de precipitación según la

ubicación. Lo anterior, en virtud de los micro-climas existentes en el área de estudio y aprovechar al máximo la información meteorológica disponible.

✓ Evapotranspiración

Para el cálculo de la ETP se utilizaron los datos de las estaciones Damas 90 009 y Finca La Ligia 88031, son las únicas con registros de temperatura media, y se aplicó la fórmula de Blaney & Criddle sugerida en la metodología Schosinsky (2006), que contempla además el porcentaje de horas luz. En la tabla 41 se muestran los datos obtenidos una vez aplicada la fórmula a través de una hoja electrónica de Excel.

Tabla 41. Datos de evapotranspiración de las estaciones Damas y Finca La Ligia, sector Parrita-Quepos.

Estación Damas 90 009				Estación Finca La Ligia 88 031			
Mes	PS (% horas luz)	Temp media	ETP (mm)	Mes	PS (% horas luz)	Temp media	ETP (mm)
Enero	8,13	26,6	165,33	Enero	8,13	27,5	168,7
Febrero	7,47	27	153,28	Febrero	7,47	27,7	155,69
Marzo	8,45	27,6	175,73	Marzo	8,45	28,1	177,67
Abril	8,37	27,9	175,22	Abril	8,37	28,1	175,99
Mayo	8,81	27,3	182	Mayo	8,81	27,6	183,21
Junio	6,6	27	176,47	Junio	6,6	27,7	179,24
Julio	8,86	26,8	180,99	Julio	8,86	27,3	183,03
Agosto	8,71	26,7	177,53	Agosto	8,71	27,3	179,93
Setiembre	8,25	26,6	167,77	Setiembre	8,25	26,3	166,63
Octubre	8,34	26,4	168,83	Octubre	8,34	27,3	172,29
Noviembre	7,91	26,4	160,13	Noviembre	7,91	27	162,31
Diciembre	8,1	26,5	164,35	Diciembre	8,1	27,3	167,33

Fuente: IMN y cálculo de ETP mediante metodología de Blaney & Criddle.

De la tabla anterior, se desprende que para los meses de mayo a agosto se cuenta con los datos de evapotranspiración más elevados de 176,47 mm a 183,21 mm, registrándose los más altos a partir de la estación localizada en Finca La Ligia, sector de Parrita.

✓ Recarga

A partir del Algebra de Mapas realizado con la información descrita párrafos atrás, se obtuvieron los siguientes resultados de recarga potencial para la zona de Parrita y Quepos, según la litología (Tabla 42).

Tabla 42. Recarga potencial según litología, sector Parrita-Quepos.

Litología	Area (m <sup>2</sup> )	Qpromd (m <sup>3</sup> /año)	Q promd (l/año)	Q promd (l/s)
Areniscas y Conglomerados no Diferenciados	27 450 000	26 242 836,7	26 242 836 705	832,15
Fm. Tulín	41 190 000	34 932 131,06	34 932 131 057	1 107,69
Fm. Fila de Cal	8 500 000	6 841 353,27	6 841 353 272	216,94
Fm. Terraba	174 430 000	139 440 822,1	1,39441E+11	4 421,64
Mb. Roca Carballo	21 680 000	9 462 877,14	9 462 877 142	300,07
Depósitos aluviales recientes	167 120 000	137 487 440,8	1,37487E+11	4 359,70
Totales	440 370 000	354 407 461,07	354 407 461 107,8	11 238,2

De la tabla 42, se desprende que la recarga potencial para la zona de Parrita – Quepos es de 11 238,2 l/s, que equivale a un 23,31% de la precipitación promedio anual en la cuenca (48 210,46 l/s). Destaca en la figura 84 que la mayor recarga ocurre en las rocas de las formaciones de Depósitos Aluviales Recientes y Terraba, correspondientes a sistemas poroso y fracturado respectivamente, siendo que en el medio poroso, la presencia de capas de arcillas pueden estar incidiendo en los resultados obtenidos.

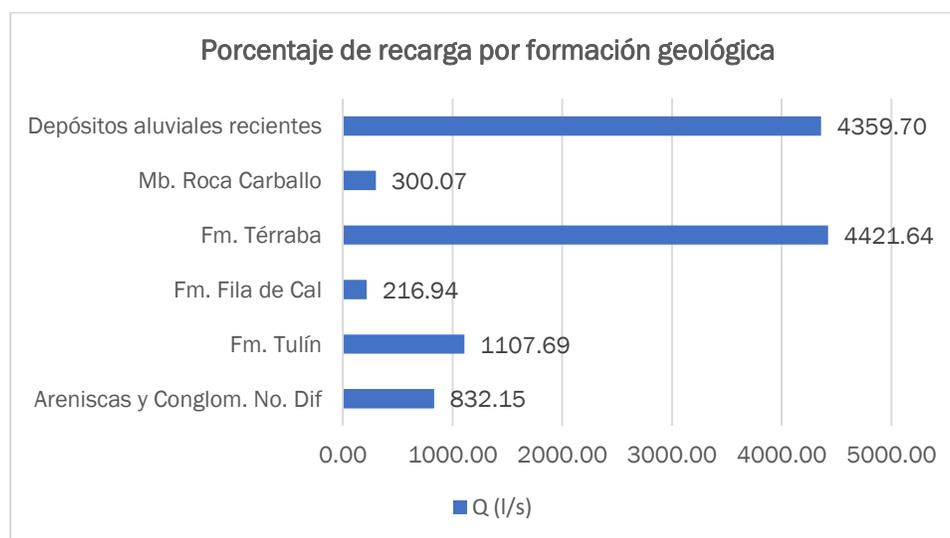


Figura 84. Porcentaje de recarga potencial por formación geológica.

En la figura 81 y la tabla 43, se muestra la recarga potencial que va desde muy baja (0-362,338 mm) hasta muy alta (1449,352-1811,69 mm), categorías definidas en función de los rangos establecidos mediante la metodología de (SENARA, 2015). Las zonas con recarga baja a muy baja por general coinciden con suelos con conductividad

hidráulica bajas, por ejemplo, en los Depósitos Aluviales Recientes varía entre 0,002 a 0,00144 m/día, asociándose eventualmente a la presencia de capas de arcilla, mientras que en las rocas de las formaciones Térraba y Tulín oscila entre 0,02 y 0,00144 m/día, aspecto que pueda asociarse a la porosidad secundaria desarrollada, sumado a un uso de suelo de bosque. No obstante, se considera que el uso de suelo vinculado no es tan determinante como la conductividad hidráulica.

Tabla 43. Clases de recarga potencial en función del rango, sector Parrita-Quepos.

No.	Categoría de recarga	Rango (mm)
1	Muy baja	0 - 362,33
2	Baja	362,33 - 724,67
3	Media	724,67 - 1087,01
4	Alta	1087,01 - 1449,35
5	Muy alta	1449,35 - 1811,69

Las zonas que se presentan sin información en la figura 81, es por cuanto corresponden con cuerpos de agua como ríos, lagunas o manglares, así como las zonas urbanas, debido a que no se consideraron dentro de la cuantificación de recarga, al tomar en cuenta la impermeabilización que sufren los terrenos por el desarrollo de infraestructura.

A partir de la figura 85 se desprende que las zonas categorizadas como recarga alta y media se caracterizan por la presencia de bosques y coberturas con pastizal en los sectores norte de Quepos y Parrita, mientras que las áreas cultivadas en el sector central de Parrita y al este de Quepos, representan un porcentaje importante de la recarga alta.

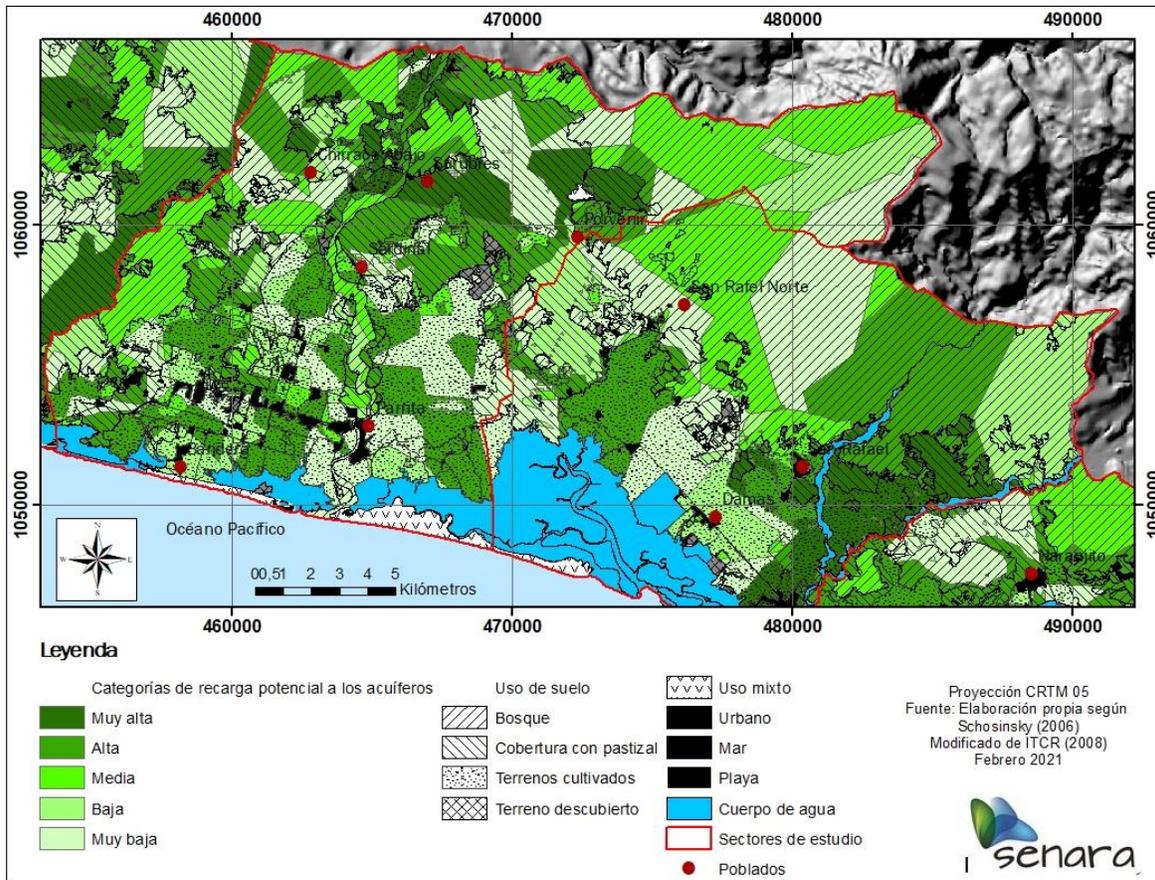


Figura 85. Mapa de recarga potencial y uso del suelo, sector Parrita – Quepos.

### 5.3.4 Recarga potencial Naranjo - Savegre – Matapalo

#### ✓ Precipitación

Para los factores de precipitación y temperatura se tomaron en cuenta los datos de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, considerando la distribución espacial, cantidad y calidad de datos con que cuentan.

De acuerdo con la información facilitada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), dentro del área de la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo se ubican cuatro estaciones meteorológicas: 90003 Quepos, 92001 Capital Bartolo, 92002 Llorona y 94002 Marítima, sin embargo, no cuentan con la información necesaria para la elaboración del Balance Hídrico de Suelos. Por la razón anterior se trabajó con las estaciones 90009 Damas Quepos y 96002 Hacienda Barú por ser las más cercanas al área de estudio y que cuentan con información completa de precipitación y temperatura.

Es importante aclarar que las estaciones 90009 Damas-Quepos y 90013 Finca Damas presentan la misma ubicación, sin embargo, de acuerdo con la información brindada por un funcionario del IMN son estaciones distintas, una es mecánica (90009) y la otra automática (90013). La razón principal de la diferencia en los valores que registran son los periodos con lo que se generaron, la estación 90009 de 1984 a 2018 (lluvia) y 1984 a 2017 (temperaturas), en el caso de la automática de 2009 a 2018. La estación 90009 representa mejor la zona, ya que ha registrado eventos Niño y Niña, en mayor cantidad, mientras que la estación 90013, tiene menos fenómenos registrados, pero se espera que, al pasar de los años, ambas climatologías lleguen a ser más similares.

En la tabla 44 se aporta el detalle de los datos registrados por las estaciones meteorológicas de interés y en la figura 86 se muestran los promedios mensuales de lluvia en el periodo 1981-2017. Como se observa en dicha figura, los meses de mayores precipitaciones son mayo, agosto, setiembre y octubre y las menores precipitaciones se dan en enero, febrero, marzo y diciembre.

Tabla 44. Precipitación mensual registrada.

Mes	Precipitación 90009 Damas- Quepos (mm)	Precipitación 96002 Hacienda Barú (mm)
Enero	60,00	77,60
Febrero	28,20	53,20
Marzo	40,30	81,80
Abril	160,40	230,20
Mayo	423,50	519,10
Junio	414,60	437,30
Julio	440,50	454,60
Agosto	491,00	538,20
Septiembre	521,60	593,30
Octubre	619,30	731,30
Noviembre	392,70	472,80
Diciembre	158,40	221,90
Total Anual	3750,50	4411,30

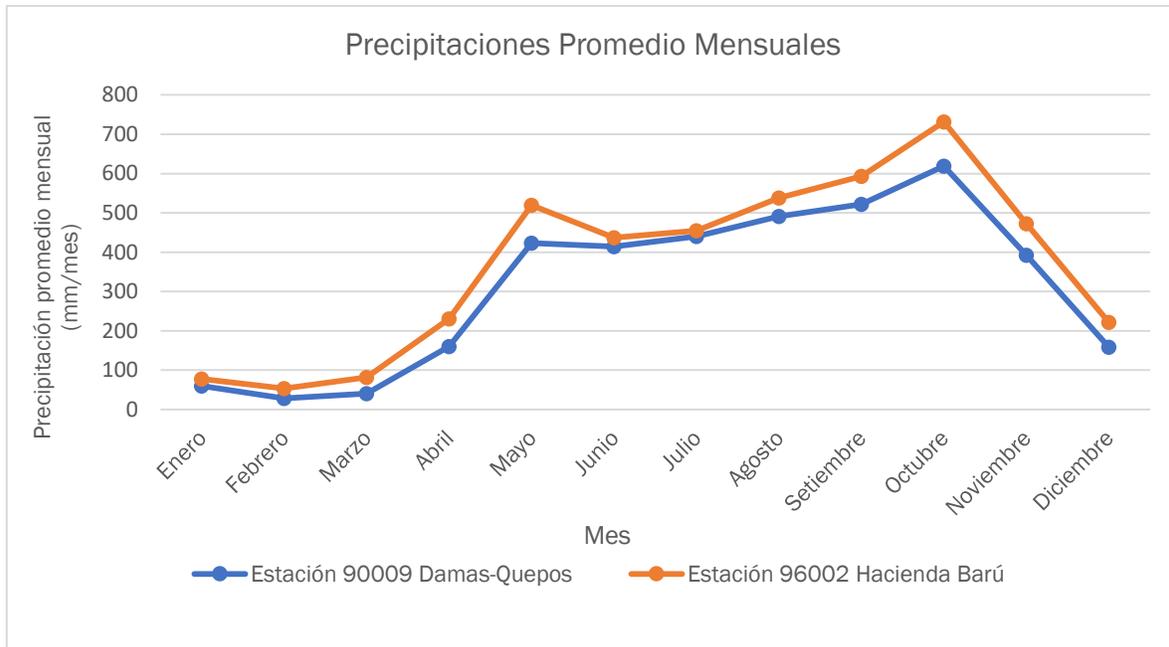


Figura 86. Precipitaciones promedio mensuales en mm/mes, período 1871-2017.

Posteriormente se aplicó el método de polígonos de Thiessen para establecer las zonas de influencia de cada estación meteorológica y se obtuvo la precipitación mensual para el área de estudio. La estación 90009 Damas Quepos presenta influencia al noroeste de la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo mientras que la estación 96002 Hacienda Barú tiene influencia al sureste del área.

✓ Evapotranspiración

Para el cálculo de la ETP se utilizó el método de Blanney & Criddle considerando que es un método utilizado en Costa Rica y que se cuenta con los datos de temperatura media necesarios para realizar los cálculos.

En la tabla 45 se presenta el detalle de los cálculos realizados según el método de Blanney & Criddle y en la figura 87 se observa que las evapotranspiraciones más altas ocurren en los meses de mayo y julio y las menores en noviembre y febrero.

Tabla 45. Evapotranspiración mensual, estaciones Damas-Quepos y Barú.

Mes	PS (% horas luz)	T media Damas-Quepos (°C)	T media H. Barú (°C)	ETP Damas-Quepos	ETP H. Barú
Enero	8,13	26,60	27,50	165,33	168,70

Febrero	7,47	27,00	28,00	153,28	156,72
Marzo	8,45	27,60	28,60	175,73	179,61
Abril	8,37	27,90	28,40	175,22	177,14
Mayo	8,81	27,30	27,70	182	183,62
Junio	8,60	27	27,30	176,47	177,66
Julio	8,86	26,80	27,10	180,99	182,21
Agosto	8,71	26,70	27,00	177,53	178,73
Septiembre	8,25	26,60	27,00	167,77	169,29
Octubre	8,34	26,40	26,80	168,83	170,37
Noviembre	7,91	26,40	26,80	160,13	161,59
Diciembre	8,10	26,50	27,00	164,35	166,96

Fuente: IMN y cálculo de ETP mediante metodología de Blanney & Criddle.

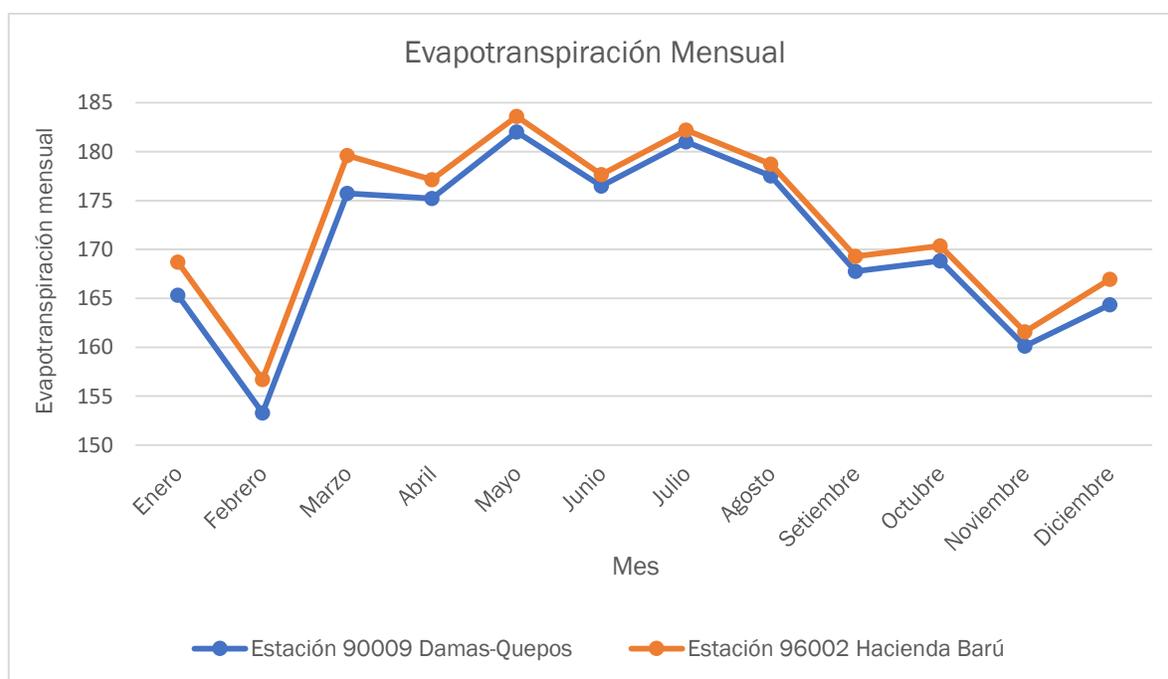


Figura 87. Evapotranspiración mensual, período 181-2017, estaciones Damas, Quepos y Barú.

✓ Recarga

La tabla 46 muestra la estimación de recarga potencial por cada formación geológica en la cuenca de estudio y el gráfico de la figura 88 la representación porcentual de esa recarga según la formación geológica asociada.

Tabla 46. Recarga potencial, cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo.

Formación Geológica	Área (m <sup>2</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /año)	Caudal (l/año)	Caudal (l/s)
---------------------	------------------------	------------------------------	----------------	--------------

Fm. Punta Carballo	17370000	27079757,93	27079757931	858,69
Depósitos Aluviales Recientes	118710000	140313618,1	1,40314 x 10 <sup>11</sup>	4449,32
Fm. Punta Serrucho	13070000	17967629,2	17967629203	569,75
Fm. Caótica Punta Quepos	9170000	13145615,51	13145615509	416,84
Fm. Térraba	154960000	130670796,7	1,30671 x 10 <sup>11</sup>	4143,54
Areniscas y Conglomerados no dif.	15980000	24257060,64	24257060640	769,19
Fm. Tulín	1760000	2296913,652	2296913652	72,83
<b>Total</b>				<b>11280,17</b>

Con el balance hídrico de suelos se determinó que la recarga potencial total en la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo es de 11280,17 l/s, la cual equivale al 25,26% de la precipitación total anual en la cuenca considerando la precipitación registrada en la estación meteorológica 96002 Hacienda Barú (44664 l/s) y 29,70% tomando en cuenta la estación 90009 Damas Quepos (37974 l/s).

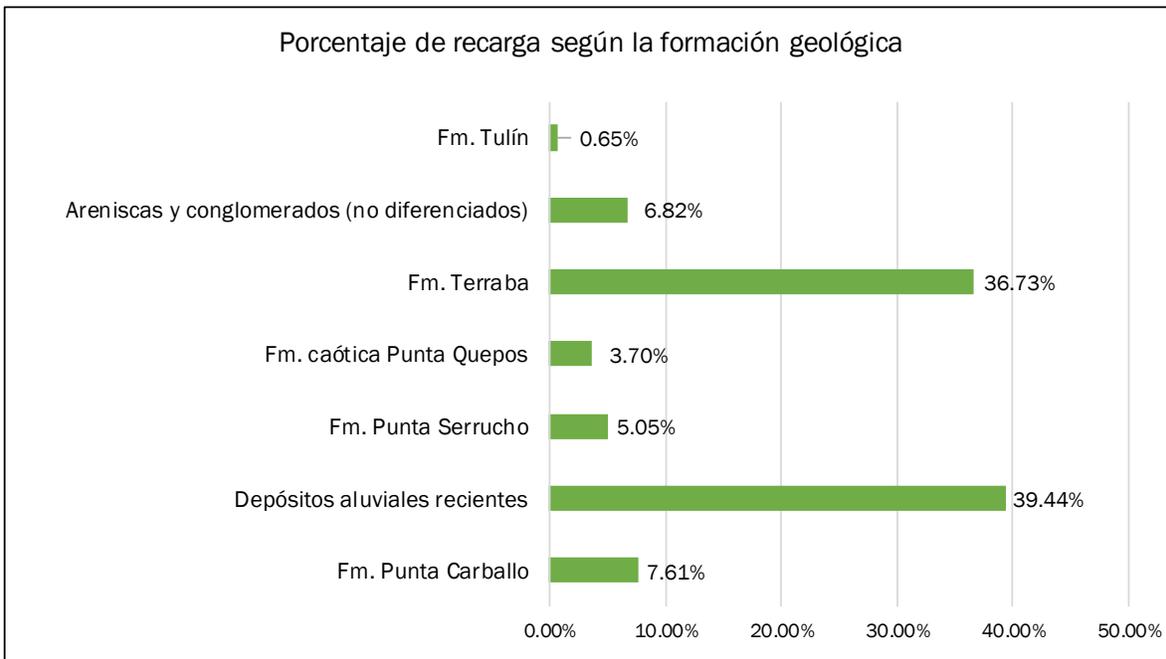


Figura 88. Porcentaje de recarga según formación geológica.

Como se observa en el gráfico de la figura 88 el mayor porcentaje de recarga se genera en los Depósitos Aluviales Recientes (39,44%) y Formación Térraba (36,73%), las cuales cubren áreas considerables en la cuenca de estudio. Sin embargo, los Depósitos Aluviales Recientes presentan menor área de cobertura que la Formación

Térraba pero su mayor porcentaje de recarga es atribuible al factor de infiltración del terreno que es mayor en tales depósitos.

En las formaciones Punta Carballo (7,61%), Areniscas y Conglomerados no diferenciados (6,82%), Punta Serrucho (5,05%), Punta Quepos (3,70%) y Tulín (0,65%) los porcentajes de recarga están asociados con el área de cobertura de cada formación, es decir, los menores porcentajes de recarga se dan en las formaciones que presentan áreas de cobertura menor.

✓ Recarga potencial Naranjo-Savegre-Matapalo

La clasificación del mapa de recarga potencial para la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo se ha realizado según la metodología desarrollada por SENARA para la elaboración de estudios hidrogeológicos de planes reguladores, publicada en el periódico oficial La Gaceta No. 137 del 16 de julio del 2015. De acuerdo con esta metodología en la zona de estudio el valor máximo de recarga obtenido fue de 2120,58 mm y el mínimo de 0 mm, por lo que las clases de recarga potencial se establecen según lo mostrado en la tabla 47.

Tabla 47. Clases de recarga potencial en función del rango.

Clase	Categoría de recarga	Rango (mm)
1	Muy baja	0 - 424,11
2	Baja	424,11 - 848,23
3	Media	848,23 - 1272,34
4	Alta	1272,34 - 1696,46
5	Muy alta	1696,46 - 2120,58

La figura 89 corresponde con el mapa de recarga potencial en la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo, clasificado en 5 clases según el rango de recarga en cada polígono.

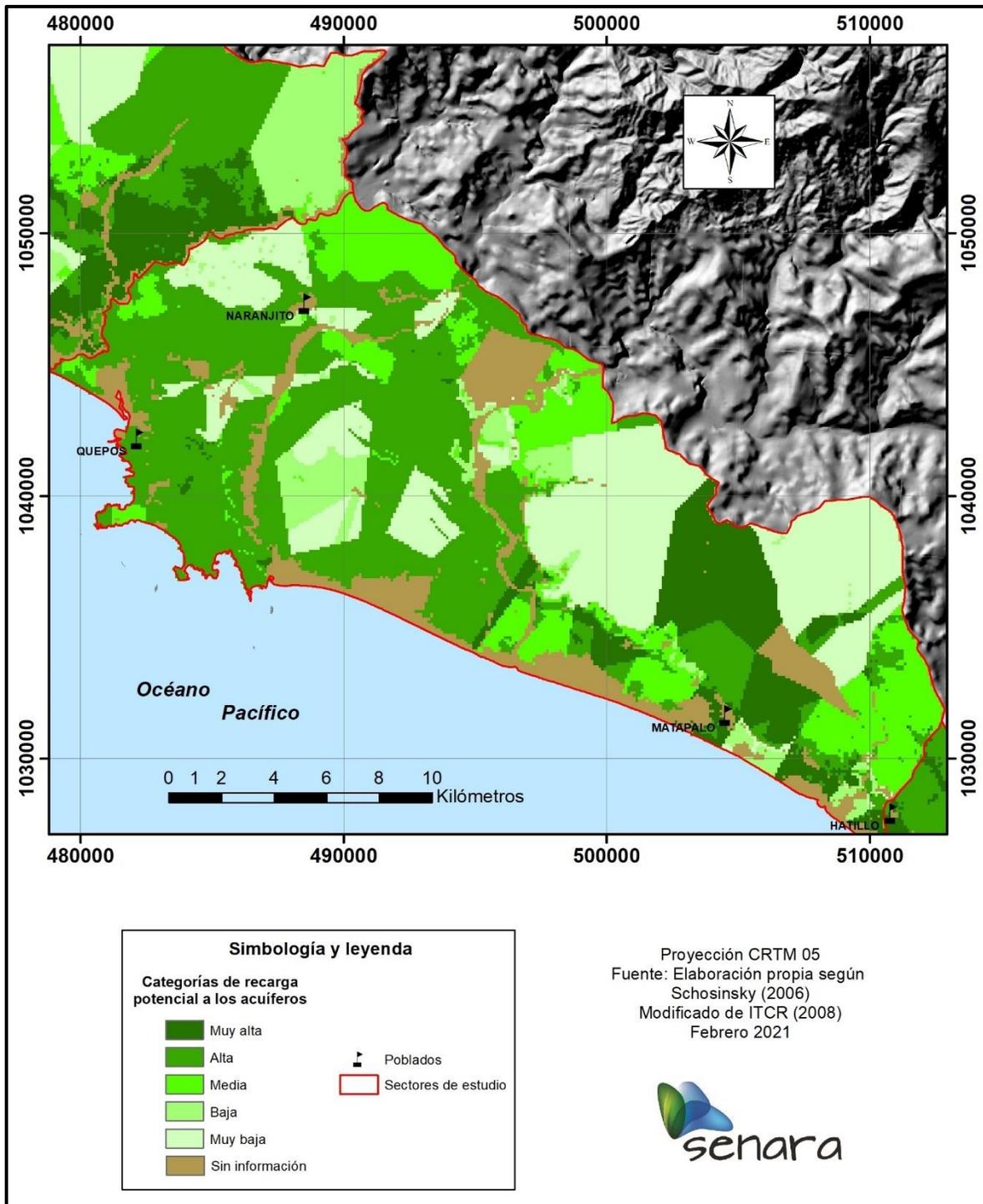


Figura 89. Mapa de recarga potencial, sector Naranjo - Savegre - Matapalo.

En la figura 89 se observa que las categorías de recarga muy baja, baja y media se encuentran distribuidas a lo largo de la cuenca de estudio. En los alrededores de Quepos y Naranjito predominan las zonas con recarga alta, mientras que en las

cercanías de Matapalo y hacia el norte y este de dicha localidad se encuentran las zonas con recarga muy alta.

A partir de la figura 92 se desprende que las zonas con recarga muy alta y alta poseen usos del suelo dedicados a bosque, coberturas con pastizal y terrenos cultivados principalmente. Las zonas con recarga media y baja presentan áreas de bosque y terrenos cultivados y en los sectores con recarga muy baja se encuentran coberturas boscosas, terrenos cultivados y coberturas con pastizal.

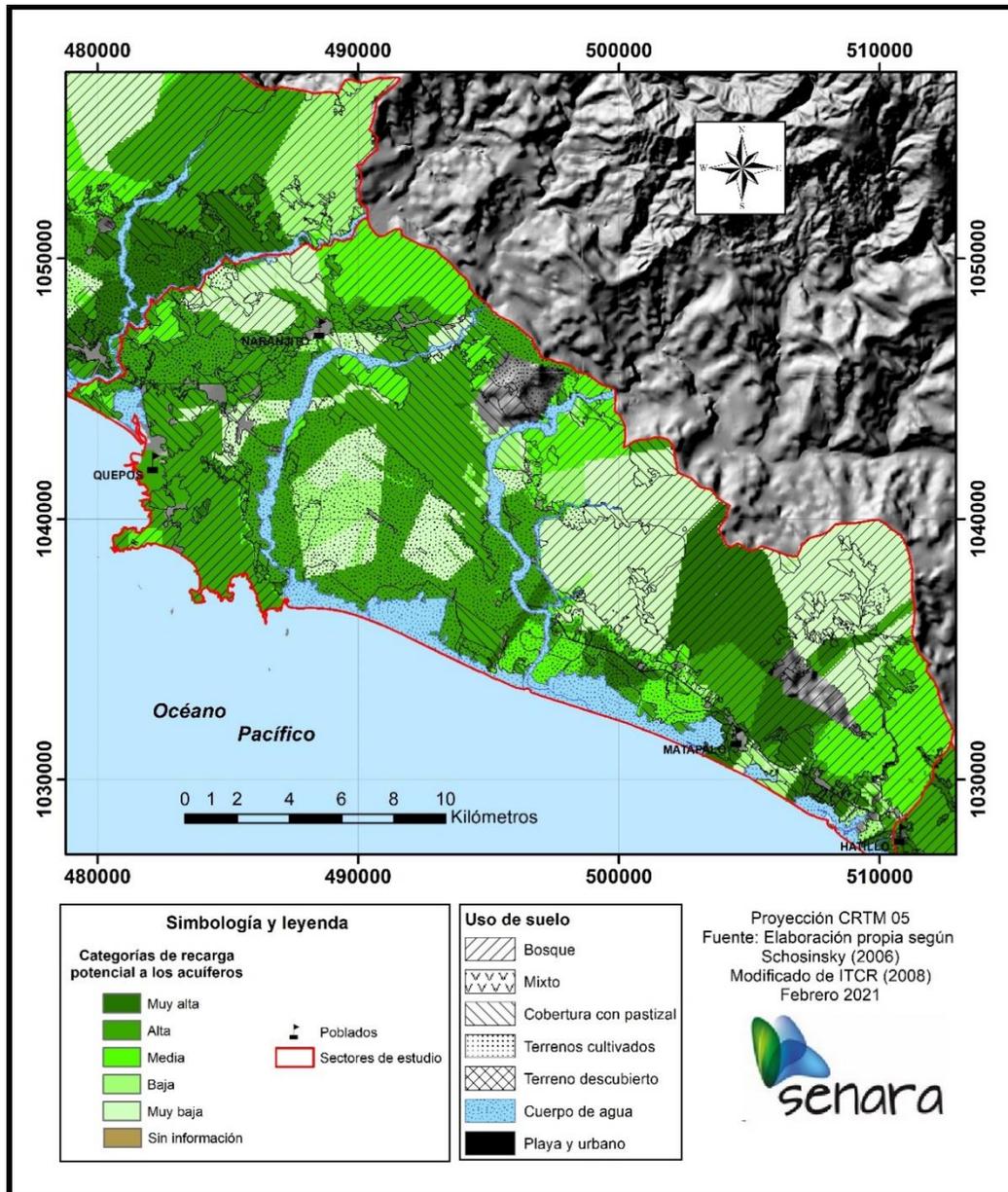


Figura 90. Mapa de recarga potencial y uso del suelo, sector Naranjo - Savegre - Matapalo.

### 5.3.5 Recarga potencial Dominical-Ballena

#### ✓ Precipitación y evapotranspiración

A partir de la búsqueda de información climatológica realizada tanto en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), como en las bases de datos del SENARA y del Instituto Meteorológico Nacional, se determinó que para esta área solamente se cuenta con registros de las estaciones Tinamaste (96001) y Hacienda Barú (96002), ubicadas hacia el extremo NW de la zona de estudio.

La estación Tinamaste se ubica en el sector montañoso a una elevación aproximada de 724 m.s.n.m., mientras que la estación Hacienda Barú se localiza en la zona de planos aluviales a 10 m.s.n.m.. Los registros climatológicos incluyen tanto precipitación como temperatura, en el caso de Tinamaste se extienden desde 1986 al 2006 y para Hacienda Barú van de 1981 al 2017. En el anexo 8 se incluye el resumen de la información climática registrada en estas dos estaciones.

En el hidrograma de precipitaciones de la figura 91 se puede observar, para ambas estaciones, el comportamiento típico del clima en la región Pacífico, con una estación seca bien marcada de enero a marzo, una lluviosa a partir de abril que disminuye hacia noviembre y diciembre, y adicionalmente el efecto de los vientos alisios hacia los meses de junio y julio con el desarrollo del conocido “veranillo”.

Ahora bien, la construcción de isoyetas o polígonos de Thiesen con la precisión adecuada para todo el sector Dominical - Ballena, no es posible al considerar que estas estaciones se ubican en sectores muy localizados hacia el NW de la zona de estudio. Sin embargo, la metodología para la estimación de la recarga potencial de los acuíferos, requiere como parámetros de entrada, la utilización de valores de precipitación y temperatura representativos para la zona en análisis.

En ese sentido, si bien es cierto ambas estaciones muestran similitudes en el comportamiento climático a lo largo del año, se ha optado por utilizar los parámetros de temperatura y precipitación de la estación Hacienda Barú, tomando en consideración los siguientes criterios:

- La Estación Hacienda Barú cuenta con un registro continuo de precipitación desde 1981 a 2017, lo que significa que cuenta con 16 años más de registros de precipitación que la estación Tinamaste (1986 a 2006).

- La estación Tinamaste únicamente cuenta con 6 años de registros de temperatura (1986 a 1992), mientras que la estación Hacienda Barú registra 26 años de temperatura (1991 a 2017).

- Como se observa, los registros más recientes de la estación Hacienda Barú, tanto en temperatura como en precipitación son del año 2017, mientras que en la estación Tinamaste son del 2006 para lluvia y de 1992 para temperatura. En ese sentido, se considera que la estación Hacienda Barú es más representativa para las condiciones climáticas actuales.

La estación Hacienda Barú se localiza en la zona de plano aluvial a una elevación aproximada de 10 m.s.n.m. Esta ubicación se considera más conservadora para el análisis de recarga en función de las temperaturas registradas y la evapotranspiración asociada.

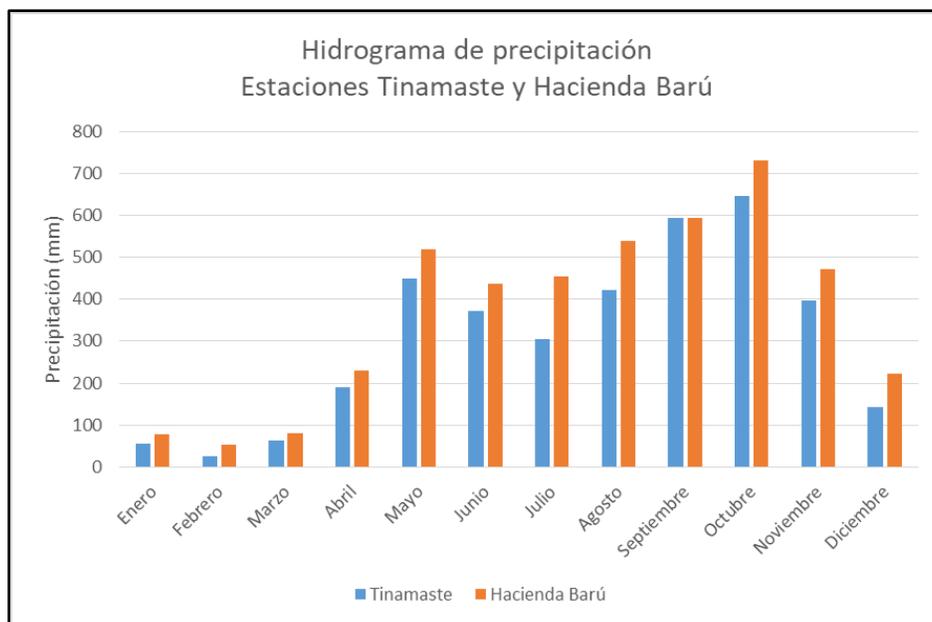


Figura 91. Hidrograma de precipitaciones, estaciones Tinamaste y Hacienda Barú.

Con respecto a la evapotranspiración potencial, tal y como se mencionó anteriormente, esta fue estimada a partir de los datos de temperatura media aplicando la fórmula de Blaney & Criddle sugerida en la metodología Schosinsky (2006).

La tabla 48 muestra un resumen con los valores de precipitación, temperatura media y evapotranspiración potencial asociada que se consideraron en el balance hídrico de suelos del sector Dominical - Ballena.

Tabla 48. Datos climáticos, estación Hacienda Barú, sector Dominical-Ballena.

Mes	Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)	Evapotranspiración potencial (mm)
Enero	77.6	27.5	168.69
Febrero	53.2	28	156.72
Marzo	81.8	28.6	179.61
Abril	230.2	28.4	177.14
Mayo	519.1	27.7	183.61
Junio	437.3	27.3	177.65
Julio	454.6	27.1	182.21
Agosto	538.2	27	178.72
Setiembre	593.3	27	169.29
Octubre	731.3	26.8	170.36
Noviembre	472.8	26.8	161.58
Diciembre	221.9	27.2	166.95

Para cada uno de los doce meses se generó el correspondiente mapa raster de precipitación y evapotranspiración potencial que luego se utilizó en el álgebra de mapas de la metodología.

✓ Recarga

Mediante la aplicación sistemática de la metodología desarrollada por Schosinsky (2006), se fueron obteniendo para el sector Dominical – Ballena los distintos mapas raster con información mensual de retención de lluvia, precipitación que infiltra, escorrentía, evapotranspiración real y humedades iniciales, finales y disponibles, cuya integración permitió determinar para cada pixel el valor de la recarga potencial mensual. La sumatoria de los doce raster de recarga potencial mensual permitió finalmente establecer la recarga potencial anual de los acuíferos existentes en la zona de estudio.

Es importante mencionar, que la estimación de la recarga potencial no ha podido ser realizada en forma individual para los Depósitos Coluviales y la Formación Puerto Nuevo, debido a que estas litologías no cuentan con todos los parámetros de caracterización necesarios para hacer el análisis respectivo. Además, estas litologías tienen una distribución espacial muy limitada, por lo que sus áreas han sido incorporadas dentro del análisis general de recarga potencial que se efectuó para el acuífero desarrollado en los materiales de la Formación Térraba.

La tabla 49 muestra los valores de recarga potencial obtenidos para cada unidad hidrogeológica, así como el total para el sector Dominical – Ballena.

Tabla 49. Recarga potencial por unidad hidrogeológica, sector Dominical-Ballena.

Unidad hidrogeológica	Area para estimación de recarga	Caudal	Caudal
	(m <sup>2</sup> )	(l/año)	(l/s)
Fm. Térraba	292 910 000	3,371 x 10 <sup>11</sup>	10 689,71
Depósitos aluviales	17 990 000	3,225 x 10 <sup>10</sup>	1 022,90
<b>TOTAL</b>		<b>3,693 x 10<sup>11</sup></b>	<b>11 712,61</b>

Fuente: Elaboración propia con base en Schosinsky (2006).

A partir del balance hídrico de suelos se establece que la recarga potencial total en el sector Dominical – Ballena es de 11 712,61 l/s. Esta recarga equivale al 26,42% de la precipitación total anual en este sector (44 316,02 l/s).

El 91.26% de la recarga potencial se genera en sitios asociados con la Formación Térraba, lo cual evidentemente está relacionado con el predominio de esta litología en la zona de estudio, mientras que los depósitos aluviales recientes registran una recarga potencial equivalente al 8.73%.

La figura 88 corresponde con el mapa de recarga potencial para el sector Dominical – Ballena, el cual ha sido categorizado siguiendo la metodología desarrollada por SENARA para la elaboración de estudios hidrogeológicos de planes reguladores, publicada en el periódico oficial La Gaceta No. 137 del 16 de julio del 2015.

En la zona de estudio el valor máximo de recarga obtenido fue de 2120,92 mm y el mínimo de 0 mm, por lo que las cinco clases de recarga potencial se establecen según lo mostrado en la tabla 50.

Tabla 50. Clases de recarga potencial en función del rango.

Clase	Recarga potencial	Rango (mm)
1	Muy baja	0 - 424,184
2	Baja	424.18, - 848,368
3	Media	848,368 - 1272,552
3	Alta	1272,552 - 1696,736
5	Muy alta	1696,736 - 2120,92

Se debe aclarar, que en la figura 92 las zonas que se presentan sin información de recarga están asociadas principalmente con cuerpos de agua como ríos, lagunas o manglares, pero también se incluyen sectores urbanos, debido a que en forma conservadora esas zonas urbanas no se consideraron dentro de la cuantificación de

recarga, al tomar en cuenta la impermeabilización que sufren los terrenos por el desarrollo de infraestructura.

Por otra parte, existen sectores amplios de la zona de estudio en los que la categoría de recarga fue estimada como muy baja, en el orden de 0 a 424,18 mm anuales, y que se asocian con valores de velocidad de infiltración en el terreno muy bajos, por debajo de los 50 mm/d. Valores de velocidad de infiltración tan bajos no son tan comunes para toda la zona de estudio, pudiendo encontrar variaciones en función de las facies litológicas y suelos desarrollados. Es por esto, que con un enfoque conservador y de protección hacia el recurso hídrico, se considera adecuado que en las zonas categorizadas como de recarga muy baja, se investigue con mayor detalle las velocidades de infiltración y otros parámetros del suelo, con miras a establecer con mayor precisión la continuidad espacial de la categoría de recarga muy baja que se determinó.

La figura 93 muestra, para cada una de las categorías de recarga determinadas en el área de estudio, cual es en la actualidad el uso de suelo predominante que se desarrolla en esos sectores. Es evidente, que debido a su extensión la cobertura boscosa predomina con respecto a diferentes categorías de recarga, sin embargo, en sectores planos y cercanos a la costa, como es el caso de Uvita o Dominical, también se observa que precisamente en zonas categorizadas como áreas de recarga alta o muy alta para los depósitos aluviales, son en la actualidad zonas en que se desarrollan usos de suelo urbanos, de pastizales o de actividades mixtas, que podrían eventualmente generar algún tipo de conflicto con la cantidad y calidad del recurso hídrico que se infiltra.

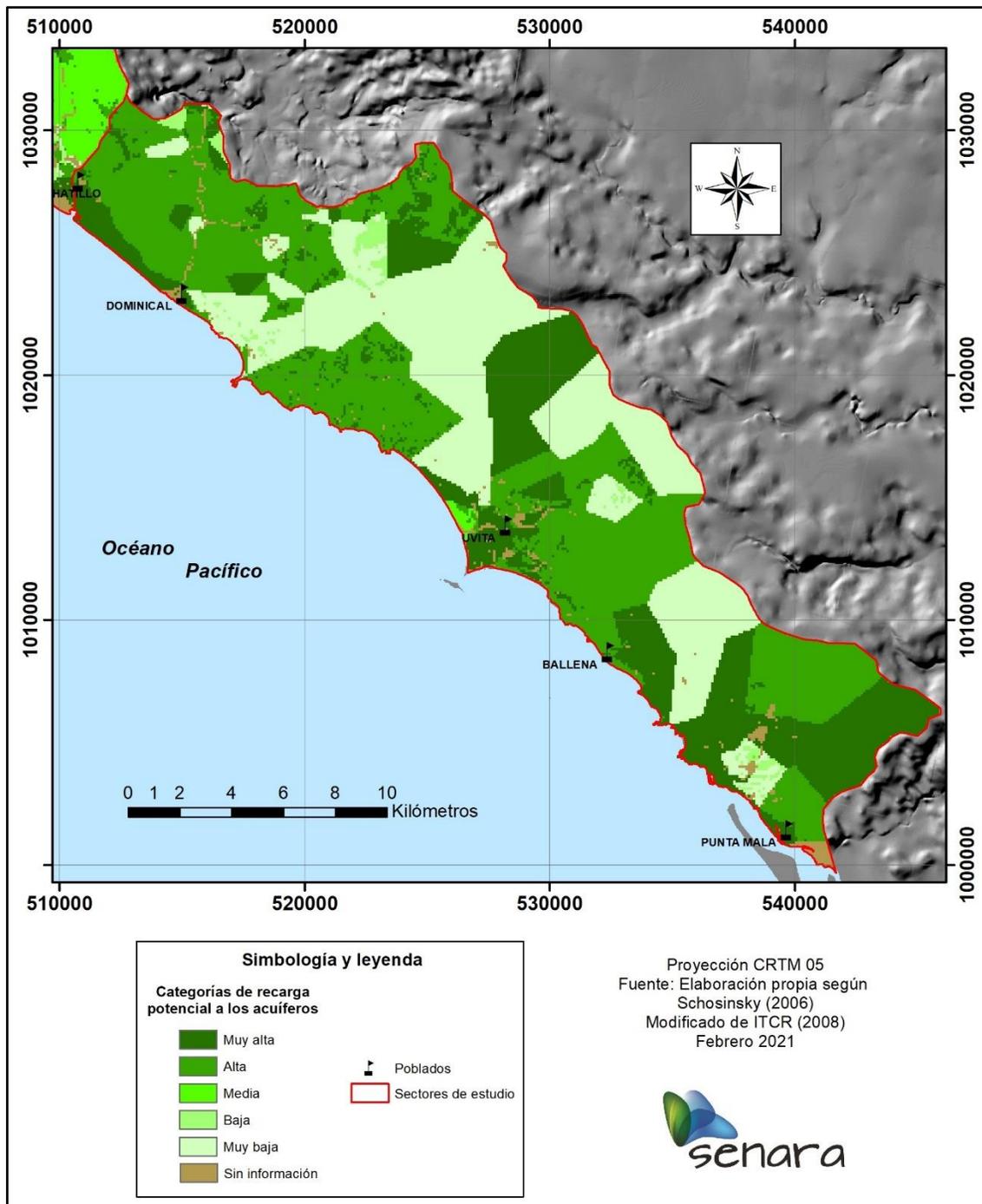


Figura 92. Mapa de recarga potencial, sector Dominical-Ballena.

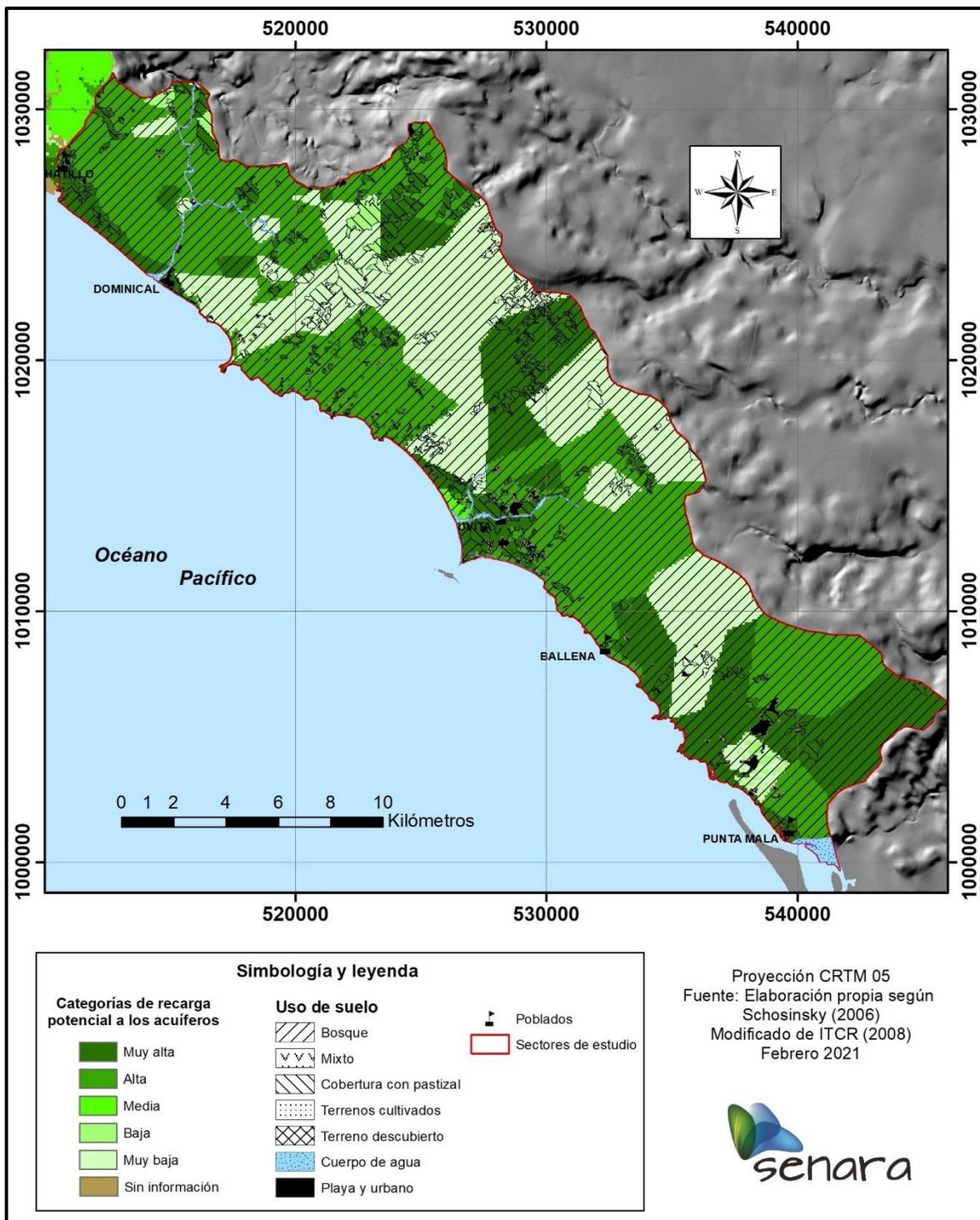


Figura 93. Mapa de recarga potencial y uso del suelo, sector Dominical – Ballena.

## 5.4 Resultados de la recarga por Hidrograma de pozos

### 5.4.1 Sector Herradura-Jacó

El análisis de la recarga por hidrograma de pozos solamente se realizará para el acuífero Herradura, ya que las rocas del Complejo de Nicoya, la Formación Punta Carballo y el acuífero Jacó tienen un comportamiento confinado.

Para el caso del acuífero Herradura y con base en la red de monitoreo, se han seleccionado los pozos HE-183, HE-184 y HE-170 para desarrollar el cálculo de la recarga de agua subterránea mediante el método del hidrograma de pozo, ya que estos pozos son los que tienen un mayor registro de mediciones del nivel estático, los gráficos se muestran en las figuras 89, 90 y 91.

El pozo HE-183 en el sector de Herradura, el cual se ubica muy cerca del pozo de extracción de la ASADA de Herradura en la plaza de deportes de la comunidad, muestra una variación de carga hidráulica de 10,63 metros, en el periodo de noviembre del 2019 a diciembre del 2020, tal y como se ilustra en el gráfico de la figura 94.

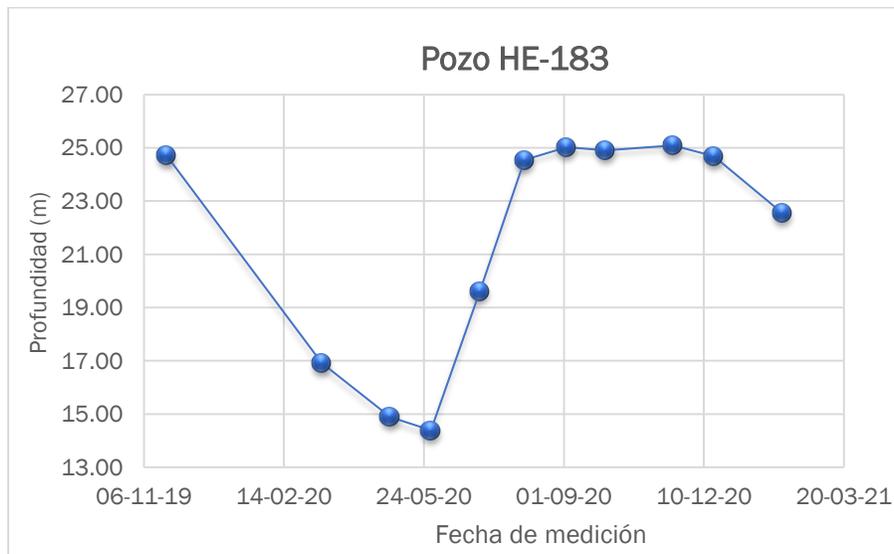


Figura 94. Variación del nivel de agua subterránea en el pozo HE-183.

Mientras que el pozo HE-184, localizado en el sector de Herradura, muestra una variación de carga hidráulica de 10,66 metros, en el periodo de noviembre del 2019 a diciembre del 2020 (Figura 95).

El pozo TS-170 en el sector de Herradura el cual se ubica en el sector NW de la planicie en Herradura, muestra una variación de carga hidráulica de 19,08 metros, en el periodo de noviembre del 2019 a diciembre del 2021 como se modela en la figura 96.

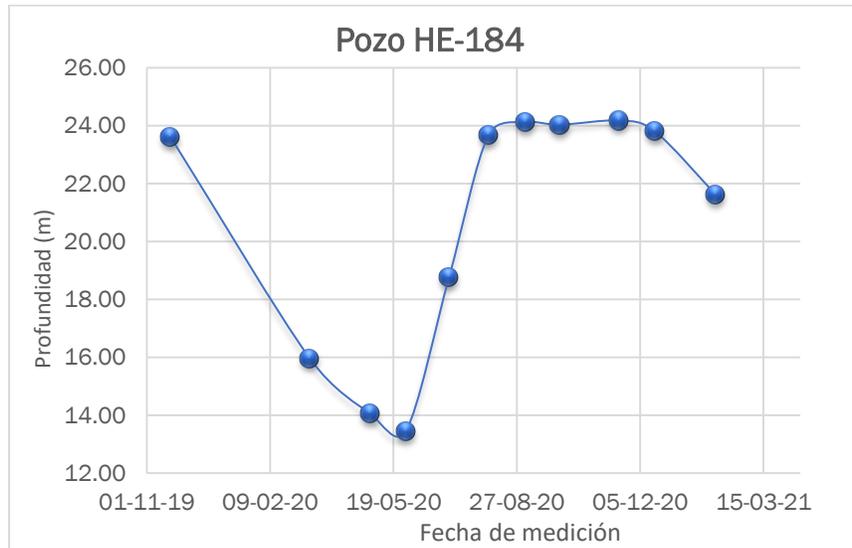


Figura 95. Variación del nivel de agua subterránea en el pozo HE-184.

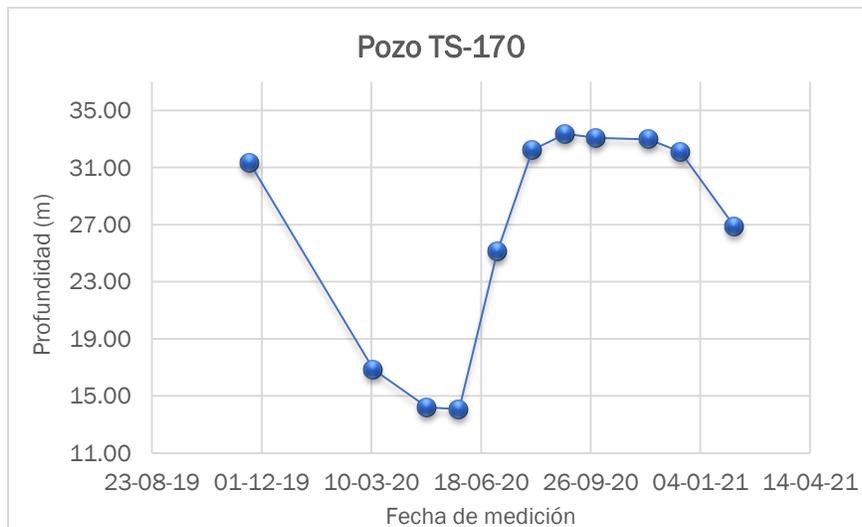


Figura 96. Variación del nivel de agua subterránea en el pozo TS-170.

En la tabla 51 se muestran los cálculos de la recarga de agua subterránea de acuerdo con la variación del nivel de agua en los pozos seleccionados para el acuífero Herradura.

Tabla 51. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, acuífero Herradura.

Código	Sy	$\Delta h$ (m)	Recarga anual (mm)	% de precipitación	Area (m <sup>2</sup> )	Caudal (l/s)
HE-183	0,07	10,66	746,20	28,43	4296506,49	101,66
HE-184	0,07	10,63	744,10	28,35	4296506,49	101,38
TS-170	0,07	19,29	1350,30	51,45	4296506,49	183,97
PROMEDIO			<b>946,87</b>	<b>36,08</b>		<b>129,00</b>

El análisis indica que para las gravas y arenas aluviales del acuífero Herradura la recarga es unos 0,95 metros por año, por lo que considerando un área de 4,30 km<sup>2</sup>, se tiene una recarga de 129 l/ s.

La comparación para el acuífero Herradura entre la metodología del cálculo de la recarga potencial (Schosinsky, 2006) y la metodología de la fluctuación de niveles se muestra en la tabla 52, siendo el valor mayor para la metodología de la fluctuación de niveles con respecto a la recarga potencial.

Tabla 52. Comparación de metodologías para la estimación de recarga, sector Herradura-Jacó.

Acuífero	Area (m <sup>2</sup> )	Fluctuación de la tabla de agua		Recarga Potencial (Schosinsky, 2006)	
		Recarga (mm)	Caudal (l/s)	Recarga (mm)	Caudal (l/s)
HERRADURA	4296506,49	946,87	129,00	533,13	72,64

El análisis comparativo entre ambas metodologías muestra que se tienen una diferencia de aproximadamente de 414 mm anuales por lo que se concluye que hay muy poco margen de comparación entre ambas metodologías; por otra parte, se debe aclarar que para los sectores urbanos de la zona de estudio se estableció una recarga de 0 mm anuales con base en la metodología de la recarga potencial de Schosinsky (2006); la cual se podría considerar como un aspecto a calibrar con base en la medición continua de los niveles de los pozos en el área de estudio, especialmente para pozos que se ubiquen en los sectores más poblados de la zona de Herradura y Jacó.

#### 5.4.2 Sector Hermosa-Esterillos

Como se mencionó en el apartado de Hidrogeología, en el sector de Hermosa – Esterillos se tenía una red de monitoreo de 22 pozos, de los cuales solamente se pudieron utilizar 15 para estimar la recarga mediante el hidrograma de pozos.

Los pozos utilizados se encuentran distribuidos en la Formación Tulín, los Depósitos aluviales y la Formación Punta Carballo. En el caso de las otras litologías del área, no se contaba con suficientes pozos o con ninguno para realizar la estimación de recarga. La tabla 53 muestra un resumen de los resultados y los registros utilizados en el anexo 6.

Tabla 53. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, sector Hermosa-Esterillos.

Unidad hidrogeológica	Área (m <sup>2</sup> )	Lámina de saturación (m)	Rendimiento específico	Volumen de agua (m <sup>3</sup> )	Volumen de agua (l/s)
Fm. Tulín	210171717	17,82	0,08	299676845,5	9502,69
Depósitos aluviales	50538411	0,42	0,2	4278918,798	135,68
Fm. Punta Carballo	112472346	2,31	0,15	39084140,24	1239,35
<b>Total</b>	<b>373182474</b>			<b>343039904,6</b>	<b>10877,72</b>

Al comparar los resultados de esta metodología con los del Balance hídrico de suelos (Tabla 54), se observa una mayor recarga mediante el primer método. Sin embargo, esto puede deberse a que se tienen datos muy puntuales en las formaciones evaluadas y se necesitaría una mejor distribución de los pozos en el área para lograr un mejor control de los cambios de niveles a lo largo del año.

Tabla 54. Comparación de metodologías para estimación de la recarga, sector Hermosa-Esterillos.

Litología	Balance Hídrico de suelos	Hidrograma de pozos
	Recarga (l/s)	Recarga (l/s)
Complejo de Nicoya (basaltos)	1993,69	-
Areniscas y conglomerados (no diferenciados)	614,44	-
Fm. Tulín	3468,51	9502,69
Fm. Punta Carballo	2631,07	1239,35
Depósitos aluviales recientes	1208,28	135,68
<b>TOTAL</b>	<b>9916,02</b>	<b>10877,72</b>

#### 5.4.3 Sector Parrita-Quepos

Durante los años 2019 y 2020, se llevó a cabo el monitoreo de niveles de agua subterránea en 29 pozos de extracción y 2 piezómetros exploratorios distribuidos en las cuencas de los ríos localizados en Parrita y Quepos.

Para el análisis se han considerado aquellos pozos o piezómetros que cuentan con registros de niveles consistentes tanto en la época seca como lluviosa, a su vez, se han descartado aquellos pozos que durante el monitoreo llegaron a reportarse como secos, a los cuales les falta tres o más mediciones en el periodo de análisis, efectos de bombeo y aquellos que no se tiene certeza del acuífero que captan.

En el Anexo 6 se incluye el registro de niveles estáticos con respecto a la superficie del terreno, así como los cambios o intervalos de variación que fueron tomados en los pozos y piezómetros durante los monitoreos realizados por personal del SENARA.

La tabla 55 contiene el detalle de los datos considerados para el cálculo a través del método de hidrograma de pozos, así como los valores de rendimiento específico asignados a cada litología según Rodríguez et al. (2010) y los datos de recarga asociados a las litologías, considerando el cambio de nivel promedio del agua subterránea, determinado a partir de los pozos o piezómetros monitoreados en la unidad correspondiente.

Para las formaciones Punta Carballo y Fila de Cal no fue posible realizar el análisis debido a que no se tiene certeza de la existencia de pozos en estas unidades, no pudiéndose así calcular la recarga total para las zonas de Parrita y Quepos a través de la presente metodología.

Tabla 55. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, sector Parrita-Quepos.

Unidad Hidrogeológica	Rendimiento o específico	Cantidad de pozos/piezóm. considerados	Cambio nivel prom (m)	Área Fm. (m <sup>2</sup> )	Recarga (m <sup>3</sup> /año)	Recarga (l/s)
Depósitos Aluviales Recientes	0,20	10	1,36	167 120 000	45 456 640	1445,38
Areniscas y Conglomerados no dif.	0,10	2	1,45	27 450 000	3 129 300	99,23
Fm. Térraba	0,15	2	3,64	174 430 000	95 238 780	3020,01
Fm. Tulín	0,08	1	4,76	41 190 000	15 685 152	497,37

De la tabla 55, se desprende una recarga de 1445,38 l/s para los Depósitos Aluviales Recientes y de 3020,01 l/s para la Formación Térraba, principales acuíferos de la zona de estudio.

### Comparación entre las metodologías

Al realizarse la comparación de los resultados obtenidos a partir de dos metodologías distintas (Tabla 56), se observa que, los resultados de recarga, a través de la metodología de hidrograma de pozos, son mucho más bajos que los obtenidos aplicando el Balance Hídrico de Suelos, pudiendo incidir los pocos pozos utilizados durante la medición de la red, el período de medición y el dato asignado de rendimiento específico a cada unidad hidrogeológica. No obstante, resulta interesante que a través del hidrograma de pozos se logra observar la recarga directa, una vez iniciado el período correspondiente a la época lluviosa, así como lo marcado del Veranillo de San Juan y la “Canícula”, donde es evidente un importante descenso de las lluvias.

Tabla 56. Comparación de las metodologías para la estimación de la recarga, sector Parrita-Quepos.

Unidad Hidrogeológica	Recarga (l/s)	
	Hidrograma de pozos	Balance Hídrico de Suelos
Depósitos Aluviales Recientes	1445,38	4359,70
Areniscas y Conglomerados no dif.	99,23	832,15
Formación Térraba	3020,01	4421,64
Formación Tulín	497,37	1107,69

#### 5.4.4 Sector Naranjo-Savegre-Matapalo

El SENARA realizó durante los años 2019 y 2020, el monitoreo de niveles de agua subterránea en 19 pozos de extracción y 8 piezómetros exploratorios distribuidos en la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo.

Para el análisis se han considerado aquellos pozos o piezómetros que cuentan con registros de niveles consistentes tanto en la época seca como lluviosa. En el caso de los pozos, se han descartado aquellos que durante el monitoreo llegaron a reportarse como secos, a los cuales les falta tres o más mediciones en el periodo de análisis, los que muestran variaciones de niveles de más de 15 m respecto a otros pozos en la misma unidad hidrogeológica o los que no se tiene certeza del acuífero que captan.

En el caso de los piezómetros, se han descartado aquellos en los cuales el nivel resultante proviene de la combinación de aguas de dos o más acuíferos, presentan condiciones de confinamiento y surgencia en el nivel, o del todo carecen de los registros en época lluviosa o seca.

En el Anexo 6 se incluye el registro de niveles estáticos con respecto a la superficie del terreno, así como los cambios o intervalos de variación que fueron tomados en los pozos y piezómetros durante los monitoreos realizados por SENARA. Para efectos de la determinación de la recarga al acuífero se han considerado exclusivamente los niveles estáticos en pozos sin bombeo.

Para cada litología, en cada unidad hidrogeológica determinada, se han asignado los valores de rendimiento específico según Rodríguez et al. (2010). Para la formación Térraba se ha asignado un valor de 0,15 y para los Depósitos de Aluviones Recientes de 0,20.

En las formaciones Punta Carballo, Punta Serrucho, Caótica Punta Quepos, Areniscas y conglomerados (no diferenciados) y Tulín no se ha llevado a cabo el análisis debido a que no se tiene certeza de la existencia de pozos en éstas unidades.

En la tabla 57 se incluye el resumen de la estimación de recarga realizada para la Formación Térraba y los Depósitos de Aluviones Recientes, tomando en consideración el cambio de nivel promedio del agua subterránea, determinado a partir de los pozos o piezómetros localizados en cada unidad.

Tabla 57. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, sector Naranjo-Savegre-Matapalo.

Unidad Hidrogeológica	Rendimiento específico	Cantidad de pozos/piezóm. considerados	Cambio nivel prom. (m)	Área Fm. (m <sup>2</sup> )	Recarga (m <sup>3</sup> /año)	Recarga (l/s)
Fm. Punta Carballo	x	x	x	17370000	x	x
Depósitos Aluviales Recientes	0,20	7	1,86	118710000	44160120	1400,3
Fm. Punta Serrucho	x	x	x	13070000	x	x
Fm. Caótica Punta Quepos	x	x	x	9170000	x	x
Fm. Térraba	0,15	2	2,09	154960000	48579,9	1540,5
Areniscas y Conglomerados no dif.	x	x	x	15980000	x	x
Fm. Tulín	x	x	x	1760000	x	x

No se pudo determinar el valor de recarga total para la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo debido a la falta de pozos en algunas unidades hidrogeológicas y que no se tiene certeza del acuífero que captan ciertos pozos.

#### *Comparación entre las metodologías*

A continuación, se muestran los valores de recarga obtenidos, para las dos formaciones analizadas, mediante la metodología de Hidrograma de Pozos y de Balance Hídrico de Suelos (Tabla 58).

Tabla 58. Comparación de las metodologías para la estimación de la recarga, sector Naranjo-Savegre-Matapalo.

Unidad Hidrogeológica	Recarga (l/s)	
	Hidrograma de pozos	Balance Hídrico de Suelos
Depósitos Aluviales Recientes	1400,3	4449,32
Fm. Térraba	1540,5	4143,54

De acuerdo con lo anterior se determina que para el caso de estudio y específicamente para los Depósitos Aluviales Recientes y la Formación Térraba la recarga obtenida, por el método de hidrograma de pozos, resulta aproximadamente 3 veces menor que la obtenida mediante el balance hídrico de suelos.

Para obtener resultados de recarga más confiables mediante el método de hidrograma de pozos, es necesario aumentar el número de pozos o piezómetros de monitoreo en las unidades hidrogeológicas con una distribución adecuada, la periodicidad de las mediciones y determinar los valores de rendimiento específico para cada unidad hidrogeológica a partir de pruebas o ensayos de bombeo en pozos.

#### **5.4.5 Sector Dominical-Ballena**

El SENARA realizó desde junio del 2019 a noviembre del 2020, el monitoreo de niveles de agua subterránea en 53 pozos y 9 piezómetros exploratorios localizados en el área de estudio. La información de niveles monitoreados en estos pozos y piezómetros se incluye como parte del anexo 6 de este informe.

Es importante mencionar, que en campo se inventariaron más pozos de los contemplados en este análisis, pero algunos fueron descartados al tomar en consideración aspectos tales como la continuidad de mediciones entre época seca y

lluviosa, efectos de bombeo, presencia de confinamiento o surgencia, o la existencia de muy pocos datos ya que se incorporaron al final del monitoreo.

Por otra parte, los niveles de los piezómetros en la zona de Uvita se han considerado para el análisis de recarga de los depósitos aluviales. Esto tomando en cuenta que en los informes de perforación no se registraron variaciones en los niveles de agua subterránea de los Depósitos Aluviales, aún después de que la perforación había alcanzado el basamento de la Formación Térraba.

Otro aspecto a mencionar, es que ante la posible existencia de variaciones en los distintos depósitos aluviales de la zona de estudio, en este análisis estos depósitos se han dividido por sectores, de tal manera que en cada uno se consideren únicamente los pozos exclusivos a cada área. En el caso de zonas aluviales que no cuentan con información de pozos, se les han asignado los parámetros de los depósitos más cercanos.

A partir de la litología en cada unidad hidrogeológica determinada, se han asignado los valores de rendimiento específico según Rodríguez *et al.* (2010). De esta forma, para la Formación Térraba el valor es de 0,15, mientras que, para los depósitos aluviales el valor es de 0,20.

La tabla 59 muestra el resumen de la estimación de recarga realizada para cada unidad hidrogeológica, tomando en consideración el cambio de nivel promedio del agua subterránea, determinado a partir de todos los pozos o piezómetros localizados en cada unidad.

Tabla 59. Estimación de la recarga mediante hidrograma de pozos, sector Domicical-Ballena.

Unidad hidrogeológica	Rendimiento específico	Cantidad de pozos	Cambio de nivel promedio (m)	Área considerada (m <sup>2</sup> )	Recarga m <sup>3</sup> /año	Recarga l/s
Fm. Térraba	0,15	11	5,40	295720044,9	239533236,4	7595,5
Dep. Aluvial (Ojochal)	0,20	6	0,70	3484856,58	487879,92	15,75
Dep. Aluvial (Piñuela)	0,20	1	1,65	41032,89	13540,77	0,42
Dep. Aluvial (Ballena)	0,20	2	1,52	1052440,13	319941,79	10,14
Dep. Aluvial (Uvita)	0,20	36	1,48	9385927,51	2789497,65	88,45
Dep. Aluvial (Domicicalito)	0,20	1	4,55	347428,56	316159,98	10,02

Dep. Aluvial (Dominical)	0,20	5	1,87	6779452,55	2535515,25	80,40
TOTAL					245995771,9	7800,6

Se determina por este método una recarga de 7595,5 l/s para la Formación Térraba y de 205,18 l/s para los Depósitos aluviales recientes, lo que da una recarga total para el área de estudio Dominical – Ballena de 7800,6 l/s, que correspondería con el 17,60 % de la precipitación total.

#### *Comparación entre las metodologías*

La tabla 60 muestra la comparación entre la recarga potencial obtenida por el método de balance hídrico de suelos y el valor de recarga obtenido mediante el método de hidrograma de pozos.

Tabla 60. Comparación de las metodologías para la estimación de la recarga, sector Dominical-Ballena.

Unidad hidrogeológica	Recarga (l/s)	
	Balance hídrico de suelos	Hidrograma de pozos
Fm. Térraba	10689,71	7595,5
Depósitos aluviales recientes	1022,90	205,18
<b>TOTAL</b>	<b>11712,61</b>	<b>7800,6</b>

Como se observa en la tabla anterior, el método de hidrograma de pozos arroja datos mucho menores que los obtenidos por el método de balance hídrico de suelos. En el caso de la Formación Térraba se obtiene una recarga de casi un 30% menos, pero en el caso de los depósitos aluviales la diferencia es mucho más contrastante, al determinarse una disminución en el dato de recarga de casi un 80%.

La determinación de recarga por fluctuación de niveles en pozos es un método excelente y muy válido para las estimaciones, pues parte de mediciones realizadas directamente en los niveles del acuífero, sin embargo, su precisión puede verse afectada debido a la ausencia de datos reales de rendimiento específico para cada unidad acuífera, escaso seguimiento en el registro de niveles, inadecuada distribución en las redes de monitoreo, e incluso ausencia de conocimiento con respecto al grado de confinamiento hidráulico en los acuíferos que son captados en los pozos.

Para el área de estudio, ciertamente se tienen algunas de las limitantes mencionadas en el párrafo anterior, tal es el caso de los rendimientos específicos o la

existencia de una distribución adecuada de los pozos en todos los sectores analizados, de tal manera, que para fines de la estimación del balance hídrico de aguas subterráneas, rendimiento sostenible y disponibilidad de caudales, se considera que el dato más representativo a utilizar en el sector Dominical – Ballena corresponde con la recarga de 11712,61 l/s obtenida mediante el balance hídrico de suelos.

Para mejorar la certeza de los resultados con el método de hidrograma de pozos, es recomendable contar, principalmente en la unidad de Depósitos Aluviales, con una mayor cantidad de pozos o piezómetros exploratorios, cuya distribución permita caracterizar de una manera más adecuada la totalidad de esta unidad. También, el período de monitoreo debe ser preferiblemente más extenso, abarcando varios años y varias estaciones secas y lluviosas, de tal forma que los datos sean más representativos a largo plazo.

Por otra parte, lo ideal es contar con valores de rendimiento específico determinados para cada unidad hidrogeológica, a partir de pruebas o ensayos de bombeo en pozos. La determinación de estos parámetros mejora la certeza de los datos de recarga mediante el método de hidrograma de pozos.

## **5.5 Rendimiento sostenible de acuíferos**

Para determinar el rendimiento sostenible, de los acuíferos caracterizados en el presente estudio del Pacífico Central, se tomó como base la recarga potencial, la extracción del agua subterránea a partir de pozos (perforados y excavados) y manantiales registrados en las bases de datos del SENARA, SINIGIRH y/o identificados en el campo, a su vez, se consideró una reserva segura del 60%. No obstante, se aclara que la metodología utilizada no considera la descarga de agua subterránea de los acuíferos hacia los ríos y al mar, los cuales deben ser modelados numéricamente. Sin embargo, a continuación se desarrollan los cálculos del rendimiento sostenible para cada una de los sectores de la zona de estudio, en donde se concluye con los datos de disponibilidad para el inicio y la discusión de las propuestas de manejo y extracción para cada sector de la zona de estudio.

Para la estimación de los caudales de extracción en pozos que han sido inventariados en el campo, o que se reportan en las bases de datos institucionales pero no registran caudales de extracción, se les asignó un caudal de explotación y un período

de bombeo, tomando en consideración el uso del pozo. Los datos aplicados se muestran en la tabla 61, según lo recomendado por SENARA (2006).

Tabla 61. Variables para la estimación de caudal de extracción por pozo, según el uso reportado.

Uso agua MINAE	Uso agua SENARA	Horas por día bombeo	Meses por año	Caudal medio (l/s)
Industrial	Industrial	24	12	5,8
Abast. Público	Abastec. Público	24	12	9,5
Consumo Humano	Doméstico	8	12	0,50
	Urbanístico	24	12	4,50
	Varios	12	12	3,30
	Riego - Doméstico	24	12	1,80
	Rieg. - Domést. Turismo	24	12	7
Agrícola	Riego	16	7	7
	Agroindustrial	24	12	3,80
	Abrevadero	6	12	2,80
Turismo	Turismo	24	12	4
	Riego Turismo	24	7	7

Fuente: SENARA (2006).

### 5.5.1 Rendimiento sostenible sector Herradura-Jacó

Para el cálculo del rendimiento sostenible, se utilizan los datos de recarga generados por el método de balance hídrico de suelos y específicamente de la recarga potencial. Esta recarga expresada como caudal instantáneo es de 1338 l/s, para la zona de Herradura y Jacó, valor al cual se debe sustraer la extracción por pozos y la descarga por manantiales, para finalmente determinar el caudal utilizable o rendimiento sostenible (40%). Como el valor de caudal de recarga potencial obtenido mediante el balance hídrico de suelos no considera la extracción que se está generando por parte de los pozos o la descarga de nacientes, a continuación se determinará el caudal de extracción en los pozos y descargas en nacientes que eventualmente se debe restar al caudal de recarga.

- ✓ Caudal utilizable en el sector de Herradura y Jacó

La recarga potencial en el área de interés (Herradura y Jacó) expresada como caudal instantáneo es de 1338 l/s y a este valor se le sustraen los 413 l/s (Tabla 6, apartado 3.1.1), correspondientes a las extracciones por pozos ya que no se reporta la extracción

por medio de manantiales por las condiciones de bajo potencial hidrogeológico de los Basaltos del Complejo de Nicoya y las areniscas de la Formación Punta Carballo, con lo que se obtiene un valor de 925 l/s. Finalmente, efectuando el análisis de rendimiento sostenible descrito de un 40%, se determina que en la zona de Herradura y Jacó se podrían extraer 370 l/s adicionales o los 413 l/s reportados en las bases de datos; para un total de extracción de unos 783 l/s, este caudal de extracción sería planteado con el objetivo de satisfacer las distintas demandas sociales o económicas de la población, todo bajo un manejo responsable del recurso hídrico subterráneo.

### 5.5.2 Rendimiento sostenible sector Hermosa-Esterillos

Para el cálculo del rendimiento sostenible, se utilizaron los datos de recarga potencial, generados a partir del método de balance hídrico de suelos, y la extracción estimada en el sector de Hermosa y Esterillos. Se realizaron 2 cálculos, uno considerando la extracción con datos de concesiones de la Dirección de Agua del MINAE, y el otro considerando pozos y manantiales de la base de datos de SENARA, junto con pozos inventariados que no se encuentran en las bases de datos. Para el resultado final de caudal utilizable, se calculó el 40%, equivalente al rendimiento sostenible.

La tabla 62 muestra los datos utilizados en los cálculos, y los resultados finales.

Tabla 62. Resultados del análisis de rendimiento sostenible, sector de Hermosa-Esterillos.

Caudal de recarga (l/s)	Caudal de extracción (l/s)	Caudal utilizable (l/s)	Rendimiento sostenible (40%)
9916,02	191,89	9724,13	3889,65
9916,02	277,2*	9638,82	<b>3855,53</b>

\*Se agregaron 10 L/s al caudal estimado con la base de datos de SENARA, equivalentes a pozos que no están registrados pero sí inventariados.

Efectuando el análisis de rendimiento sostenible (calculando un 40% del caudal utilizable), se determina que en el sector de Hermosa - Esterillos se podrían extraer **3855,53 l/s** para satisfacer las distintas demandas sociales o económicas de la población.

### 5.5.3 Rendimiento sostenible sector Parrita-Quepos

Para el cálculo del rendimiento sostenible, se utilizan los datos de recarga generados por el método de balance hídrico de suelos, expresada como caudal instantáneo correspondiente a 11 269,2 l/s, valor al cual se debe sustraer la extracción

por pozos y la descarga por nacientes, para posteriormente determinar el caudal utilizable o rendimiento sostenible (40%).

A partir de la información de la base de datos del SENARA, SINIGIRH y el levantamiento de campo se realiza un inventario de pozos y nacientes existentes en las cuencas de los cantones de Parrita y Quepos (Tablas 13, 14 y 63) y se determina el caudal total de extracción.

Tabla 63. Caudales de extracción en Parrita-Quepos.

Fuente de información	Caudal total de extracción (l/s)
SENARA (pozos)	647,41
SINIGIRH (expedientes concesiones pozos)	109,09
SINIGIRH (concesiones manantiales)	42,33
Inventario de campo	52,80

El uso que representa mayor extracción de agua, según SENARA, es el agroindustrial (4 pozos y 158 l/s) y el abastecimiento público (15 pozos y 154,5 l/s) en la zona de Parrita, mientras que en Quepos los usos de abastecimiento público (6 pozos y 97,1 l/s), y doméstico (18 pozos y 34,68 l/s), son los más comunes, seguidos en ambas zonas por el industrial que abarca 6 pozos para una extracción de 40,3 l/s en Parrita y 3 pozos en Quepos correspondientes a 12,3 l/s.

De acuerdo con la tabla 63 se determina que el caudal extraído por pozos y reportados en la base de datos del SENARA es mayor que el reportado por el SINIGIRH, razón por la cual para el cálculo de extracción de agua se utilizará la información de la base de datos del SENARA, mientras que para el caso de los manantiales, se utilizará el dato de extracción reportado en el SINIGIRH de 42,33 l/s, por cuanto consta un registro más amplio (Tabla 13), a partir del cual se desprende que el consumo humano es el uso con el mayor caudal de aprovechamiento, alrededor de 38,03 l/s, seguido por dos nacientes utilizadas para riego con un caudal de 3,7 l/s.

En el campo se inventariaron 16 pozos excavados y 3 punteras que no se encuentran incluidos en ninguna de las bases de datos anteriores y a los cuales se les asignó un caudal de extracción de acuerdo con el uso del pozo y los datos propuestos por el SENARA (2006), manteniéndose un escenario conservador a pesar que sea posible que la extracción sea menor (Tabla 64).

Tabla 64. Caudal de los pozos y punteras inventariados en el campo.

Tipo de uso	Cantidad	Caudal extraído (l/s)
Doméstico	10	5
Agro-Industrial	1	3,8
Riego	4	28
Turismo	4	16
Totales	19	52,8

✓ Caudal utilizable en el sector Parrita-Quepos

En la tabla 65 se sintetiza el análisis de rendimiento sostenible (40%) realizado para los sectores de Parrita y Quepos, y del cual se desprende que en la zona de estudio se podrían extraer 4167,02 l/s para satisfacer la demanda de las distintas actividades económicas y sociales de la población.

Tabla 65. Resultados del análisis de rendimiento sostenible, sector de Parrita-Quepos.

Actividad	Caudal (l/s)
Recarga en la cuenca	11 269,2
Extracción total	851,63
Caudal remanente	10 417,57
Caudal utilizable 40%	<b>4167,02</b>

#### 5.5.4 Rendimiento sostenible sector Naranjo-Savegre-Matapalo

Para el cálculo del rendimiento sostenible, se utilizan los datos de recarga generados por el método de balance hídrico de suelos. Esta recarga expresada como caudal instantáneo es de 11280,17 l/s, valor al cual se debe sustraer la extracción por pozos y la descarga por nacientes, para posteriormente determinar el caudal utilizable o rendimiento sostenible (40%).

A partir de la información de la base de datos del SENARA, SINIGIRH y el levantamiento de campo se realiza un inventario de pozos y nacientes existentes en la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo (Tablas 17, 19, 20).

En el campo se inventariaron 8 pozos excavados que no se encuentran incluidos en ninguna de las bases de datos anteriores y a los cuales se les asignó un caudal de extracción de acuerdo al uso del pozo y los datos propuestos por el SENARA (2006),

donde específicamente para el uso doméstico se considera 8 horas por día de bombeo, los 12 meses del año y se asigna un caudal medio de 0,5 l/s (Tabla 66).

Tabla 66. Pozos excavados inventariados en el campo.

Tipo de Uso	Cantidad de pozos	Caudal extraído (l/s) considerando un caudal medio de 0,5 l/s por pozo, según SENARA (2006).
Doméstico	8	4

Es importante aclarar que, manteniendo un escenario conservador, a los pozos de la tabla anterior se les ha asignado los caudales de extracción y períodos de bombeo máximos según la información técnica disponible, sin embargo, es posible que la extracción sea un poco menor.

Tabla 67. Caudales de extracción en el sector Naranjo-Savegre-Matapalo.

Fuente de información	Caudal total de extracción (l/s)
SENARA (pozos)	117,42
SINIGIRH (expedientes concesiones pozos)	48,097
SINIGIRH (concesiones manantiales)	36,16
Inventario de campo	4

El uso que representa mayor extracción de agua, según SENARA, es el doméstico (18 pozos y 41,77 l/s), seguido de usos no indicados (9 pozos y 25,95 l/s), mientras que los menores usos los constituye las actividades de hospital (1 pozo y 0,5 l/s) y doméstico-turístico (3 pozos y 0,95 l/s).

De acuerdo con la base de datos del SINIGIRH en el área de la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo se registran 42 nacientes de las cuales 21 nacientes son de consumo humano, siendo éste el uso que genera mayor caudal de extracción 19,14 l/s, seguido de 2 nacientes para riego, consumo humano y agropecuario de las cuales se extraen 9,47 l/s. Mientras que el menor caudal de 0,1 l/s, lo extraen dos nacientes de uso turístico y consumo humano (Tabla 20).

A partir de la información anterior (Tabla 67), se determina que el caudal extraído por pozos y reportados en la base de datos del SENARA es mayor que el reportado por el SINIGIRH. Por la razón anterior para el cálculo de extracción de agua se utilizará la información de la base de datos del SENARA.

✓ Caudal utilizable en el sector de Naranjo-Savegre-Matapalo

En la tabla 68 se resume el análisis de rendimiento sostenible realizado en la cuenca de estudio donde se muestra que luego de sustraer los caudales de extracción por pozos y nacientes al caudal de recarga se obtiene un caudal remanente del cual el 40% es el caudal que se podría extraer en la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo para satisfacer las demandas de agua de las actividades económicas y sociales requeridas por la población.

Tabla 68. Resultados del análisis de rendimiento sostenible, sector Naranjo-Savegre-Matapalo.

Actividad	Caudal (l/s)
Recarga en la cuenca	11280,17
Extracción por pozos, SENARA	117,42
Extracción por pozos inventariados en el campo	4
Extracción por manantiales o nacientes	36,16
Caudal remanente	11122,59
Caudal utilizable 40%	<b>4449,04</b>

### 5.5.5 Rendimiento sostenible sector Dominical-Ballena

Para el cálculo del rendimiento sostenible, se utilizan los datos de recarga generados por el método de balance hídrico de suelos. Esta recarga expresada como caudal instantáneo es de 11712,61 l/s, valor al cual se debe sustraer la extracción por pozos y la descarga por nacientes, para finalmente determinar el caudal utilizable o rendimiento sostenible (40%).

Como el valor de caudal de recarga obtenido mediante el balance hídrico de suelos no considera la extracción que se está generando por parte de los pozos o la descarga de nacientes, a continuación se determinará el caudal de extracción en los pozos y descargas en nacientes que eventualmente se debe restar al caudal de recarga.

✓ Extracción y disponibilidad de caudal

La estimación de la extracción de aguas subterráneas en el sector Dominical – Ballena se ha realizado a partir del inventario de pozos y nacientes existentes en la zona, tomando en consideración la información levantada en campo y los registros de las bases de datos del SENARA y el SINIGIRH.

La tabla 69 muestra el resumen de los caudales totales de extracción según la base de datos de pozos y nacientes del SENARA, de concesiones del SINIGIRH y la información de campo. Para el caso de las bases de datos institucionales, el desglose por uso ya fue presentado en las tablas 22 y 23 del apartado 3.5.1 Inventario de pozos, mientras que, en el caso de los pozos inventariados en campo, este desglose de caudales se incluye en el anexo 6.

Se debe mencionar, que tanto en el caso de los pozos inventariados en campo, como en aquellos de la base de datos del SENARA que no reportan caudal de extracción (22 pozos), se les ha asignado un caudal de explotación basándose en los caudales recomendados por SENARA (2006) según el tipo de uso.

Por otra parte, para aquellos pozos que fueron inventariados en campo, y de los cuales se tiene certeza que ya estaban incluidos en las bases de datos institucionales, se ha considerado su caudal de explotación una única vez, como parte de los caudales de extracción de la base de datos del SENARA.

Tabla 69. Caudales de extracción en el sector Dominical-Ballena.

Fuente de información	Caudal total de extracción (l/s)
SENARA	347,37
SINIGIRH (expedientes concesiones)	103,24
Inventario de campo	159,98

El detalle de la información de los pozos, concesiones y caudales indicados en la tabla 69 se presenta en el anexo 1 de este informe.

Como se observa en la tabla 69, el caudal de extracción a partir de la base de datos del SENARA resulta superior al obtenido de la base de datos del SINIGIRH, por lo que, en forma conservadora para el análisis de disponibilidad se utilizará el caudal de extracción obtenido de SENARA. Sin embargo, en cuanto a manantiales la base del SINIGIRH resulta mucho más completa, considerando que el SENARA reporta únicamente 7 manantiales mientras que el SINIGIRH reporta un total de 202 expedientes de manantiales para un total de 52,87 l/s de extracción en este tipo de fuente.

A partir de lo anterior, para fines de la extracción total se adicionará el caudal determinado en SENARA (347,372 l/s), más el caudal de manantiales tomado del

SINIGIRH (5,87 l/s), más el caudal correspondiente al inventario de campo (159,98 l/s), lo que da un total de extracción de **560,22 l/s**.

Es importante mencionar, que las estimaciones realizadas en este apartado son sumamente conservadoras y dirigidas hacia la protección del recurso hídrico. Es por esto, que a los pozos y nacientes se les han asignado los caudales de extracción y períodos de bombeo máximos según la información técnica disponible. No obstante, es posible que la extracción sea un poco menor, al tomar en cuenta que muchos de los pozos tienen períodos de bombeo menores o han caído en desuso por parte de sus propietarios debido a que en la actualidad cuentan con suministro de agua potable, tal y como ha sido registrado en las zonas de Uvita o Dominical.

✓ Caudal utilizable en el sector Dominical - Ballena

La recarga en la zona de estudio obtenida mediante el método de balance hídrico y expresada como caudal instantáneo es de 11712,61 l/s. A este valor se le sustraen los 560,22 l/s, correspondientes a las extracciones por pozos y nacientes, con lo que se obtiene un valor de 11152,39 l/s.

Finalmente, efectuando el análisis de rendimiento sostenible (40%), se determina que en forma general en la zona de estudio se podrían extraer 4461 l/s para satisfacer las distintas demandas sociales o económicas de la población.

## CONCLUSIONES

---

### Sector Herradura-Jacó

Las formaciones geológicas presentes en el sector de Herradura-Jacó, han favorecido el desarrollo de cuatro principales acuíferos de distinto potencial. La unidad hidrogeológica de basaltos, asociada a las rocas del complejo de Nicoya, de composición volcánica con una capa de meteorización de 5-8 m de espesor y una conductividad hidráulica de 1,34 m/d, una transmisividad de 42,37 m<sup>2</sup>/d, y un espesor saturado de 32 m aproximadamente. Básicamente se clasifica como un acuífero fracturado, que se comporta como libre y confinado en el sector de Herradura.

Las areniscas de la Formación Punta Carballo se caracterizan por una conductividad hidráulica y transmisividad bajas, con un espesor saturado de 48,67 m, corresponde con un acuífero fracturado, que dependiendo del sector, se puede comportar como libre o confinado.

Las gravas y arenas de los depósitos cuaternarios aluviales del sector de Herradura, conforman el acuífero Herradura, el cual se caracteriza por un espesor saturado de unos 17 a 19 m, presencia de capas de arcillas no continuas de hasta 7 m de espesor, una transmisividad de 1546,08 m<sup>2</sup>/d y una conductividad hidráulica de 50,23 m/d y se clasifica como un acuífero poroso libre. Este acuífero tiene una gran importancia en la economía local del sector de Herradura ya que parte de la extracción y distribución de agua para consumo humano, se hace por medio de pozos perforados de la ASADA Herradura y la ASADA Los Sueños.

El acuífero Jacó, conformado por capas de origen fluvial de gravas gruesas a finas y arenas gruesas a finas con intercalaciones de lentes de limos y arcillas de origen principalmente aluvial, tiene un espesor total que oscila entre los 23,00 a 25,25 m y un espesor saturado de 18,00 a 20,00 m. En la parte superior presenta arcillas y limos de hasta 4 a 6 m. Presenta una transmisividad alta de 1588,40 m<sup>2</sup>/d y una conductividad hidráulica de 79,42 m/d. Corresponde con un acuífero poroso confinado.

Hacia el sector NE de Herradura la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación se clasifica como Media, mientras que en la zona SW del acuífero Herradura la

vulnerabilidad es Baja, debido al confinamiento que tiene el acuífero en dicho sector hacia la zona de playa Herradura.

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero Jacó se clasifica como Baja, debido principalmente al confinamiento de los aluviones por los sedimentos finos de limos y arcillas suprayacentes.

La recarga potencial para el sector de Herradura y Jacó varía en un rango de 0 mm y 879 mm/año. El promedio de recarga potencial para toda la zona es de 549 mm/año, por lo que para un área de 77,89 km<sup>2</sup>, se tiene un caudal de 1356 l/s (4,28×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>/año). Mediante el análisis de la recarga por hidrograma de pozos se determinó que el acuífero Herradura recarga 0,95 m/año, por lo que considerando un área de 4,30 km<sup>2</sup>, se tiene una recarga de 129 litros por segundo.

A través del análisis de rendimiento sostenible se determinó que en la zona de Herradura y Jacó se podrían extraer 370 l/s adicionales o los 413 l/s reportados en las bases de datos; para un total de extracción de unos 783 l/s, este caudal de extracción sería planteado con el objetivo de satisfacer las distintas demandas sociales o económicas de la población, todo bajo un manejo responsable y sostenible del recurso hídrico subterráneo.

### **Sector Hermosa-Esterillos**

En la zona de Esterillos, el acuífero se asocia a rocas sedimentarias de la Formación Punta Carballo, con espesores entre 12 y 96 m. El acuífero se considera libre, con niveles de agua entre 1 y 8 m de profundidad, y presenta una dirección de flujo hacia el sur y suroeste.

En el sector de Playa Hermosa, Pochotal y al norte de Pochotal, el acuífero se asocia a basaltos sanos y fracturados, junto con brechas basálticas y radiolaritas del Complejo de Nicoya. En la parte baja del área, el acuífero también se asocia a rocas sedimentarias de la Formación Punta Carballo y depósitos aluviales recientes.

En la parte al norte de Pochotal, los basaltos alcanzan entre 23 y 162 m de espesor, y en algunos sectores se encuentran radiolaritas asociadas al Complejo de Nicoya de entre 80 y 91 m de espesor. En la parte más cercana a la playa, las areniscas y lutitas de la Formación Roca Carballo alcanzan entre 37 y 99 m de espesor, sobreyaciendo a los basaltos.

Los niveles de agua subterránea ubicados exclusivamente en los basaltos y radiolaritas se ubican entre 1,8 y 160 m de profundidad. En la parte baja del área, los niveles se encuentran entre 2 y 65 m de profundidad. La dirección de flujo va hacia sur, sureste y suroeste.

En los alrededores de Pochotal se obtienen vulnerabilidades entre baja y media, con algunos sitios muy localizados donde la vulnerabilidad obtenida es despreciable debido a que los pozos utilizados reflejan confinamiento en el acuífero.

Para el sector de Esterillos, se obtienen vulnerabilidades entre baja y media, de manera muy localizada, ya que no se contaba con suficiente información de pozos en el área. La recarga potencial anual va desde los 0 mm a los 1238,79 mm, para un rango de entre 21% y 22% de la precipitación que cae en la zona.

La extracción estimada en este sector es de entre 191,89 l/s y 277,2 l/s.

Efectuando el análisis de rendimiento sostenible, se determina que en el sector se podrían extraer **3855,53 l/s** para satisfacer las distintas demandas sociales o económicas de la población.

### **Sector Parrita-Quepos**

Las rocas sedimentarias de la Formación Térraba han desarrollado un acuífero fracturado libre, que de manera local se comporta como confinado al Nor-Este de la confluencia de los ríos Valeria y Damas, asociado a capas de limos arcillosos de alta plasticidad y sedimentos. Los niveles de agua subterránea varían entre 10,7 y 18 m de profundidad, debido a la presencia de fracturas. El sistema se caracteriza por presentar una conductividad hidráulica entre  $1,54 \times 10^{-6}$  m/día a 3,55 m/día, una dirección de flujo preferencial hacia el Sur-Oeste y un gradiente hidráulico de 0,04 a 0,26 y una transmisividad baja del orden de  $3,56 \text{ m}^2/\text{día}$ . El potencial del acuífero es bajo, como resultado de la porosidad secundaria desarrollada a través de fracturas abiertas en las lutitas y areniscas, con caudales entre 0,5 l/s y 6 l/s.

En las rocas de la Formación Tulín se presenta un acuífero libre fracturado a partir de la porosidad secundaria de los basaltos y las brechas basálticas, no obstante, el aporte de agua al sistema está limitado por la gran cantidad de fracturas rellenas con materiales de alteración. La conductividad hidráulica es de 0,0433 m/día a 1,07 m/día, el nivel del agua subterránea se encuentra a 27 m de profundidad y solo se registra un

caudal de 9,5 l/s, debido a la escasa información registrada, no es posible determinar su potencial para la zona de Parrita que es en el sitio donde aflora.

El acuífero poroso-aluvial, con una amplia distribución espacial en la zona de estudio y un espesor de 14-20 m, presenta una variación lateral debido a la presencia de una capa de arcilla y arcilla con arena de 1-6 m de espesor en el sector de Parrita, mientras que hacia Quepos las granulometrías corresponden con gravas y bloques, sobreyacidas por una capa de arcilla de 3 m. El nivel del agua subterránea es superficial, entre los 0,49 y 6,5 m, con conductividades hidráulicas de 4,91 m/día a 8,25 m/día, la dirección del flujo es al Sur con un gradiente hidráulico de 0,1 a 0,16 y una transmisividad de 99 m<sup>2</sup>/día a 140 m<sup>2</sup>/día. El potencial del acuífero es alto y ampliamente captado en ambas zonas, la recarga ocurre por la infiltración directa de lluvia y el eventual aporte de los cursos superficiales.

En los alrededores de Bandera y Parrita la vulnerabilidad es alta, no obstante, hacia las localidades de Tigre, La Ligia y Nicoya la vulnerabilidad es media y hacia Julieta, Jicote y Bejuco es baja.

La recarga potencial anual es de 11 269,1 l/s, equivalente a un 23,37% de la precipitación promedio anual en las cuencas analizadas, destacando que la mayor recarga ocurre en los Depósitos Aluviales Recientes y en la Formación Térraba.

#### **Sector Naranjo-Savegre-Matapalo**

En el área de estudio se definieron dos acuíferos; uno almacenado en los Depósitos aluviales recientes y el otro en la formación Térraba. El primero es un acuífero libre, asociado a depósitos aluviales constituidos por materiales limo arenosos con grava, color café, mezclado con lentes de gravas arenosas, gravas gruesas y arcillas aisladas, presenta un espesor mínimo y máximo aproximado de 10 y 50 m respectivamente. En algunos sitios como por ejemplo en los alrededores de la Managua en la parte superior desarrolla un suelo limo-arcilloso con un espesor aproximado entre 1 y 4 m, aunque no siempre se presenta esta condición. Los pozos que captan este acuífero son, en su mayoría, de tipo artesanales, aunque también existen perforados y en menor cantidad de investigación. Las profundidades no superan los 65 m b.n.s y presentan niveles de agua subterránea que varían entre 0,53 y 10 m.b.n.s y los caudales de producción van desde 0,5 l/s hasta 10 l/s. Asimismo, las transmisividades se encuentran entre 1,45 m<sup>2</sup>/d (QP-13) y 267,8 m<sup>2</sup>/d (QP-91), aunque también se han

reportado transmisividades de 1567 m<sup>2</sup>/d (QP-92). En el piezómetro QP-101 se calcularon permeabilidades entre 52,31 m/d y 251,72 m/d para los aluviones con matriz arenosa y las arenas sin consolidar, respectivamente. En el DM-138 se calculó un coeficiente de almacenamiento de  $2,7 \times 10^{-3}$ . La dirección del flujo de agua subterránea ocurre preferencialmente hacia el sur-suroeste con un gradiente hidráulico promedio de 0,03 en la parte norte del río Savegre. En el sector central de los depósitos aluviales, al sur del área de estudio, las líneas se presentan más espaciadas, lo que evidencia una disminución del gradiente hidráulico promedio el cual es de 0,004 y en el sector sureste de los depósitos aluviales en la cuenca de interés el gradiente hidráulico promedio es de 0,01. La recarga de este acuífero proviene principalmente de la precipitación, mientras que la descarga ocurre principalmente hacia los lechos de los ríos y en menor proporción por pozos de extracción principalmente por la ausencia de manantiales en esta unidad.

El segundo acuífero se encuentra albergado en rocas de la Formación Térraba, distribuidas en los sectores nor-noreste del área de estudio, donde se ubican los poblados de Sábalo, Bijagual, Santo Domingo, Dos Bocas y San Andrés. Corresponde con un acuífero libre cubierto por capas de cobertura irregular de limos, arcillas y arenas finas producto de la meteorización de lutitas y areniscas y por depósitos de coluvios. La unidad hidrogeológica está constituida por rocas sedimentarias principalmente lutitas y areniscas medias y finas que presentan alto grado de fracturación lo cual facilita el paso del agua.

Los pozos que captan este acuífero poseen profundidades que van desde los 40 m b.n.s hasta los 140 m b.n.s, caudales explotables desde 0,02 l/s hasta 2,15 l/s, niveles de agua subterránea desde los 11 m b.n.s hasta 68 m.b.n.s, además presentan transmisividades desde 22 m<sup>2</sup>/d (DM-150) hasta 52 m<sup>2</sup>/d (SG-14). En el QP-94 se determinó una permeabilidad máxima para los depósitos de esta unidad hidrogeológica de 4,07 m<sup>2</sup>/d. Las líneas de flujo muestran una dirección de flujo preferencial hacia el noroeste con un gradiente hidráulico de 0,01 en la mayor parte de la formación Térraba, mientras que en el sector éste de la formación las líneas se presentan más espaciadas, lo que evidencia una disminución en el gradiente hidráulico a 0,005. El alto grado de fracturación de las areniscas y lutitas favorece que la precipitación se infiltre hacia el acuífero generando una recarga principalmente directa.

Mediante el balance hídrico de suelos se determinó que la recarga potencial total en la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo es de 11280,17 l/s que equivale al 25,26% de la precipitación total anual en la cuenca.

El análisis de fluctuación de niveles en pozos permitió la estimación de recarga acuífera únicamente en las unidades hidrogeológicas Depósitos Aluviales Recientes (1400,3 l/s) y Fm. Térraba (1540,5 l/s). Para estas dos unidades hidrogeológicas la recarga obtenida, por el método de hidrograma de pozos, resulta aproximadamente 3 veces menor que la obtenida mediante el balance hídrico de suelos.

De acuerdo al análisis de rendimiento sostenible realizado se determinó que el caudal que se podría extraer en la cuenca Naranjo-Savegre-Matapalo para satisfacer las demandas de agua de las actividades económicas y sociales requeridas por la población es de 4449,04 l/s. Lo anterior luego de extraer al caudal de recarga potencial de 11280,17 l/s los 157,36 l/s correspondientes a extracciones de pozos y nacientes o manantiales y calcularle el 40%.

La mayoría de las áreas analizadas presentan vulnerabilidad media incluyendo los poblados de Lllamarón, Bartolo y Roncador al suroeste del área de estudio y Portalón en la zona central, así mismo, en sectores al noreste del Silencio y al sureste de Palma Quemada. En La Managua de Quepos y al noroeste de Hatillo se determinó una vulnerabilidad media, mientras que, al este de Roncador, El Silencio y al oeste de Portalón la vulnerabilidad se determinó como alta.

#### **Sector Dominical-Ballena**

La zona se caracteriza por presentar en toda su extensión un modelo geológico bastante homogéneo, en donde hacia los sectores montañosos de la Fila Costeña se presentan rocas sedimentarias asociadas a la Fm. Térraba, mientras que en las zonas planas cercanas a la costa se ubican depósitos de tipo aluvial sobreyaciendo al basamento conformado por los mismos materiales de la Fm. Térraba. Intruyendo a la Fm. Térraba, en ciertos sectores se localizan rocas ígneas de composición gabroica pertenecientes a la Fm. Puerto Nuevo. También es común, principalmente en los sectores montañosos con pendientes fuertes, la presencia de depósitos coluviales recientes de poca extensión, con presencia de bloques tanto sedimentarios como ígneos.

La información de los aforos diferenciales permitió establecer la existencia de un comportamiento predominante de tipo efluente en los ríos, con aporte de agua subterránea desde el acuífero. Sin embargo, este comportamiento no es constante y presenta variaciones a influente, según se ha observado principalmente en las zonas de depósitos aluviales como es el caso del río Uvita.

El modelo hidrogeológico para el área de estudio se compone de un sistema que incluye varias unidades hidrogeológicas acuíferas, siendo las principales las rocas asociadas con la Formación Térraba y los depósitos aluviales recientes. En este sistema, parte del agua de precipitación se infiltra en el terreno y se incorpora al flujo subterráneo como recarga. De modo muy general, la tendencia del flujo subterráneo en el área de estudio es predominantemente hacia el SW, en donde va a descargar directamente al mar o previamente en algunos cursos superficiales. Muy probablemente exista conexión hidráulica entre las distintas unidades acuíferas, sin embargo, la información hidrogeológica disponible no ha permitido comprobar con total certeza esta condición para toda el área de estudio.

El acuífero desarrollado en la Formación Térraba presenta una porosidad secundaria debido al fracturamiento de las rocas. Sus caudales de explotación normalmente se ubican bajo los 5 l/s y predominan transmisividades entre los 10 a 100 m<sup>2</sup>/d. Destaca la condición de acuífero libre, aunque se mencionan ciertos grados de confinamiento en al menos 51 pozos registrados. Dada la heterogeneidad del medio, característico de acuíferos fracturados, no ha sido posible establecer una distribución particular para los sectores libres o confinados en el acuífero. Se ha determinado una dirección de flujo predominante hacia el SW, en dirección al mar, con algunas variaciones locales como sucede en las cuencas de los ríos Barú o Guabo, en donde parte del flujo subterráneo se dirige hacia el cauce principal. El gradiente hidráulico es variable y se ubica entre 0,09 hasta 0,35.

Todos los registros de conductividad eléctrica efectuados en los pozos de monitoreo indicaron valores por debajo de los 400  $\mu$ S/cm, cumpliendo con el valor recomendado según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, decreto 32327-S. Incluso, varios pozos reportaron valores muy bajos entre los 50 a 100  $\mu$ S/cm, que pueden indicar una rápida recarga del agua de precipitación.

Los materiales ígneos e intrusivos de la Formación Puerto Nuevo, únicamente se comportan como acuíferos al encontrarse fracturados. Su potencial es bajo, con caudales menores a los 4 l/s y transmisividad por debajo de los 10 m<sup>2</sup>/d. Se describe principalmente como de tipo libre y su recarga puede generarse en forma directa al aflorar en superficie, o en profundidad puede provenir de percolación vertical o recarga lateral a partir de los sedimentos saturados de Formación Térraba. Se cuenta con muy poca información disponible para una mayor caracterización.

Los Depósitos Aluviales Recientes corresponden con acuíferos libres, de naturaleza porosa, y desarrollados en materiales sedimentarios recientes (gravas, arenas y limos) acarreados y depositados por los ríos y quebradas. Su recarga es por infiltración directa, aunque también es probable que se presente recarga lateral a partir de la Formación Térraba. Los principales acuíferos asociados con este tipo de depósitos se ubican en las zonas de Hatillo - Dominical, Uvita, Ballena y Punta Mala. Presentan niveles del agua subterránea bastante someros, en general a menos de 5 metros de profundidad, con direcciones de flujo predominante hacia el SW en dirección al mar y gradientes hidráulicos entre 0,004 a 0,025. El espesor acuífero es variable, alrededor de los 10 a 12 m en varios pozos, pero se ha reportado un máximo de 35 m en la zona de Uvita, muy probablemente asociado a la influencia de la actividad tectónica del área.

Únicamente para la zona de Uvita se cuenta con información de conductividad hidráulica, la cual se ubica en el rango de 1,42 a 237 m/d y que ponen en evidencia la variabilidad del medio según el tipo de granulometrías captadas. En general, los monitoreos de conductividad eléctrica no evidenciaron problemas de intrusión marina, con reportes por debajo de los 400 µS/cm que cumplen con el decreto No. 32327-S. Únicamente en el sector de Punta Mala y en tres pozos de la zona de Uvita se detectaron valores altos de conductividad eléctrica, pero esa situación responde a condiciones muy localizadas debido a la época de monitoreo y a la ubicación de los pozos muy cerca del mar o a esteros con influencia marina.

A partir de la metodología de vulnerabilidad hidrogeológica GOD, para la Formación Térraba predominan las categorías de vulnerabilidad baja y media. En cuanto a los depósitos aluviales, el análisis fue realizado únicamente para la zona de Uvita y Bahía, en las que se determinaron categorías de vulnerabilidad media y en menor grado

algunas áreas con vulnerabilidad alta, como es el caso de los sectores de Colonia (Chamán) y Bahía.

La recarga potencial total en el sector Dominical – Ballena es de 11712,61 l/s. Esta recarga equivale al 26,42% de la precipitación total anual en el área de estudio (44316,02 l/s). El 91,26 % de la recarga potencial se genera en sectores asociados con la Formación Térraba, mientras que en los depósitos aluviales la recarga es de un 8,73%.

Mediante el análisis de fluctuación de niveles se estimó una recarga acuífera de 7800,6 l/s, de los cuales el 97,37% (7595,5 l/s) corresponden a la Formación Térraba y el 2,63% (205,18 l/s) a los depósitos aluviales.

A partir de los caudales reportados en las bases de datos institucionales y los asignados a los pozos inventariados en campo según su uso, se estimó que el caudal total de extracción a bombeo continuo de agua subterránea en el sector Dominical – Ballena es de unos 560,22 l/s. Los principales usos en esta extracción corresponden con actividades domésticas, consumo humano, riego y turismo.

A partir del análisis de rendimiento sostenible, se determinó que en forma general en el sector Dominical – Ballena se podrían extraer 4461 l/s para satisfacer las distintas demandas sociales o económicas de la población.

## RECOMENDACIONES

---

Una vez concluido el estudio hidrogeológico del Pacífico Central y los resultados obtenidos, resulta fundamental establecer una serie de recomendaciones, en aras de garantizar el recurso hídrico, en disponibilidad y calidad como elemento básico para articular a las comunidades y a la economía de los cantones involucrados en el presente estudio.

En el tema de vulnerabilidad se emiten las siguientes recomendaciones:

- En el caso de desarrollo de proyectos urbanísticos y para todas las categorías de vulnerabilidad se debe aplicar el Decreto 42075-S-MINAE “Reglamento para la disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas”, publicado en el Alcance Digital N° 87 a la Gaceta N° 80, del 14 de abril del 2020.
- Para vulnerabilidad despreciable y baja: Es factible el desarrollo de actividades industriales y comerciales que utilicen sustancias de baja, media y alta toxicidad.

Utilizar buenas prácticas agrícolas e implementar las medidas necesarias para minimizar el impacto negativo al ambiente, recomendadas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, el Ministerio de Salud, para el manejo adecuado de las sustancias químicas, biológicas o afines para uso agrícola.

- Vulnerabilidad media: Se recomienda el desarrollo de actividades de baja y media toxicidad.

Desarrollar la infraestructura y las medidas de control necesarias para evitar el riesgo de contaminación de suelos y aguas (manejo de excretas, aguas servidas y efluentes, manejo y almacenamiento de productos, trampas de grasas y aceites, entre otros).

Para las actividades de alta toxicidad, se recomienda implementar un plan de monitoreo y seguimiento ambiental de las aguas subterráneas, para prevenir futuras contaminaciones.

Implementar buenas prácticas agrícolas y las medidas necesarias para minimizar el impacto negativo al ambiente, recomendadas por el Ministerio de Agricultura y

Ganadería, el Ministerio de Salud, para el manejo adecuado de las sustancias químicas, biológicas o afines para uso agrícola.

- Vulnerabilidad alta: Se recomienda el desarrollo de actividades de baja y media toxicidad. No se recomienda el desarrollo de actividades de alta toxicidad.

Desarrollar la infraestructura y las medidas de control necesarias para evitar el riesgo de contaminación de suelos y aguas (manejo de excretas, aguas servidas y efluentes, manejo y almacenamiento de productos, trampas de grasas y aceites, entre otros).

Las actividades agropecuarias que de manera puntual utilicen, almacenen o descarguen sustancias contaminantes deben utilizar sistema de tratamiento, avalado por el Ministerio de Salud.

Implementar buenas prácticas agrícolas y las medidas necesarias para minimizar el impacto negativo al ambiente, recomendadas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, el Ministerio de Salud, para el manejo adecuado de las sustancias químicas, biológicas o afines para uso agrícola.

- Para zonas donde no se determinó una vulnerabilidad, dentro del proceso de permisos que establece la legislación vigente, deben proceder con los estudios técnicos que cada institución solicite en sus debidos procedimientos para evaluar la actividad.

Con respecto a la Recarga se indican las siguientes recomendaciones:

Mientras no se cuente con un plan regulador con la Variable Hidrogeológica incorporada y aprobada, las actividades deberán garantizar el mantener un 80% de la recarga estimada. Para esto, los desarrolladores podrán manejar la cobertura del terreno, utilizar materiales de construcción permeables, o aplicar técnicas para el mejoramiento de la recarga artificial de los acuíferos. En ese sentido, el SENARA cuenta con el documento técnico “Manual de Técnicas para el Mejoramiento de la Recarga Artificial de Acuíferos”, que puede ser consultado y aplicado por los distintos interesados.

Una vez que los gobiernos locales cuenten con planes reguladores con variable hidrogeológica incorporada y aprobada, se recomendarán coberturas específicas.

Para zonas donde no se determinó una recarga, dentro del proceso de permisos que establece la legislación vigente, deberán proceder con los estudios técnicos que cada institución solicite en sus debidos procedimientos para evaluar la actividad.

Se considera adecuado que en las zonas categorizadas como de recarga muy baja, durante los procesos de elaboración de la variable hidrogeológica para planes reguladores, a nivel de los gobiernos locales se investigue con mayor detalle las velocidades de infiltración y otros parámetros del suelo, con miras a establecer con mayor precisión la continuidad espacial de la categoría de recarga muy baja que se determinó.

De manera general para los acuíferos estratégicos se tiene que establecer redes de monitoreo para la calidad del agua vrs la cantidad de recarga y por lo tanto se debe establecer también una red de monitoreo para la calidad del agua subterránea

## BIBLIOGRAFÍA

---

ABRATIS, M., 1998: Geochemical variations in magmatic rocks from southern Costa Rica as a consequence of Cocos Ridge subduction and uplift of the Cordillera de Talamanca. - 134 págs. Univ. de Göttingen, Alemania [Tesis Doc.].

AGUDELO, C., 2005: Diagnóstico de las Aguas Subterráneas en las Hojas Tárcoles, Herradura y Candelaria. - 51 págs. SENARA. San José, Costa Rica.

ALFARO, A. & BARRANTES, J., 2002: Borrador de informe geológico en línea de túnel, P.H. Brujo 1. - 42 págs. San José, ICE [Inf. Interno].

ALVARADO, G.E. & GANS, P., 2012: Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. - Rev. Geol. Amér. Central, 46:7-122.

ALVARADO, G., 2005: La Falla Longitudinal de Costa Rica: Un insumo neotectónico hacia la Amenaza Sísmica del P.H. Boruca-Veraguas (Informe). Instituto Costarricense de Electricidad.

ARIAS, M., 1998: Estudio geológico de la fila Guácimo y alrededores, Coto Brus, Pacífico Sur, provincia de Puntarenas. - 91 págs. Univ. De Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol].

ARIAS, M., 2018: Determinación del potencial hidrogeológico en las microcuencas de los ríos Barú y Guabo, provincias de Puntarenas y San José. San José, Costa RICA, ECG, SEP-UCR.

ARIAS, O., 2003: Redefinición de la formación Tulín (maastrichtiano-eoceno inferior) del Pacífico Central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 28, p. 47-68.

ARIAS, M. & MORERA, S., 2000: Evaluación del Acuífero de Jacó, Garabito, Puntarenas. - 17 págs. SENARA. San José, Costa Rica.

BAUMGARTNER, P., MORA, C.R. BUTTERLIN, J. SIGAL, J. GLAÇON, GG. AZÉMA, J. & BOURGOIS, J., 1984: Sedimentación y paleogeografía del Cretácico y Cenozoico del litoral pacífico de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 1, p. 57-136.

BERRANGÉ, J. P & THORPE, R.S., 1988: The geology, geochemistry and emplacement of the Cretaceous/ Tertiary ophiolitic Nicoya Complex of the Osa Peninsula, southern Costa Rica, Tectonophysics, 147, 193 - 220.

BERRANGÉ, J., 1989: The Osa Group: An auriferous Pliocene Sedimentary unit from the Osa Peninsula, southern Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 10: 67- 93.

BOLZ, A & CALVO, C., 2003: Nuevos datos bioestratigráficos y sedimentológicos sobre el origen del Complejo Básico de Quepos, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 28. p 31-45.

BUCHS, D.M., ARCULUS, R., BAUMGARTNER, P.O., BAUMGARTNER-MORA, C., ULIANOV, A., 2010: Late Cretaceous arc development on the SW margin of the Caribbean Plate: Insights from the Golfito, Costa Rica, and Azuero, Panama, complexes.- *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11(7), DOI: 10.1029/2009GC002901.

BUCHS, D.M., BAUMGARTNER, P.O., BAUMGARTNER-MORA, C., BANDINI, A.N., JACKETT, S.J., DISERENS, M.O. & STUCKI, J., 2009: Late Cretaceous to Miocene seamount accretion and mélangé formation in the Osa and Burica Peninsulas (Southern Costa Rica): episodic growth of a convergent margin.- En: JAMES, K.H., LORENTE, M.A. & PINDELL, J.L. (eds): *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate.*- *Geol. Soc., London, Sp. Publ.*, 328: 411-456. *CAMPAÑA GEOLÓGICA*, 1985

CASTRO, L., 2010: Caracterización hidrogeológica del acuífero aluvial Naranjito, Quepos, Puntarenas. -100 págs. Universidad de Costa Rica. [Tesis M.Sc.].

COLLINS, L. S., COATES, A. G., JACKSON, J. B. C. & OBANDO, J., 1995: Timing and rates of emergence of the Limon and Bocas del Toro Basins: Caribbean effects of Cocos Ridge subduction. - En MANN, P. (Ed.), *Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America* (263-290). Boulder, Colorado, United States of America: Geological Society of America.

DENGO, G., 1953: A preliminary Survey on the Geology of Puntarenas Province, Costa Rica. Ministerio de Agricultura e Industria. Compañía Petrolera de Costa Rica. San José, Costa Rica., 25 págs.

DENGO, G., 1962: Estudio geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica. San José. Imprenta del I.G.N., 118 págs.

DENYER, P. & ARIAS, O., (1991). *Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica.* *Revista Geológica de América Central*, 12. p 1-59.

DENYER, P., AGUILAR, T. & ALVARADO, G., 2003: Geología y estratigrafía de la hoja Barranca. *Revista Geológica de América Central*, 29. p 105-125.

DENYER, P. & BAUMGARTNER, P.O. & GAZEL, E., 2006: Characterization and tectonic implications of Mesozoic-Cenozoic oceanic assemblages of Costa Rica and Western Panamá.- *Geológica Acta*, 4(1-2): 219-235.

DENYER, P. & ALVARADO, G.E., 2007: Mapa geológico de Costa Rica. – Editado por la Librería Francesa. Escala 1:400.000.

DENYER, P. & GAZEL, E., 2009: The Costa Rican Jurassic to Miocene oceanic complexes: Origin, tectonics and relations.- *J. South Amer. Earth Sciences*, 28: 429-422.

DENYER, P., MONTERO, W & ALVARADO, G., 2003: Atlas tectónico de Costa Rica.-81 págs. Ed. Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica.

DI MARCO, G., 1994: Les terrains accrétés du sud du Costa Rica.- Mémoires de Géologie (Lausanne), 20: 1-184.

DI MARCO, G., BAUMGARTNER, P.O. & CHANNELL, J.E.T., 1995: Late Cretaceous-early Tertiary paleomagnetic data and revised tectonostratigraphy subdivision of Costa Rica and western Panama.- En: MANN, P. (ed.): Geological and tectonic development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America. Geol. Soc. Amer. Bull. Spec. Paper, 295: 1-27.

DÓNDOLI, C., DENGÓ, G & MALAVASSI, E., 1968: Mapa geológico de Costa Rica, 1/700 000. Dirección de Geología, Minas y Petróleo. – En: Tournon, J. & Alvarado, G., 1997: Mapa geológico de Costa Rica. - Ed. Tecnológica de Costa Rica. - 79 págs.

FAO, 2006: Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. - Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Pág. 163-165.

FREEZE, R.A & CHERRY, J.A., 1979: Groundwater. Prentice-Hall, Inc. Nueva York.

FONSECA, W., 2003: Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. – Heredia, Costa Rica. Recuperado de <https://www.fonafifo.go.cr/media/1332/manual-para-productores-de-teca.pdf>

FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., D'ELIA, M. & PARIS, M., 2002: Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. – 115 págs. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial. Washington, EE.UU.

GRANADOS, R & AGUILAR, T., 1983: Geopaleontología de la cuenca baja del río Savegre, Costa Rica.- Brenesia, 21: 229-260.

HAUFF, F., HOERNLE, K., VAN DEN BOGAARD, P., ALVARADO, G. & GARBE-SHÖNBERG, D., 2000: Age and Geochemistry of Basaltic Complexes in Western Costa Rica: Contributions to the Geotectonic Evolution of Central America.- *Geochem. Geophys. Geosyst.* 1(5): 1999GC000020, DOI: 10.1029/1999GC000020.

HENNINGSSEN, D., 1965: La Fila Costeña del Pacífico en Costa Rica y su posición dentro del sistema montañoso Centroamericano Meridional. Dirección de Geología, Minas y Petróleo, Ministerio de Industria y Comercio. 95 págs.

HOERNLE, K., VAN DEN BOOGARD, P., WERNER, R., LISSINA, B., HAUFF, F., ALVARADO, G. & GARBE-SCHÖNBERG, D., 2002: Missing history (16-71 Ma) of the Galápagos

hotspot: Implications for the tectonic and biological evolution of the Americas.- *Geology*, 30: 795-798.

[http://www.senara.or.cr/acerca\\_del\\_senara/direcciones/direccion\\_de\\_investigacion\\_y\\_gestion\\_hidrica/Terminos\\_de\\_Referencia.aspx](http://www.senara.or.cr/acerca_del_senara/direcciones/direccion_de_investigacion_y_gestion_hidrica/Terminos_de_Referencia.aspx) [Consulta: 19 de marzo del 2019].

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA (TEC), 2008: Atlas digital de Costa Rica 2008 [DVD-ROM]. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN), 2020: Curvas de nivel a escala 1:25000 [Base de datos]. Recuperado de [https://www.snitcr.go.cr/ico\\_servicios\\_ogc\\_info?k=bm9kbzo6Mjc=&nombre=IGN%20Cartograf%C3%ADa%201:25mil](https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6Mjc=&nombre=IGN%20Cartograf%C3%ADa%201:25mil)

JIMÉNEZ, J. A., 2002: Manual práctico para el cultivo de la papaya hawaiana. – 108 págs. Earth. Guácimo, Costa Rica.

KUSSMAUL, S., 2000: Estratigrafía de las rocas ígneas. - En Denyer, P & Kussmaul, S- (comp): Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica. I ed. Cartago, p. 63-86.

LINKIMER, L. & AGUILAR, T., 2000: Estratigrafía sedimentaria. En Denyer, P & Kussmaul, S- (comp): Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica. I ed. Cartago. p 43-62.

MADRIGAL, R., 1974: Resumen de la estratigrafía de Costa Rica. Cátedra de Geología de campo. UCR., 17 pág.

MATAMOROS, R., 2012: Caracterización hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica del acuífero Parrita.-108 págs. Universidad de Costa Rica. [Tesis Lic.].

McDONALD D.F., 1920/1921: Informe final geológico y geográfico de Costa Rica. – Rev. de Costa Rica 2:28-32, 50-57, 106-111, 139-148.

MCMILLAN, I., GANS, P.B. & ALVARADO, G.E., 2004: Middle Miocene to present plate tectonic history of the southern Central American Volcanic Arc. - *Tectonophysics*, 392: 325-348.

MINAE; 2020: Archivo Nacional de Concesiones (versión digital).

MONTERO, W., DENYER, P., BARQUERO, R., ALVARADO, G., COWAN, H., MACHETTE, M., HALLER, K. & DART, R., 1998: Map and database of quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. – 63 págs. USGS, Denver, Colorado.

MONTERO, W., 2000a: Geotectónica.- En: Denyer, P., & Kussmaul, S., 2000: Geología de Costa Rica .- Editorial Tecnológica de Costa Rica, 115-132.

MONTERO, W., 2000b: Sismología y Neotectónica.- En: Denyer, P., & Kussmaul, S., 2000: Geología de Costa Rica .- Editorial Tecnológica de Costa Rica, 219-239.

MORA, C.S., 1979: Proyecto hidroeléctrico Boruca. Informe de progreso N° 5, vol. I: Estudio geológico regional. – 193 págs. Instituto Costarricense de Electricidad. San José, Costa Rica.

RAMÍREZ, R., 2007: Recarga Potencial del Acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica. – 41 págs. SENARA. San José, Costa Rica.

RECOPE, 1997: Mapa Geológico de Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía, la Dirección de Geología y Minas-Dirección de Hidrocarburos y la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), escala de 1:750.000.

RODRÍGUEZ, 2017: Potencial sísmico de las fallas del cinturón deformado del centro de Costa Rica.- 284 págs. Universidad de Costa Rica. [Tesis Lic.].

SCHMIDT-EFFING, R., 1979 a: Alter und genese des Nicoya – Komplexes, elner ozeanischen paläokruste (Oberjura bis Eozän) im südlichen Zentralamerika.- Geol. Rdsch. 68: 457-494.

SCHMIDT-EFFING, R., 1979 b: Geodynamic history of oceanic crust in Southern Central America. Fourth Latin American Geological Congress. Geologischen Rundschau: 457-492.

SCHOSINSKY, G., 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central, 34-35. p 13-30.

SENARA, 2006: Variables para la estimación de caudal de extracción por pozos según uso reportado. - Servicio Nacional de Agua Subterránea, Riego y Avenamiento [Informe interno].

SENARA., 2017a: Explicación detallada de términos de referencia Estudios Hidrogeológicos mayo 2017.- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento.

SENARA., 2020: Archivo Nacional de Pozos y Manantiales.

SOTO, D. & ALVARADO, G., 2012: Peperitas en Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 47. p 55-68.

SPRECHMANN, P., ASTORGA, A., CALVO, C. & FERNÁNDEZ, A., 1994: Stratigraphic chart of the sedimentary basins of Costa Rica, Central America. – Profil 7: 427-433.

TOURNON, J., 1970: Intrusiones Básicas de Boruca. – 7 págs. Dirección de Geología, Minas y Petróleo. Ministerio de Economía Industrial y Comercio [Informe Inédito].

TOURNON, J., 1984: Magmatismes du Mesozoique a l' Actuel en Amerique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des Ophiolites aux Andesites.- 335 págs. Univ. Curie, París [Tesis doctoral].

TOURNON, J. & ALVARADO, G., 1997: Mapa geológico de Costa Rica. Ed. Tecnológica de Costa Rica. - 79 págs.

TOURNON, J. & BELLON, H., 2009: The southern Central America puzzle: Chronology and structure. A review.- Rev. Geol. Amér. Central, 40: 11-47.

VARGAS, A., 2003: Análisis de los acuíferos costeros de la zona Parrita, Quepos y Dominical. - 133 págs. SENARA. San José, Costa Rica.

## ANEXOS

Anexo 1: Información de los pozos registrados.

Anexo 2: Descripción detallada de las perforaciones exploratorias.

Anexo 3: Información de los resultados de sondeos eléctricos verticales.

Anexo 4: Registro de afloramientos del Pacífico Central.

Anexo 5: Resultados de los estudios de suelos.

Anexo 6: Redes de monitoreo.

Anexo 7: Valores asignados a los parámetros GOD.

Anexo 8: Información meteorológica.

Anexo 9: Cuadro resumen características de los acuíferos.