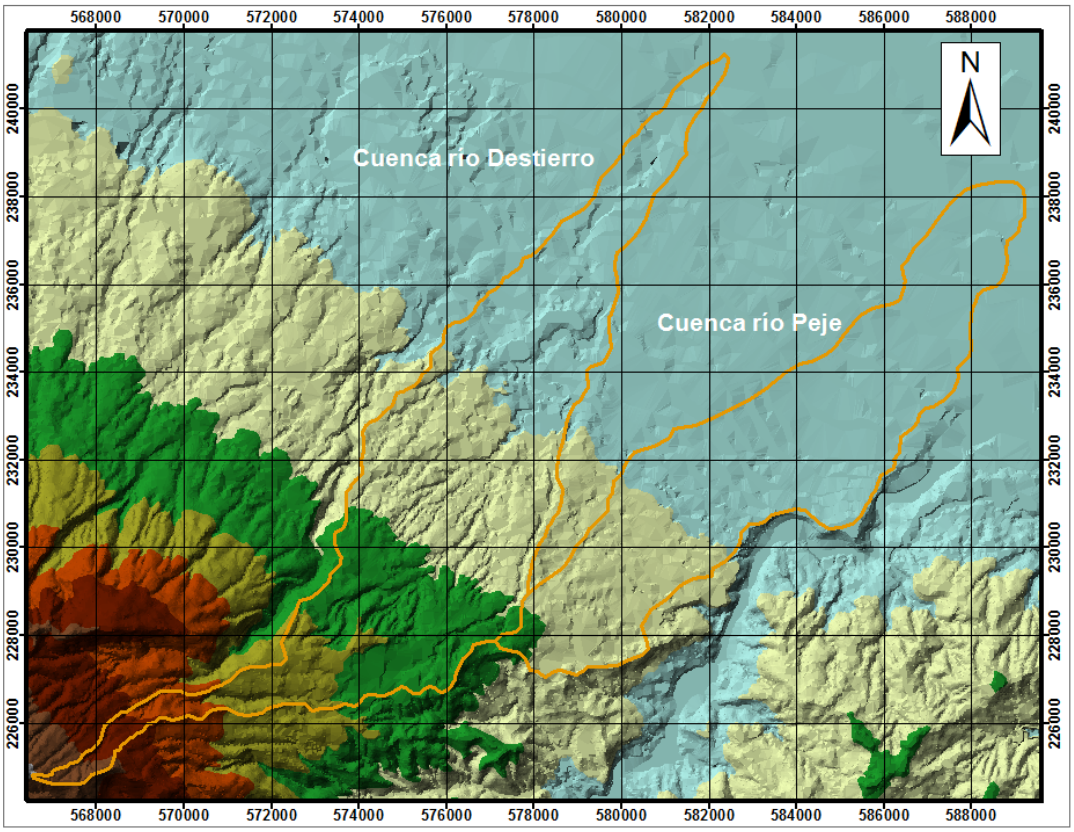
INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA LA CARACTERIZACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA DE LAS FUENTES MILANO Y EL CAIRO



Licitación abreviada No. 2008 LA 000039 – PRI

Federico Arellano
Arturo Rodríguez
Héctor Zúñiga
Mauricio Vásquez
Pablo Ramírez
Vanesa Paredes
Jorge Suárez

HIDROGEOTECNIA Ltda.

Junio 2009

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN 7

1.1 OBJETIVOS 8
1.2 JUSTIFICACIÓN 9
1.2.1 Contaminación de las fuentes de Milano y El Cairo 11
1.2.2 Aspectos generales sobre el Bromacil 14

2 METODOLOGÍA DE TRABAJO 15

3 GEOLOGÍA 16

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL 16
3.1.1 Cordillera Volcánica Central 17
3.1.2 Complejo volcánico Turrialba – Dos Novillos 17
3.1.3 Vulcanismo Terciario 18
3.1.4 Formaciones sedimentarias del Terciario 18
3.1.5 Unidades intrusivas del Mioceno – Plioceno 19
3.1.6 Unidad de lahares del Pleistoceno - Cuaternario 19
3.1.7 Unidades volcánicas Cuaternarias 19
3.1.8 Unidades aluviales recientes 20
3.2 GEOLOGÍA LOCAL 20
3.2.1 Geología de la cuenca del río Destierro 22
3.2.2 Geología de la cuenca del río Peje 32
3.3 CONDICIONES ESTRUCTURALES DE LA ZONA DE ESTUDIO 37

4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA. 37

4.1 EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN LA CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 37
4.2 EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN LA CUENCA DEL RÍO PEJE 39
4.3 PERFILES GEOELÉCTRICOS. 41

5 HIDROLOGÍA 44

5.1 METEOROLOGÍA 45
5.1.1 Precipitación 45
5.1.2 Temperatura 48
5.1.3 Brillo Solar y radiación solar 49
5.2 BALANCE HÍDRICO DE SUELOS 50
5.2.1 Uso actual del suelo 50
5.2.2 Recarga 52
5.2.3 Infiltración 53
5.2.4 Análisis de suelos 55
5.2.5 Aforos en ríos, quebradas y canales 55
5.2.6 Evapotranspiración 63
5.2.7 Balance hídrico de suelos 66

6 HIDROGEOLOGÍA 72

6.1 HIDROGEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO 72
6.1.1 Cuenca Río Destierro 72

6.1.2 Cuenca Río Peje 73
6.1.3 Acuífero aluvial 73
6.2 CARACTERÍSTICAS Y PRODUCCIÓN DE LOS POZOS 73
6.3 MEDICIONES DEL NIVEL DE AGUA EN LOS POZOS 78
6.4 LÍNEAS ISOFREÁTICAS Y DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO 78
6.5 PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL ACUÍFERO 80
6.5.1 Transmisividad. 80
6.6 BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO SUPERFICIAL 82
6.6.1 Extracciones del acuífero 83
6.6.2 Aportes al acuífero 86
6.7 MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO 90
6.8 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN. 90

7 HIDROGEOQUÍMICA 101

7.1 MECANISMOS QUE AFECTAN LA MOVILIDAD 101
7.1.1 Zona no saturada 101
7.1.2 Zona saturada 102
7.2 MECANISMOS DE TRANSFORMACIÓN, REDUCCIÓN DE MASA O DE RETARDACIÓN. 103
7.2.1 Biodegradación 103
7.2.2 Volatilidad 104
7.2.3 Coeficiente de partición de carbono orgánico K_{oc} 104
7.2.4 Coeficiente de distribución (K_d) 104
7.2.5 Fracción orgánica sólida en el suelo f_{oc} 105
7.2.6 Factor de retardo (R) 106
7.2.7 Densidad 107
7.2.8 Coeficiente de partición octanol/agua K_{ow} 107
7.2.9 Resumen de Propiedades del Bromacil (INE, 2009): 107
7.3 ÁREA DE CAPTURA DE LAS NACIENTES 109
7.4 TIEMPO/DISTANCIA DE TRÁNSITO 111
7.4.1 En zona no saturada: 111
7.4.2 En el acuífero: 112
7.4.3 Ante la existencia de canales 113
7.5 USO DIVERGENTE DEL SUELO 118
7.6 USO PERMITIDO DEL SUELO 121

8 CONCLUSIONES 124

9 RECOMENDACIONES 126

9.1 USOS PERMITIDOS Y NO PERMITIDOS DEL SUELO 126
9.2 PUNTOS DE MONITOREO 127
9.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO 129
9.4 OTRAS RECOMENDACIONES 129

10 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS 129

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL MAPA DE COSTA RICA 7

FIGURA 1.2: CUENCA DEL RÍO PEJE Y CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 8
FIGURA 1.3: COSTA RICA: IMPORTACIÓN DE PLAGUICIDAS DE 1977 – 2002. FUENTE: BASE DATOS IRET – UNA, 2003. 10
FIGURA 1.4: GRÁFICO CONCENTRACIÓN DE BROMACIL VS. TIEMPO PARA LA FUENTE EL CAIRO 2005 – 2008. FUENTE: AYA, LABORATORIO NACIONAL DE AGUAS, MORA, D, 2008 12
FIGURA 1.5: GRÁFICO CONCENTRACIÓN DE BROMACIL VS. TIEMPO PARA LA FUENTE LUISIANA 2007 – 2008. FUENTE: AYA, LABORATORIO NACIONAL DE AGUAS, MORA, D, 2008 13
FIGURA 1.6: GRÁFICO CONCENTRACIÓN DE BROMACIL VS. TIEMPO PARA LA FUENTE MILANO 2005 – 2008. FUENTE: AYA, LABORATORIO NACIONAL DE AGUAS, MORA, D, 2008 13
FIGURA 3.1: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL DE LA CUENCA SEDIMENTARIA LIMÓN SUR. TOMADO DE CAMPOS, 1987. 20
FIGURA 3.2: MAPA GEOLÓGICO REGIONAL. TOMADO DEL MAPA GEOLÓGICO DE COSTA RICA, 1:200 000, PARTE DE LAS HOJAS LIMÓN Y SAN JOSÉ. 21
FIGURA 3.3: ESTRUCTURA TÍPICA DE UNA COLADA DE LAVA BLOCOSA. TOMADO DE SALAZAR (1996). 22
FIGURA 3.4: MAPA GEOLÓGICO LOCAL DEL ÁREA DE ESTUDIO. 23
FIGURA 4.1: UBICACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES Y UBICACIÓN DE LOS PERFILES 38
FIGURA 4.2: PERFIL GEOELÉCTRICO LONGITUDINAL C1 – C2. CUENCA DEL RÍO PEJE. 42
FIGURA 4.3: PERFIL GEOELÉCTRICO TRANSVERSAL C3 – C4. CUENCA DEL RÍO PEJE. 42
FIGURA 4.4: PERFIL GEOELÉCTRICO LONGITUDINAL M1 – M2. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO. 43
FIGURA 4.5: PERFIL GEOELÉCTRICO TRANSVERSAL M3 – M4. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO. 44
FIGURA 5.1: PRECIPITACIÓN MENSUAL ESTACIÓN EL CARMEN (AÑOS 1972 A 2007) 45
FIGURA 5.2: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EARTH, EL CARMEN Y EL CAIRO. .. 46
FIGURA 5.3: PRECIPITACIÓN MENSUAL ESTACIÓN EL CAIRO (AÑOS 1938 A 1968) 47
FIGURA 5.4: PRECIPITACIÓN MENSUAL ESTACIÓN EARTH (AÑOS 1996 A 2008) 47
FIGURA 5.5: PRECIPITACIÓN MENSUAL ESTACIÓN EL CARMEN Y EL CAIRO 47
FIGURA 5.6: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL ESTACIÓN EL CARMEN (AÑOS 1972 A 2007) 48
FIGURA 5.7: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL ESTACIÓN EARTH (AÑOS 1996 A 2008) 49
FIGURA 5.8: RADIACIÓN SOLAR Y BRILLO SOLAR PROMEDIO MENSUAL ESTACIÓN HACIENDA EL CARMEN 50
FIGURA 5.9: MAPA DE USO DEL SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO 52
FIGURA 5.10: UBICACIÓN DE LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN EN AMBAS CUENCAS Y TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE SUELOS 53
FIGURA 5.11: UBICACIÓN DE SITIOS DE AFORO DE RÍOS, QUEBRADAS Y CANALES 59
FIGURA 5.12: TRAMOS EFLUENTES E INFLUENTES DE RÍOS Y QUEBRADAS EN LAS CUENCAS DEL RÍO DESTIERRO Y RÍO PEJE. 62
FIGURA 5.13: UBICACIÓN DE LOS AFOROS EN LOS CANALES DE LAS PLANTACIONES PIÑERAS. 63
FIGURA 5.14: MAPA DE PENDIENTES EN LAS CUENCAS RÍO DESTIERRO Y RÍO PEJE 67
FIGURA 5.15: SUPERPOSICIÓN DE MAPAS DE USO DE SUELO, UBICACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO Y PRUEBAS DE INFILTRACIÓN. 68
FIGURA 5.16: ZONAS DE RECARGA EN LA ZONA ALUVIONAL DE LAS CUENCAS R. DESTIERRO Y R. PEJE. 72
FIGURA 6.1: UBICACIÓN DE LOS POZOS EN LOS ALREDEDORES DEL ÁREA DE ESTUDIO, SEGÚN LA BASE DE DATOS DEL SENARA. 74
FIGURA 6.2: LÍNEAS ISOFREÁTICAS EN LAS CUENCAS RÍO DESTIERRO Y RÍO PEJE. 79
FIGURA 6.3: GRÁFICO ABATIMIENTO VS. TIEMPO. PRUEBA DE RECUPERACIÓN POZO BO – 18. 81
FIGURA 6.4: MAPA DE ISOTRANSMISIVIDADES EN LAS CUENCAS DEL R. DESTIERRO Y R. PEJE. 83
FIGURA 6.5: PERFIL HIDROGEOLÓGICO LONGITUDINAL C1 – C2. CUENCA DEL RÍO PEJE. 91

FIGURA 6.6: PERFIL HIDROGEOLÓGICO TRANSVERSAL C3 – C4. CUENCA DEL RÍO PEJE. 92
FIGURA 6.7: PERFIL HIDROGEOLÓGICO LONGITUDINAL M1 – M2. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO. 93
FIGURA 6.8: PERFIL HIDROGEOLÓGICO TRANSVERSAL M3 – M4. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO. 94
FIGURA 6.9: ESQUEMA DEL SISTEMA GOD. TOMADO DE FOSTER ET. AL (2003). 96
FIGURA 6.10: ÍNDICE GOD SEGÚN EL GRADO DE CONFINAMIENTO DEL ACUÍFERO. 97
FIGURA 6.11: ÍNDICE GOD SEGÚN EL TIPO DE MATERIAL SOBREYACIENTE. 98
FIGURA 6.12: ÍNDICE GOD SEGÚN EL ESPESOR DE LA ZONA NO SATURADA. 99
FIGURA 6.13: VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO A LA CONTAMINACIÓN SEGÚN EL SISTEMA GOD. 100
FIGURA 7.1: EFECTO DEL VALOR DE KD EN LA MOVILIDAD DE UN CONTAMINANTE..... 106
FIGURA 7.2: ESQUEMA DE ZONAS DE CAPTURA PARA MANANTIALES Y POZOS. 110
FIGURA 7.3: ZONA DE CAPTURA Y PROTECCIÓN DE LAS NACIENTES DE MILANO..... 114
FIGURA 7.4: ZONA DE CAPTURA Y PROTECCIÓN DE LAS NACIENTES DE EL CAIRO. 114
FIGURA 7.5: ZONA DE CAPTURA Y PROTECCIÓN DEL POZO GM – 88. 115
FIGURA 7.6: ZONA DE CAPTURA Y PROTECCIÓN DEL POZO BO – 24. 115
FIGURA 7.7: ZONA DE PROTECCIÓN Y CAPTURA DE LAS NACIENTES MILANO 116
FIGURA 7.8: ZONA DE PROTECCIÓN Y CAPTURA DE LAS NACIENTES EL CAIRO Y LUISIANA 117
FIGURA 7.9: ZONAS DE PROTECCIÓN Y CAPTURA DE LOS POZOS BO-24 Y GM-88 117
FIGURA 7.10: ÁREAS DE CAPTURA DE CADA UNA DE LAS FUENTES 118
FIGURA 7.11: MAPA DE USOS CONFLICTIVOS DEL SUELO. 120
FIGURA 7.12: MAPA DE USO DE SUELO SEGÚN MATRIZ SENARA 123
FIGURA 7.13: MAPA DE USO DE SUELO RECOMENDADO 124

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1.1: NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE PLAGUICIDAS INDICADOS EN LAS FUENTES DEL ACUEDUCTO DE MILANO DE SIQUIRRES. 12
CUADRO 1.2: NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE PLAGUICIDAS INDICADOS EN LAS FUENTES DEL ACUEDUCTO DE EL CAIRO DE SIQUIRRES 12
CUADRO 1.3: CONCENTRACIONES DE BROMACIL ENCONTRADAS EN MUESTRAS DE AGUA TOMADAS EN DOS ACUEDUCTOS RURALES CERCA DE SIQUIRRES (µG/L). 14
CUADRO 5.1: LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS 45
CUADRO 5.2: BRILLO SOLAR ESTACIÓN HACIENDA EL CARMEN - SIQUIRRES* 49
CUADRO 5.3: USO ACTUAL DEL SUELO EN EL ÁREA DE ESTUDIO (ZONA ALUVIONAL) 52
CUADRO 5.4: COEFICIENTES DE INFILTRACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO DESTIERRO. 54
CUADRO 5.5: COEFICIENTES DE INFILTRACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO PEJE. 54
CUADRO 5.6: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SUELOS. 56
CUADRO 5.7: AFOROS DIFERENCIALES DESTIERRO* 59
CUADRO 5.8: AFOROS DIFERENCIALES RÍO PERLA* 60
CUADRO 5.9: AFOROS DIFERENCIALES QUEBRADA HONDA* 60
CUADRO 5.10: AFOROS DIFERENCIALES RÍO PEJE* 60
CUADRO 5.11: AFOROS DIFERENCIALES QUEBRADA MURALLA* 60
CUADRO 5.12: AFOROS DIFERENCIALES QUEBRADA EL CAIRO* 60
CUADRO 5.13: AFOROS DIFERENCIALES QUEBRADA ONCE* 61
CUADRO 5.14: AFOROS DIFERENCIALES RÍO HEREDIANA* 61
CUADRO 5.15: AFOROS DIFERENCIALES CANAL NO.1. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 61
CUADRO 5.16: AFOROS DIFERENCIALES CANAL NO.2. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 61
CUADRO 5.17: AFOROS DIFERENCIALES CANAL NO.3. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 62
CUADRO 5.18: AFOROS DIFERENCIALES CANAL NO.4. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 62

CUADRO 5.19: AFOROS DIFERENCIALES CANAL NO.5. CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 62
CUADRO 5.20: FACTORES DE CORRECCIÓN "A" Y "B" PARA BLANEY - CRIDDE (MODIFICADO). 64
CUADRO 5.21: PORCENTAJE DIARIO MEDIO (P) DE HORAS DIURNAS ANUALES A DIFERENTES LATITUDES EN EL HEMISFERIO NORTE. 64
CUADRO 5.22: CANTIDADES MÁXIMAS DIARIAS MEDIAS DE HORAS DE FUERTE INSOLACIÓN "N" EN EL HEMISFERIO NORTE 65
CUADRO 5.23: CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MÍNIMA, MÁXIMA Y MEDIA PARA LA CUENCA DEL RÍO DESTIERRO. 66
CUADRO 5.24: CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MÍNIMA, MÁXIMA Y MEDIA PARA LA CUENCA DEL RÍO PEJE 66
CUADRO 5.25: COMPONENTES DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN (SCHOSINSKY & LOSILLA, 2000) 69
CUADRO 5.26: BALANCE HÍDRICO DE SUELOS CUENCA RÍO DESTIERRO PARA TEMPERATURA MÁXIMA 69
CUADRO 5.27: BALANCE HÍDRICO DE SUELOS CUENCA RÍO PEJE PARA TEMPERATURA MÁXIMA 70
CUADRO 5.28: BALANCE HÍDRICO DE SUELOS CUENCA RÍO DESTIERRO PARA TEMPERATURA MÍNIMA 70
CUADRO 5.29: BALANCE HÍDRICO DE SUELOS CUENCA RÍO PEJE PARA TEMPERATURA MÍNIMA 70
CUADRO 5.30: BALANCE HÍDRICO DE SUELOS CUENCA RÍO DESTIERRO PARA TEMPERATURA PROMEDIO 70
CUADRO 5.31: BALANCE HÍDRICO DE SUELOS CUENCA RÍO PEJE PARA TEMPERATURA PROMEDIO ... 71
CUADRO 5.32: RESUMEN DE RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO DE SUELOS EN EL ACUÍFERO DEL RÍO DESTIERRO PARA LA CONDICIÓN DE TEMPERATURA PROMEDIO. 71
CUADRO 5.33: RESUMEN DE RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO DE SUELOS EN EL ACUÍFERO DEL RÍO PEJE PARA LA CONDICIÓN DE TEMPERATURA PROMEDIO. 71
CUADRO 6.1: INVENTARIO DE POZOS. 75
CUADRO 6.2: CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NIVEL ESTÁTICO EL 15 DE ENERO DEL 2009 78
CUADRO 6.3: VALORES DE TRANSMISIVIDAD DE LOS POZOS EN LA ZONA DE ESTUDIO 81
CUADRO 6.4: POZOS EMPLAZADOS EN LA CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 84
CUADRO 6.5: AFORO FUENTES DE MILANO* 84
CUADRO 6.6: DESCARGA DEL ACUÍFERO EN LOS TRAMOS EFLUENTES DE RÍOS, QUEBRADAS Y CANALES EN LA CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 85
CUADRO 6.7: POZOS EMPLAZADOS EN LA CUENCA DEL RÍO PEJE. 85
CUADRO 6.8: AFORO FUENTES DE EL CAIRO Y LUISIANA* 85
CUADRO 6.9: CAUDALES APORTADOS POR EL ACUÍFERO EN LOS TRAMOS EFLUENTES DE RÍOS, QUEBRADAS Y CANALES EN LA CUENCA DEL RÍO PEJE 86
CUADRO 6.10: APORTE AL ACUÍFERO POR INFILTRACIÓN DE LLUVIA EN LA CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 87
CUADRO 6.11: RECARGA AL ACUÍFERO EN LOS TRAMOS INFLUENTES DE RÍOS, QUEBRADAS Y CANALES EN LA CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 87
CUADRO 6.12: APORTE AL ACUÍFERO POR INFILTRACIÓN DE LLUVIA EN LA CUENCA DEL RÍO PEJE 88
CUADRO 6.13: RECARGA AL ACUÍFERO EN LOS TRAMOS INFLUENTES DE RÍOS, QUEBRADAS Y CANALES EN LA CUENCA DEL RÍO PEJE 89
CUADRO 6.14: BALANCE HÍDRICO ANUAL EN EL ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO DESTIERRO 89
CUADRO 6.15: BALANCE HÍDRICO ANUAL EN EL ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO PEJE 89
CUADRO 9.1: PUNTOS DE MONITOREO 128

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 3.1: VISTAS DEL AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD DE LAVAS ALTO BOTELLA EN LA ZONA DE ESTUDIO A LA ALTURA DEL PUENTE DEL RÍO DESTIERRO EN LAS COORDENADAS 232.878 N Y 578.667 E. 24
FOTOGRAFÍA 3.2: BLOQUES DE LO QUE CONSTITUYE LA SECCIÓN BRECHOSA DE LA COLADA ALTO BOTELLA A LA ALTURA DE SAN BOSCO (COORDENADAS 232.719 N Y 578.488 E) 24
FOTOGRAFÍA 3.3: VISTA DEL AFLORAMIENTO DE LO QUE SERÍA EL NÚCLEO DENSO DE LA COLADA DOS NOVILLOS 2 EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO DESTIERRO JUSTO EN LA CONFLUENCIA CON EL RÍO PERLA (234.742 N Y 579.103 E). 26
FOTOGRAFÍA 3.4: AFLORAMIENTO DE LA BRECHA DE LA COLADA DOS NOVILLOS 2 EN LA MARGEN DERECHA DE LA QUEBRADA HONDA EN LAS COORDENADAS 235.990 N Y 577.601 E. 27
FOTOGRAFÍA 3.5: VISTA DEL AFLORAMIENTO DE BRECHA DE COLADA SUPERIOR EN LA COLADA DOS NOVILLOS 2. 27
FOTOGRAFÍA 3.6: VISTA PANORÁMICA DE LOS TERRENOS SOBRE LA COLADA DE LAVA DOS NOVILLOS 2, NÓTESE LAS FORMAS ONDULADAS Y LOS CONTORNOS SUAVES. 28
FOTOGRAFÍA 3.7: CONTACTO DISCORDANTE ENTRE LA UNIDAD DE BRECHAS DE LAVAS DEL TERCIARIO Y LOS DEPÓSITOS ALUVIALES RECIENTES EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO DESTIERRO JUNTO AL PUENTE DEL FERROCARRIL EN LAS COORDENADAS 238.423 N Y 580.156 E. 28
FOTOGRAFÍA 3.8: AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD DE ALUVIONES ANTIGUOS EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO PERLA EN LAS COORDENADAS 233.188 N Y 578.049 E. 30
FOTOGRAFÍA 3.9: AFLORAMIENTO DE ALUVIONES ANTIGUOS EN LAS COORDENADAS 235.904 N Y 579.301 E. 30
FOTOGRAFÍA 3.10: CORTE EN LA UNIDAD DE ALUVIONES RECIENTES AL NORTE DE CODELA, AL LADO DE LA LÍNEA FÉRREA. 31
FOTOGRAFÍA 3.11: VISTA DE LA ZONA DE TERRAZA ALUVIAL QUE AHORA SE UBICA LEVANTADA CON RESPECTO AL CAUCE DEL RÍO DESTIERRO, SE UBICA CERCA DE LAS COORDENADAS 236.701 N Y 578.935 E. 32
FOTOGRAFÍA 3.12: TERRAZA MÁS ALTA DEL RÍO DESTIERRO EN LAS ZONA CIRCUNDANTE A LAS TOMAS DE MILANO. 32
FOTOGRAFÍA 3.13: TERRENOS RECIÉN TRABAJADOS DONDE SE REMOVIÓ LA CAPA DE SUELO VEGETAL. 33
FOTOGRAFÍA 3.14: VISTA PANORÁMICA DE LOS TERRENOS PLANOS CONFORMADOS POR LA UNIDAD DE DEPÓSITOS ALUVIALES RECIENTES. 33
FOTOGRAFÍA 3.15: AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD DE LAHARES EN LAS COORDENADAS 230.773 N Y 581.777 E. 34
FOTOGRAFÍA 3.16: VISTA DE UN AFLORAMIENTO DE ALUVIONES EN LAS COORDENADAS 230.760 N Y 581.675 E. 35
FOTOGRAFÍA 3.17: AFLORAMIENTO DE SECUENCIAS DE ALUVIONES EN LAS COORDENADAS 232.406 N Y 583.686 E. 35
FOTOGRAFÍA 3.18: VISTA DE UN EJEMPLO DE CONTACTO ENTRE DIFERENTES EVENTOS DE DEPÓSITOS DE ALUVIONES EN LAS COORDENADAS 230.984 N Y 582.176 E. 36
FOTOGRAFÍA 3.19: VISTA DE AFLORAMIENTOS EN SUPERFICIE DE ALUVIONES RECIENTES EN LOS ALREDEDORES DE LAS NACIENTES DE EL CAIRO, EN LAS COORDENADAS 233.810 N Y 585.810 E. 36
FOTOGRAFÍA 3.20: VISTA DE LOS DRENAJES AGRÍCOLAS Y LOS AFLORAMIENTOS DE ALUVIONES MEDIOS QUE CONFORMAN LA SUPERFICIE DEL TERRENO DONDE SE CULTIVA LA PIÑA EN LA FINCA OJO DE AGUA. 36

1 INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de caracterizar y delimitar las zonas de recarga de las fuentes de Milano y el Cairo, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) adjudica la licitación abreviada No. 2008 LA 000039 – PRI a la empresa HIDROGEOTECNIA LTDA., con el fin de realizar el respectivo estudio hidrogeológico para lograr este objetivo.

El área de estudio está definida por dos cuencas: Cuenca del Río Peje y Cuenca del Río Destierro. La zona de estudio se ubica en la vertiente del Caribe, específicamente en el cantón de Siquirres de la provincia de Limón. En la Figura 1.1 se aprecia la ubicación de estas cuencas en el mapa de Costa Rica.

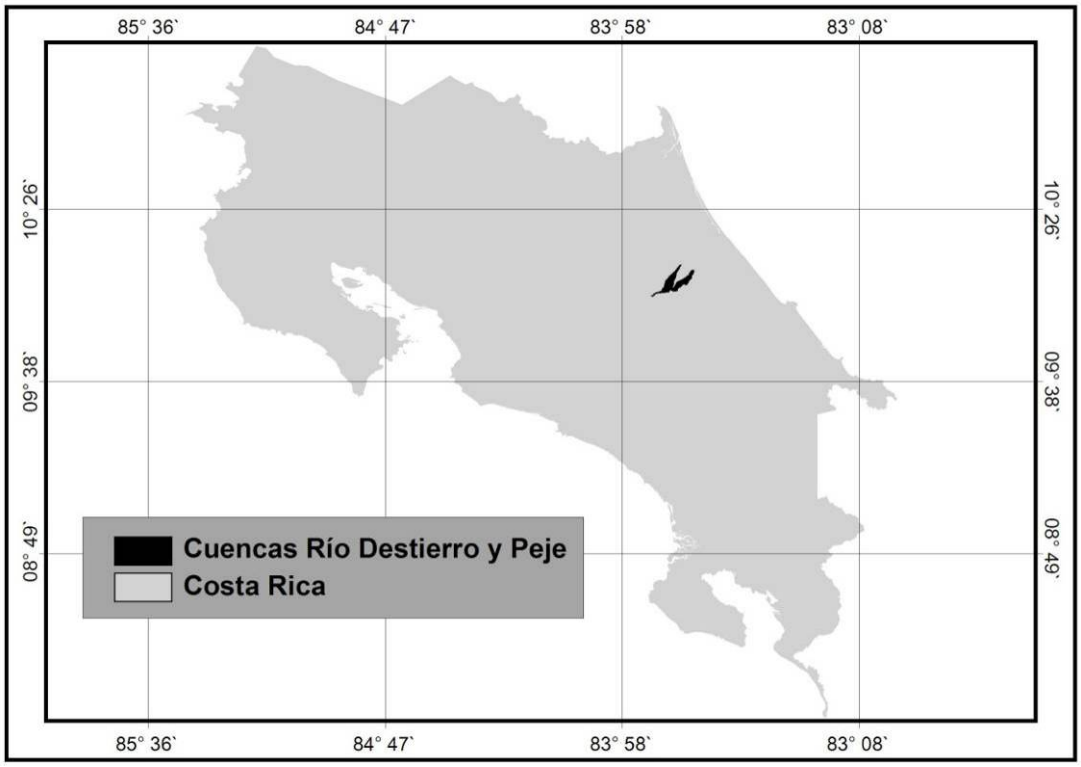


Figura 1.1: Ubicación de la zona de estudio en el mapa de Costa Rica

En la cuenca del Río Peje se ubican los manantiales del Cairo y los manantiales de Luisiana; el área de la cuenca hidrográfica se delimita por la divisoria de las cuencas; arriba de la confluencia río Peje con la Quebrada Mr. Wilson; y arriba de la confluencia de la Quebrada Muralla con el río Cairo (ver Figura 1.2).

En la cuenca del Río Destierro se ubican los manantiales de Milano; el área de estudio para esta cuenca hidrográfica se delimita a partir del punto sobre el Río Destierro que se interseca con la coordenada 582.350 long. Oeste y 241.300 lat. Norte. (Ver Figura 1.2)

La cuenca del río Peje comprende un área total de 39,05 km^2 y a partir de la cota 300 m.s.n.m. el área es de 25,71 Km^2. La cuenca del río Destierro tiene un área total de 51,92 Km^2 y a partir de la cota 300 m.s.n.m. el área es de 13,99 Km^2. El área de estudio se ubica entre las coordenadas generales 569,000 – 590,000 Este y 225,000 – 240,000 Norte de las hojas cartográficas Guácimo y Bonilla escala 1:50 000 del IGN. En la Figura 1.2 se muestran ambas cuencas.

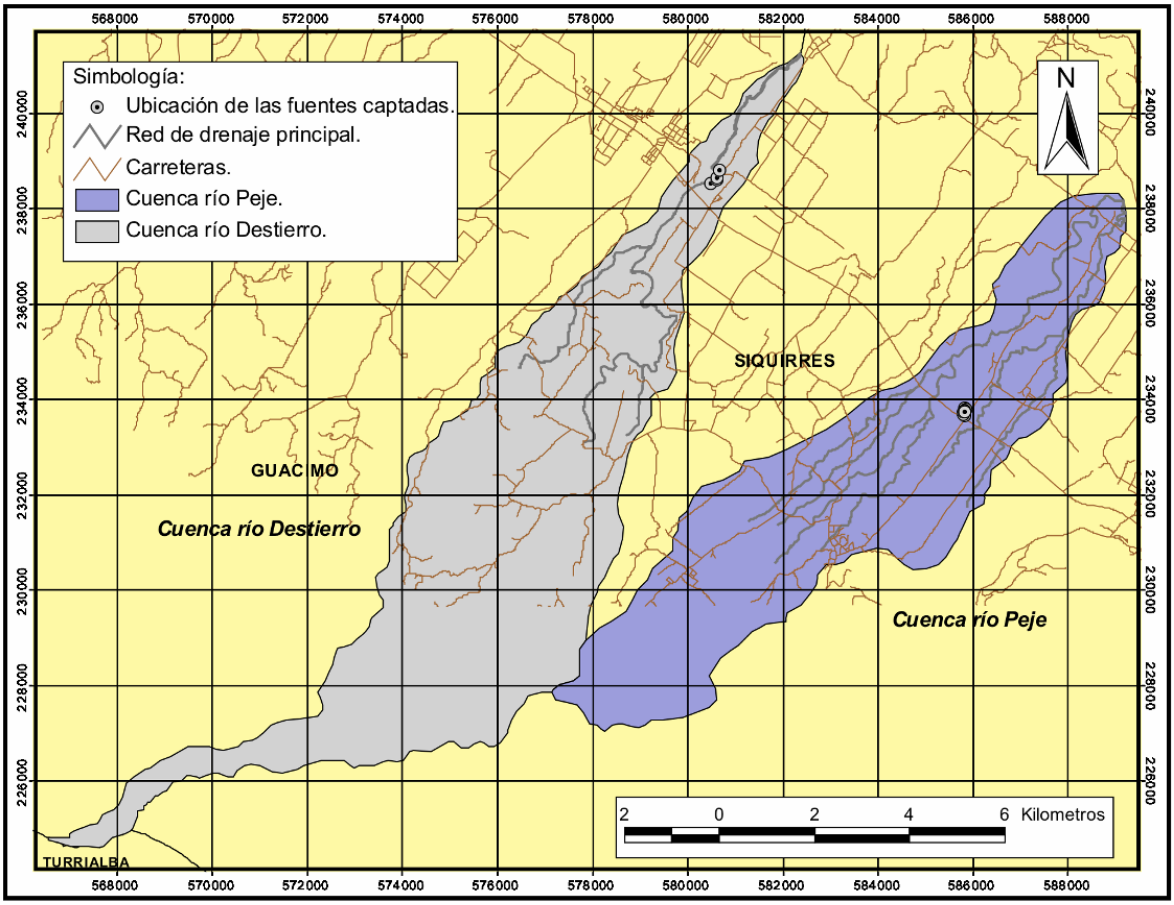


Figura 1.2: Cuenca del Río Peje y Cuenca del Río Destierro

1.1 Objetivos

Los objetivos de esta contratación son:

1) Definir los límites de la zona de aporte de las aguas o zonas de recarga, de las aguas de las fuentes y pozos para abastecimiento público administrados por AyA o por ASADAS.

2) Definir las zonas de protección valorando criterios biológicos y químicos para todas las fuentes y pozos para consumo humano, en uso o potencialmente utilizables por ASADAS o por AyA.

Para los anteriores dos objetivos rige el área de estudio delimitada en las cuencas indicadas; comprendido en los territorios ubicados entre el límite inferior de las cuencas y la cota 300 m.s.n.m.

3) El listado de actividades y usos de la tierra que puedan ser admitidas y no admitidas dentro de los límites de las áreas de aporte o de recarga de cada manantial.

1.2 Justificación

Costa Rica ha sido un país principalmente agrícola y por esa razón ha sido necesaria la utilización de agroquímicos para lograr cosechas productivas. El uso de plaguicidas se ha convertido en una práctica común en la mayoría de agricultores para el control de plagas. Los plaguicidas son sustancias tóxicas diseñadas para eliminar organismos vivos considerados plagas. Estas sustancias pueden también afectar de manera directa e indirecta al ser humano, a los animales domésticos y a los ecosistemas (de la Cruz et al., 2004). En Costa Rica se han utilizado para el control de plagas en la agricultura por más de medio siglo y, desde los primeros registros de importación en los años setenta el uso de éstas ha ido en aumento (de la Cruz et al., 2004). La primera sustancia química utilizada en el país para el control de plagas fue introducida en 1916. Estaba hecha de resinas naturales de árboles polimerizadas con aceite de castor e impermeabilizadas con ceras vegetales, y tenía un modo de acción mecánico (Hilje et al., 1989). La Figura 1.3 muestra el aumento en el uso de los plaguicidas en Costa Rica con el tiempo.

Costa Rica ha sido señalada entre los países con más alto uso de plaguicidas de la región y del mundo (Arbeláez y Henao, 2002; Castillo, 1997; de los Santos Sans – Bustillo et al., 1997; Galvao, et al., 2002; García, 1997). Muchos de los plaguicidas utilizados en Costa Rica son tóxicos a corto y a largo plazo, e incluyen compuestos prohibidos y severamente restringidos en otros países (García, 1997; Nieto y Henao, 2001; Wesseling et al., 2003).

Se puede observar en la gráfica que el país prácticamente triplicó el volumen de importación de plaguicidas entre los años 1977 al 2002.

En Costa Rica varios decretos restringen o prohíben el uso de algunos plaguicidas. Los primeros en prohibirse por su alta toxicidad y sus efectos nocivos en la salud y el ambiente fueron el formicida cianogás y los funguicidas de compuestos mercuriales (Castro, 1998; García, 1997; http://www.protecnet.go.cr).

Como ejemplo se menciona el Reglamento sobre Registro, Uso y Control de Plaguicidas Sintéticos Formulados, Ingrediente Activo Grado Técnico, Coadyuvantes y Sustancias Afines de Uso Agrícola. Decreto Nº 33495-MAG-S-MINAE-MEIC. Gaceta No. 7 del 10 de enero del 2007.

En materia de prohibiciones y restricciones de plaguicidas aún queda mucho por hacer en el país, entre otras razones porque se usan productos (p.e. paraquat, endosulfán, etc.) prohibidos en otros países (Nieto y Henao, 2001) y algunos de uso frecuente e intensivo son altamente tóxicos, con posibilidad de contaminar aguas superficiales y subterráneas (IRET-UNA, 1999; Nieto y Henao, 2001) y, por lo general, protagonistas de accidentes ambientales e intoxicaciones humanas (de la Cruz et al., 2004).

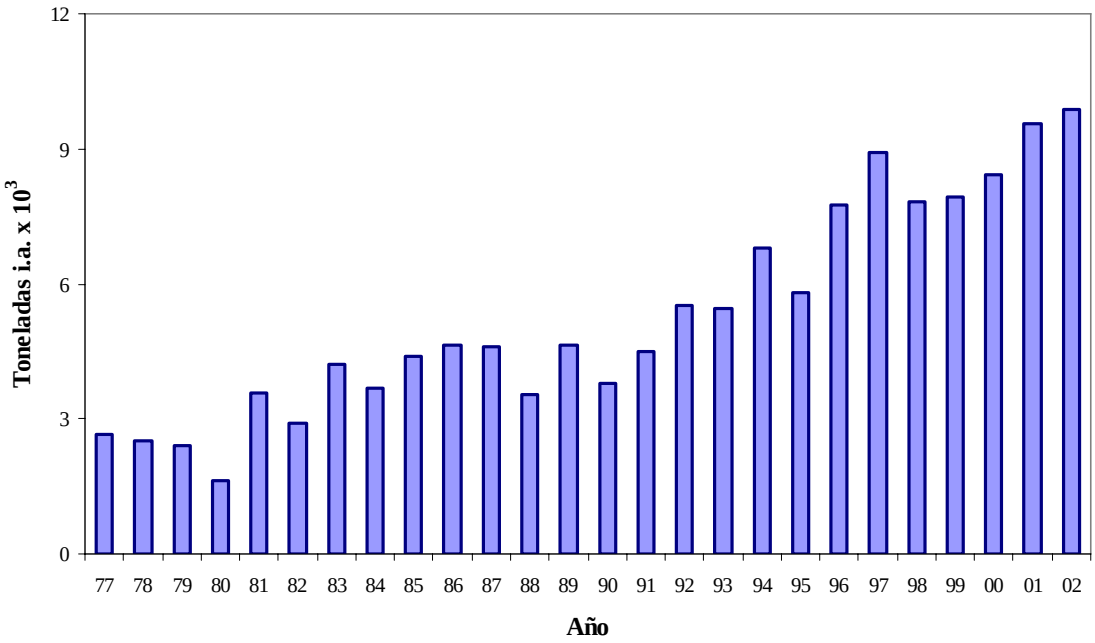


Figura 1.3: Costa Rica: Importación de plaguicidas de 1977 – 2002. Fuente: Base datos IRET – UNA, 2003.

En Costa Rica se cultiva más de un millón y medio de hectáreas por año, siendo los principales cultivos: el banano, el café, los granos básicos, los vegetales, las frutas (naranja, piña, melón, mango), las plantas ornamentales, los tubérculos, la caña de azúcar y los pastos (CORFOGA, 2000; SEPSA, 1977, 1982, 1984, 1989, 2000, 2001, 2002 y 2003).

El crecimiento en la cantidad de área de cultivo ha sido proporcional al crecimiento en las importaciones de agroquímicos, esto aunado a las prácticas de aplicación de los agroquímicos ha llevado en múltiples ocasiones a la contaminación de fuentes de agua tanto superficiales como subterráneas. En el décimo informe del Estado de la Nación se indica que se han encontrado residuos de plaguicidas en un 10% de las muestras tomadas de pozos en la zona atlántica (Ruepert, 2004). En el duodécimo informe del Estado de la Nación se indica entre otras cosas que en el caso de la piña, organizaciones de la sociedad civil y entidades gubernamentales han planteado preocupaciones crecientes sobre los impactos ambientales de las prácticas utilizadas en esta actividad, tales como el cultivo en pendientes fuertes, la preparación mecanizada del terreno para la siembra, el uso de bombas rociadoras para la aplicación de agroquímicos, que puede ocasionar filtración de esas sustancias en las aguas.

La heterogeneidad química de los plaguicidas influye en que su toxicidad difiera ampliamente y, por lo tanto, los efectos adversos en la salud también son muy variados. Estos efectos pueden ser sistémicos (órganos internos) o tópicos (piel, uñas u ojos) y pueden manifestarse en forma aguda, crónica, o manifestarse en forma tardía, incluso muchos años después (de la Cruz et al., 2004).

1.2.1 Contaminación de las fuentes de Milano y El Cairo

Desde que se iniciaron las plantaciones de piña en la zona atlántica alrededor del año 1995 (Comunicación personal del Ing. Moisés Bermúdez), el AyA alertó sobre la posible contaminación de las fuentes que abastecen a Milano y El Cairo por las cercanías de las plantaciones a éstas, e inclusive se generó un reporte en el año 1996 en el cual el Ing. Moisés Bermúdez emitió una serie de recomendaciones sobre el uso del suelo.

El AyA tomó una serie de acciones motivadas por el informe ejecutivo *"Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica"* por Clemens Ruepert y colaboradores del Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) de la Escuela de Ciencias Ambientales (EDECA) de la Universidad Nacional (UNA), en el que se indica la presencia a nivel traza del herbicida Bromacil, producto químico que se utiliza en la protección de las áreas de siembra de la piña (Sequeira, 2007). Este informe es del año 2005, y provoca que a partir del cual se inicie una serie de trabajos de inspección y de monitoreo de las fuentes. Dado que los resultados confirman la presencia de Bromacil, Diurón y Tradimefón; el AyA decide suspender el suministro de agua de las fuentes a las poblaciones y en su lugar envía camiones cisterna para su abastecimiento. Las localidades que se han visto afectadas por esta disposición son: El Cairo, La Francia, Milano y Luisiana.

Entre las principales conclusiones del reporte elaborado por el Lic. Sequeira se destaca que la presencia de Bromacil, Diurón y Tradimefón indica que las aguas subterráneas, que conforman la red hidrológica de estas nacientes, están expuestas a la contaminación por los productos químicos utilizados en el cultivo de piña (Sequeira, 2007).

En el citado reporte también se indica que las recomendaciones emanadas en el informe del año 1996 por el Ing. Bermúdez no han sido respetadas (Sequeira, 2007).

Los análisis de plaguicidas de las muestras tomadas en los años 2005 y 2006 (ver Cuadro 1.1 y Cuadro 1.2) en las fuentes de Milano y El Cairo evidencian contaminación con Bromacil en las dos fuentes, además de Diurón y Triadimefón en la fuente de El Cairo. El AyA a través del Laboratorio Nacional de Aguas continuó el monitoreo de las fuentes, evidenciando contaminación por Bromacil. Como se puede apreciar de las gráficas 1, 2 y 3, las fuentes en estudio mantienen trazas de contaminación por Bromacil, a veces aumenta la concentración y otras veces disminuye, pero no hay un patrón definido que indique que va en aumento o en disminución. Es importante hacer notar que las concentraciones de Bromacil en la fuente de Milano son superiores a las concentraciones medidas en la fuente de El Cairo y Luisiana.

El Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) inició un proyecto de investigación denominado "Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica" en abril del año 2001, y como parte del mismo muestreó por primera vez (Com. personal Viria Bravo) las nacientes de Milano y El Cairo, encontrándose trazas de Bromacil. El muestreo fue realizado el 31 de enero del año 2003 para las fuentes de Milano y el 26 de febrero del 2003 para la fuente del El Cairo. En el cuadro 3 se aprecia los resultados del análisis de las muestras de las fuentes.

Cuadro 1.1: Nivel de concentración de plaguicidas indicados en las fuentes del acueducto de Milano de Siquirres.

Punto de muestreo	Fecha de muestreo	Bromacil µg/l	Diurón µg/l	Triadimefón µg/l
Nac. 4	21/06/05	4,7	2,2	0,5
Nac. Principal	21/06/05	5,9	0,4	nd
Nac.4	20/07/05	3,0	1,3	0,4
Mezcla 3, Nac.	20/07/05	5,2	1,6	0,04
Tanque de Alm.	18/05/06	4,3	nd	nd
Tanque de Alm.	20/06/06	8,0	0,1	0,03
Tanque de Alm.	03/08/06	5,0	nd	0,2

Fuente (Sequeira, 2007)

Cuadro 1.2: Nivel de concentración de plaguicidas indicados en las fuentes del acueducto de El Cairo de Siquirres

Punto de muestreo	Fecha de muestreo	Bromacil µg/l	Diurón µg/l	Triadimefón µg/l
Tanque de unión	21/06/05	0,7	nd	nd
Naciente	20/07/06	0,1	nd	nd
Tanque de unión	08/05/06	0,8	nd	nd
Tanque de Alm.	20/06/06	1,4	nd	nd
Tanque de Alm.	03/08/06	1,1	nd	nd

Fuente (Sequeira, 2007)

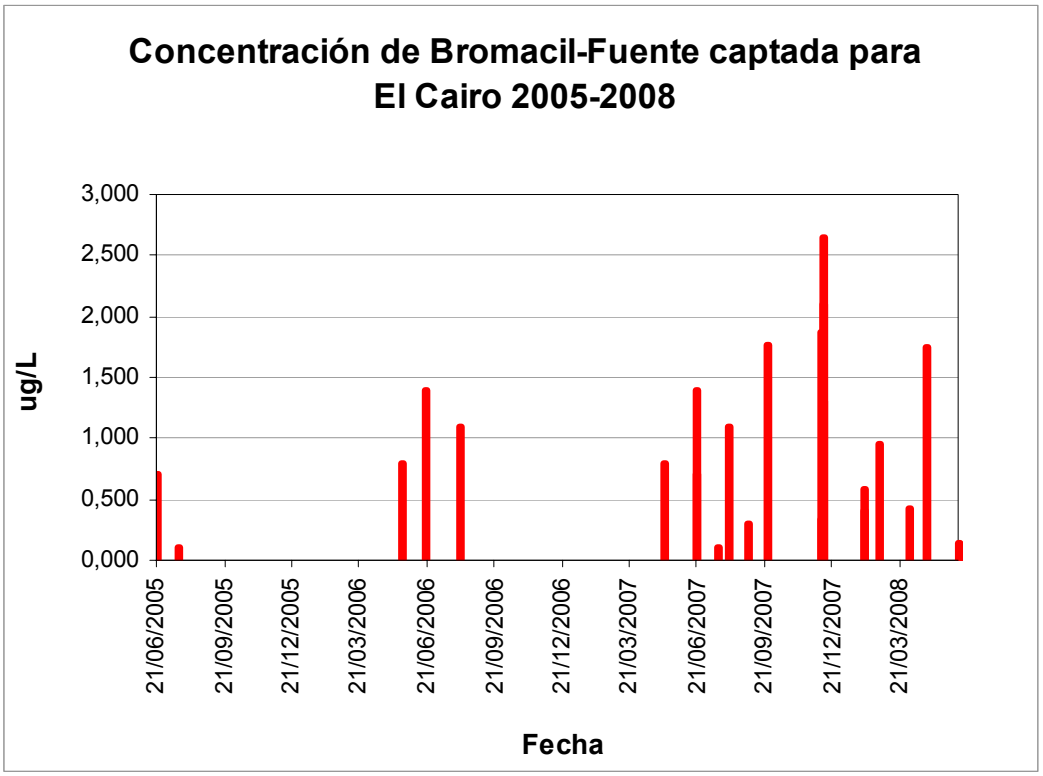


Figura 1.4: Gráfico concentración de Bromacil vs. tiempo para la fuente El Cairo 2005 – 2008. Fuente: AyA, Laboratorio Nacional de Aguas, Mora, D, 2008

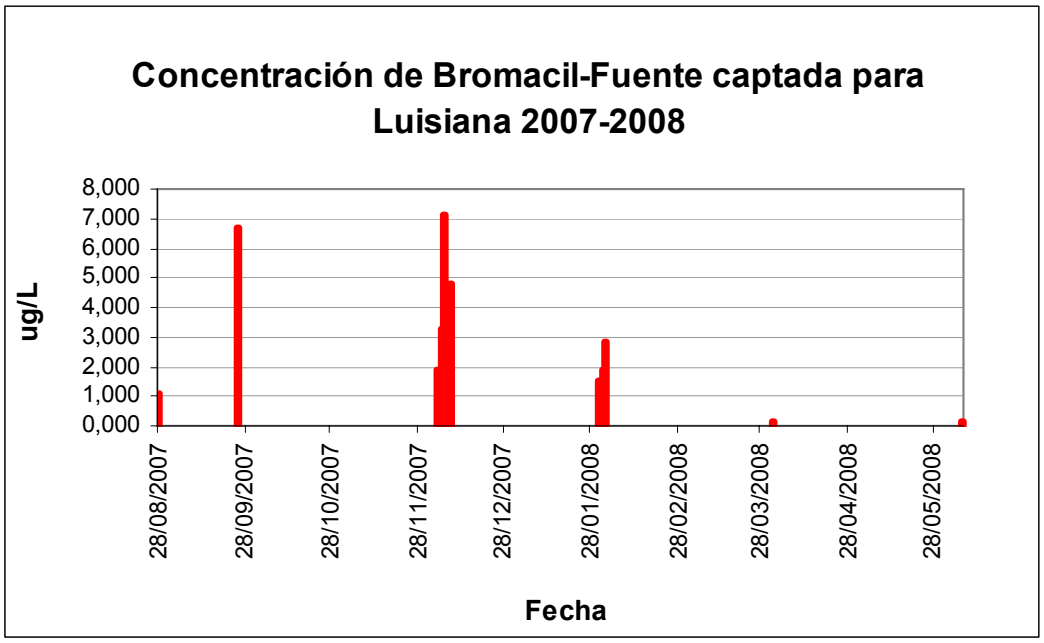


Figura 1.5: Gráfico concentración de Bromacil vs. tiempo para la fuente Luisiana 2007 – 2008. Fuente: AyA, Laboratorio Nacional de Aguas, Mora, D, 2008

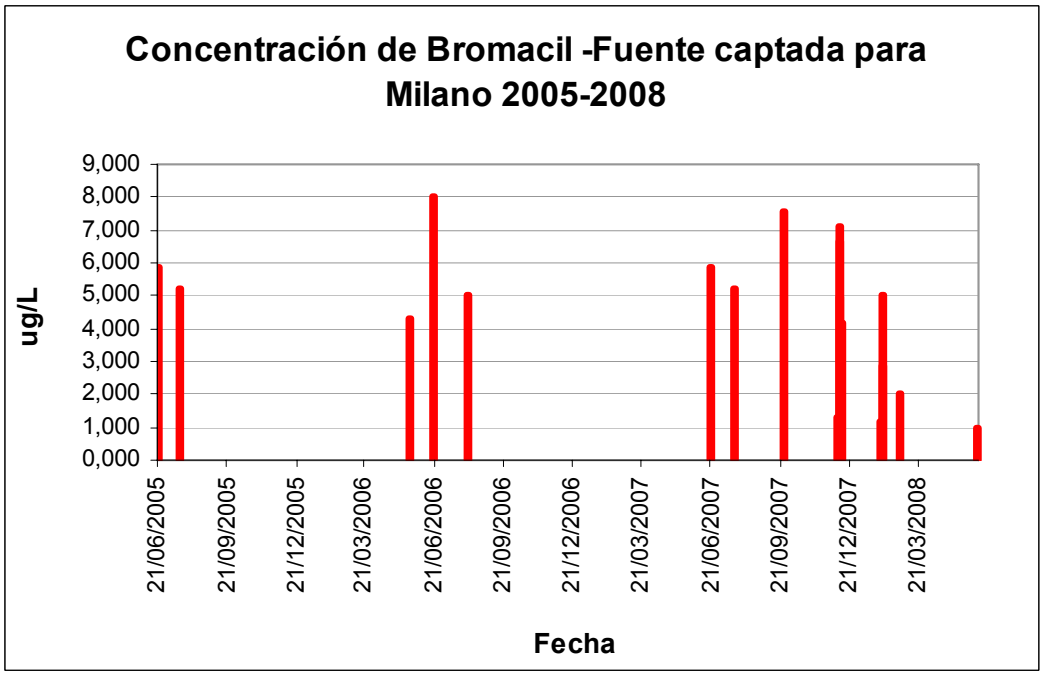


Figura 1.6: Gráfico concentración de bromacil vs. tiempo para la fuente Milano 2005 – 2008. Fuente: AyA, Laboratorio Nacional de Aguas, Mora, D, 2008

Cuadro 1.3: Concentraciones de Bromacil encontradas en muestras de agua tomadas en dos acueductos rurales cerca de Siquirres (µg/L).

Acueducto Milano				Acueducto El Cairo	
Fecha de muestreo	Naciente Principal	Naciente secundario	Tanque de captación	Fecha de muestreo	Naciente
31-01-03			3,5	26-02-03	0,4 / 0,7
21-05-03	4	2,5	3	14-04-03	0,4
				29-05-03	0,5
06-07-04	<0,1			06-07-04	0,6

Fuente: Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica. (Ruepert, Castillo y Bravo, 2005)

El cultivo de piña en la zona de Milano inició en el año 2001 y anteriormente se realizaba la actividad de ganadería, la cual no utiliza en sus prácticas el empleo del herbicida Bromacil. Por lo tanto se presume que la actividad piñera es la causante de la contaminación de las fuentes con Bromacil (Com. personal Viria Bravo). Tomando en cuenta esta información se puede considerar que 2 años es el tiempo máximo que requirió el contaminante Bromacil para alcanzar las fuentes.

Hay que considerar que en Costa Rica existe una serie de agroquímicos que están autorizados para utilizarse en la actividad de siembra de piña, cada año la División Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) publica el “Registro de Insumos Agronómicos”, en el cual aparece la lista de agroquímicos autorizados en los diferentes cultivos. En el sitio www.protecnet.go.cr/insumosys/principal.htm se puede acceder a la base de datos del MAG. Por ejemplo, existen 320 registros de marcas comerciales de agroquímicos para la siembra de piña. En el caso del Bromacil existen 5 marcas comerciales registradas en Costa Rica: Bromatel 80 WP, Hymart 80 WP, Hyvar X 80 WG, HYVAR X 80 WP, Krovar 80 WG. De ellas la más usada es el Hyvar X 80 WP (Com. personal Viria Bravo).

Tomando en cuenta que el bromacil es la sustancia que ha sido detectada en las fuentes del Cairo y Milano, de aquí en adelante será utilizada como referente en los demás análisis que se realicen en este estudio.

1.2.2 Aspectos generales sobre el Bromacil

El bromacil es un herbicida para el control de malezas perennes y es usado en el cultivo de piña al inicio de la siembra en combinación con otros herbicidas como ametrina o diurón. En Costa rica su uso ha sido autorizado para cítricos y piña. Esta sustancia es clasificada como relativamente persistente en el suelo (la vida media es de más de 100 días), presenta una alta tendencia a la lixiviación y ha sido detectado en aguas subterráneas en otros países. (Ruepert, Castillo y Bravo, 2005).En la mayoría de los países centroamericanos su uso es permitido; excepto en Belice y en Panamá donde el uso es restringido.

La toxicidad aguda DL50/CL50 oral (ratas): 5200 mg/kg; inhalación (ratas): >4,8 mg/l aire (4h) dérmico (conejos): >5000 mg/kg. Clasificación OMS: grupoV.

Acción tóxica y síntomas: vómitos, salivación, debilidad muscular, excitabilidad, diarrea, midriasis. Capacidad irritativa: Ocular leve. Actividad alergénica: negativa. (IRET, 1999. Manual de Plaguicidas).

2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo se detalla de forma cronológica de acuerdo a lo siguiente:

- Se realizaron diversas visitas de campo a la zona de estudio: 3 desde el 15 de octubre al 30 de octubre, distribuidas de la siguiente forma:
  - 15-10-08, se realiza reconocimiento general de las cuencas, se visitaron las nacientes El Cairo y Milano;
  - 21-10-08 se hizo un recorrido por las dos cuencas en compañía del geólogo, el geofísico y los técnicos en aforos; se visitaron las fuentes del Cairo y Milano, se recorrió los posibles sitios de los sondeos eléctricos verticales, y se visitaron algunos sitios de aforo de las quebradas y ríos;
  - 30-10-08 se hizo una visita en compañía de la hidrogeóloga Viviana Ramos del AyA, se hizo un recorrido por la cuenca del Río Peje y se sostuvo una serie de reuniones con personeros de las empresas Fructa, Frutex y Hacienda Ojo de Agua para informarles sobre el estudio, solicitar permiso de acceso a fincas y alguna información disponible.
  - En noviembre se hizo una visita el día jueves 13 de inspección a los trabajos de aforos y de pruebas de infiltración, se sostuvo una reunión con el Ing. Julio Leiva de la Hacienda Mindoro. El 9-dic-2008 se realizó una visita en compañía de Viviana Ramos y Mauricio Vásquez, se hizo un recorrido para observar aspectos geológicos de ambas cuencas.
  - El día jueves 15 de enero del 2009 se realizó una visita al campo para realizar una medición de niveles freáticos en pozos de la zona de estudio. Se establecieron dos frentes de trabajo, uno liderado por Viviana Ramos cuyas mediciones fueron realizadas en la cuenca del Río Destierro y el otro por Federico Arellano quien realizó mediciones en la cuenca del Río Peje.

- Se realizaron cinco reuniones con personeros del AyA:
  - La primera el día 13 de octubre en la cual estuvieron presentes: por parte del AyA, Viviana Ramos, Gerardo Ramírez, Moisés Bermúdez; y por parte de HIDROGEOTECNIA, Federico Arellano. En esta primera reunión se establecieron las pautas de la consultoría de acuerdo con los términos de referencia de la contratación.
  - La segunda reunión se sostuvo el día 24 de octubre, por parte del AyA, Viviana Ramos y por parte de HIDROGEOTECNIA, Federico Arellano. En esta reunión se estableció la ubicación de los sondeos eléctricos verticales.
  - El día 6 de noviembre se mantuvo una reunión con Moisés Bermúdez, se facilitó por parte del AyA información referente a aforos de ríos y quebradas cercanos a la zona de estudio. Además se nos facilitó información de precipitación y temperatura de la estación Babilonia ubicada en la cuenca del Río Destierro.

- El día 24 de noviembre se efectuó una reunión en las oficinas del AyA en conjunto con Viviana Ramos, Moisés Bermúdez, Arturo Rodríguez y Federico Arellano. Se comentó sobre el primer informe de avance y se establecieron las pautas para realizar una reunión con los vecinos e interesados en la zona del Cairo y Milano de Siquirres.
- El martes 13 de enero se efectuó una reunión en oficinas del AyA en conjunto con Viviana Ramos, Gerardo Ramírez, Moisés Bermúdez y Federico Arellano. Se estableció una fecha para la realización de una exposición sobre los resultados preliminares del estudio, y se comentaron ciertos aspectos sobre el avance en el trabajo.

- Se visitó el archivo de pozos del SENARA para la obtención de los datos de pozos o perforaciones existentes en la zona. El área de estudio se estableció entre las coordenadas 572,000 – 595,000 Este y 230,000 – 246,000 Norte de las hojas cartográficas Guácimo y Bonilla escala 1:50 000 del IGN; que corresponde a un área de 368 Km^2. Se visitó la biblioteca de la UCR y de la UNA. Se hicieron varias visitas al Instituto Meteorológico Nacional, para recopilar datos de las estaciones meteorológicas Se hizo una visita a la EARTH para obtener datos de la estación meteorológica; además se visitó los archivos de expedientes en la SETENA. Se establecieron entrevistas con profesionales del AyA, entre ellos: Lic. Marcos Sequeira del Laboratorio Nacional de Aguas del AyA y con la M.Sc. Viria Bravo del Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) de la Universidad Nacional.

- Se contrató a profesionales y técnicos especializados en geofísica, geología, hidrogeología y sistemas de información geográfica; realización de aforos en ríos, quebradas, canales y manantiales, y pruebas de infiltración entre otros. El trabajo fue realizado exitosamente por quienes participaron en tales actividades; así mismo se realizó una labor de coordinación y supervisión de los trabajos.

- Posteriormente se procesaron los datos de campo y se inició la redacción del informe final, además se hizo una presentación de los resultados preliminares el día miércoles 4 de febrero del 2009.

3 GEOLOGÍA

3.1 Geología Regional

La zona de estudio comprende las cuencas de los ríos Destierro y Peje, ambos pertenecientes a la cuenca del río Parismina, ubicada esta última al norte de la Cordillera Volcánica Central, en lo que se define como la cuenca tras - arco de Costa Rica. Dentro de esta área es posible identificar a escala regional formaciones geológicas sedimentarias con edades que van del Mioceno al Pleistoceno y que forman la denominada Cuenca Sedimentaria de Limón Sur.

La actividad volcánica de la parte norte de la Cordillera Volcánica Central en su extremo oriental, está ligada principalmente al macizo Turrialba y sus volcanes adyacentes extintos,

tales como el volcán Dos Novillos y otros que se señalarán posteriormente. Las edades de estas rocas datan del Plioceno al Pleistoceno.

Las unidades geológicas más representativas y extensas en la zona corresponden a depósitos de flujos de detritos (por ejemplo lahares) y abanicos coluvio – aluviales, asociados directamente con los principales ríos como el Destierro, Peje, y otros de mayor tamaño como el Reventazón al este y Parismina al oeste.

3.1.1 Cordillera Volcánica Central

La Cordillera Central está formada por cinco macizos volcánicos constituidos por rocas piroclásticas, lavas e intrusivos, así como depósitos de debris, lahares y depósitos fluvio - lacustres. Este tipo de estructuras volcánicas se denominan estratovolcanes, los cuales se describen como complejos de formas subcónicas, con estructuras caldéricas en su parte superior, donde se ubican los conos parásitos. Los volcanes más importantes del lado oriental de la cordillera son el Irazú y el Turrialba. Éste último está conformado además por volcanes extintos denominados Alto Botella y Dos Novillos, alineados en dirección SO – NE. La ladera norte de la cordillera esta disectada por una red hídrica bastantes densa, dada la alta precipitación de tipo orográfico, donde son comunes los saltos de agua, gargantas, cañones y relictos de erosión volcánica como cráteres abiertos y calderas. El macizo del volcán Turrialba sobreyace a una compleja y espesa secuencia sedimentaria de la deformada Cuenca de Limón cuya colmatación ocurrió en el Plioceno. De acuerdo con varias dataciones la edad del volcán Turrialba es de unos 75 000 años. El volcán Dos Novillos en cuanto a su edad es contemporáneo con el volcán Turrialba (Soto, 1988).

3.1.2 Complejo volcánico Turrialba – Dos Novillos

Este es el sistema volcánico ubicado más al este de la Cordillera Volcánica Central. Sus conos poseen características similares a la de otros volcanes de Costa Rica. Soto (1988) indica que poseen formas subcónicas de amplia base y cima, coronados por estructuras complejas, a los lados del eje volcánico se ubican centros eruptivos menores, cuyas posiciones coinciden con fracturas regionales en direcciones N – S, E – O y NE. El volcán Turrialba tiene un volumen de 290 km^3 y cubre un área de 400 km^2; su altura es de 1900m sobre su base.

El cuanto la situación tectónica del Complejo Turrialba – Dos Novillos, Soto (1988) lo describe como emplazados en una zona de fracturas tensionales en dirección NE, transversales y traseras al eje volcánico de la Cordillera Central. El volcán Dos Novillos es un cono compuesto, erosionado, con una edad e historia geológica similar al Turrialba, que se alinea a las estructuras descritas y es cortado por una fractura en dirección O – NO.

La geología regional de la zona de estudio está compuesta por formaciones sedimentarias que serían las más antiguas y pertenecen a la Cuenca Limón. Afloran en el cañón del río Reventazón al este. Sobre el basamento sedimentario yacen las rocas terciarias, las del Pleistoceno – Cuaternario y Cuaternarias de la Cordillera Central. Las rocas terciarias incluyen vulcanitas alcalinas y las rocas volcánica pre – Turrialba, asociadas al Grupo

Aguacate, sobre ellas están los lahares y flujos aluviales del Pleistoceno y finalmente las lavas del Cuaternario.

3.1.3 Vulcanismo Terciario

Dentro del vulcanismo Terciario de la Cuenca Limón destaca la Formación Cureña, que se extiende hacia la frontera con Nicaragua, desde San Carlos de Nicaragua hasta la desembocadura del río Sarapiquí; son cerros bajos y mesetas. El vulcanismo Intragraben se localiza al norte de la zona de Guácimo y Pocora y al sur de Tortuguero. Las llanuras del Caribe Norte se interpretan como depresiones vulcano – tectónicas donde se levantan pequeños cerros y conos volcánicos que abarcan una superficie de 70 km^2.

3.1.4 Formaciones sedimentarias del Terciario

Se describen a continuación las características de las principales formaciones sedimentarias del Terciario que comprenden la Cuenca Limón, dentro de la cual se ubican las áreas en estudio.

3.1.4.1 Formación Senosri

Consisten en calcarenitas de grano medio, color verde claro a grisáceo, y en calizas brechosas organógenas y lutitas (Fernández, 1984). La secuencia estratigráfica está integrada por areniscas, lutitas y calizas duras, semi - cristalinas, que gradan a areniscas arcósicas gruesas, situada por debajo de la Formación Uscari. Está compuesta por calcarenitas de grano medio, color verde claro a grisáceo, calizas brechosas organógenas y lutitas. Las rocas fueron definidas como aglomerados cementados con limos. (Salazar, 1996). La serie suprayacente se identifica como Formación Uscari (Fernández, 1984). Presenta espesores desde los 1400 m hasta 2400 m (Arias, 1998). Esta formación aflora entre Altos de Pascua y Guayacán en la cuenca del río Reventazón al sureste de la zona de estudio.

3.1.4.2 Formación Uscari

Se define como formada principalmente por lutitas friables de color oscuro, con algunas intercalaciones de calizas y areniscas calcáreas, sus buzamientos varían de 20º a 90º (Aguilar, 1984). Sobreyace a las Formación Senosri y se encuentra sobreyacida discordantemente a la Formación Uscari (Aguilar, 1984). El espesor máximo es de aproximadamente 1000 m (Arias, 1998). Aflora también en el cauce del río Reventazón al este.

3.1.4.3 Formación Río Banano

Son areniscas volcaniclásticas de grano fino, ligeramente calcáreas, interestratificadas con limolitas y arcillolitas, que se caracterizan, que caracterizan las facies del frente deltaico, mientras que en la planicie deltaica son típicas limolitas carbonosas y capas de carbón

intercaladas dentro de la secuencia clástica gruesa de areniscas y conglomerados (Arias, 1998). Sobreyace a la Formación Uscari y es sobreyacida transicionalmente por la Formación Suretka. Su espesor máximo es de 1800 m (Arias, 1998). Su edad es Mioceno Superior-Plioceno (Arias, 1998). Aflora al sur de Limón y Matina lejos de la zona de estudio.

3.1.4.4 Formación Suretka

Conglomerados que se caracterizan por un amplio rango granulométrico, constituido por partículas de arcillas hasta bloques de más de un metro de diámetro (Alvarado, 1984). La mayor parte de los componentes de los conglomerados Suretka se deriva de la Serie Volcánica del Río Pey. La descripción de las litofacies es conglomerados constituido por piezas de todo tamaño, de basalto, andesitas y cuarzodiorita, cementadas por sílice, con intercalaciones de unos pocos estratos de arcilla y areniscas (Salazar, 1996). Su espesor alcanza entre 1500 m a 2000 m (Arias, 1998). El contacto inferior con la Formación Río Banano y el superior es desconocido (Alvarado, 1984). Aflora al sureste del área de estudio entre Babilonia, Pascua y Guayacán.

3.1.5 Unidades intrusivas del Mioceno – Plioceno

Se localizan al sureste de la zona de estudio, el cauce medio del río Reventazón. Su espesor es de unos 500 m, se trata de intrusivos alcalinos que afloran en mantos de 30 m de espesor cerca de Pascua.

3.1.6 Unidad de lahares del Pleistoceno - Cuaternario

Se localizan al oeste de la zona de estudio al pie de la ladera norte del volcán Irazú en la zona de transición con la llanura de inundación. Los lahares son descritos como muy heterogéneos en composición y caóticos en l disposición de los granos, la composición revela un material volcánico con matriz arenosa, tobácea, etc. algunas veces presentan clastos de hasta 0,5cm de diámetro y su espesor es métrico.

3.1.7 Unidades volcánicas Cuaternarias

Se incluyen dentro de esta designación todas las rocas volcánicas que provienen de la Cordillera Volcánica Central y ubicadas al sur y suroeste de las áreas de estudio. En términos generales consiste de coladas de lava de andesitas y basalto andesitas, así como ignimbritas, cenizas y lahares. Soto (1988) describe las lavas del volcán Turrialba como andesitas basálticas a andesitas silíceas y algunas tefras. Indica además que las dimensiones de las coladas lávicas procedentes de la cúspide del volcán Turrialba alcanzan hasta 5 km de longitud, mientras que los flujos lávicos eruptados de fracturas en los flancos llegan hasta 8 km del centro de emisión y 10 km medidos desde la cima.

3.1.8 Unidades aluviales recientes

Comprende el sector norte y central de las zonas de estudio, incluye las llanuras de inundación de los principales ríos como el Parismina y Reventazón y que se extienden al norte de la hoja Guácimo hasta los deltas de los ríos. Son el producto de procesos dinámicos asociados a grandes avenidas de los ríos que acarrean grande volúmenes de detrito.

La Figura 3.1 es una columna estratigráfica de la Cuenca Sedimentaria de Limón. La Figura 3.2 es una Mapa Geológico Regional tomado de Salazar (1996) de la zona que comprende las cuencas de los ríos Destierro y Peje.

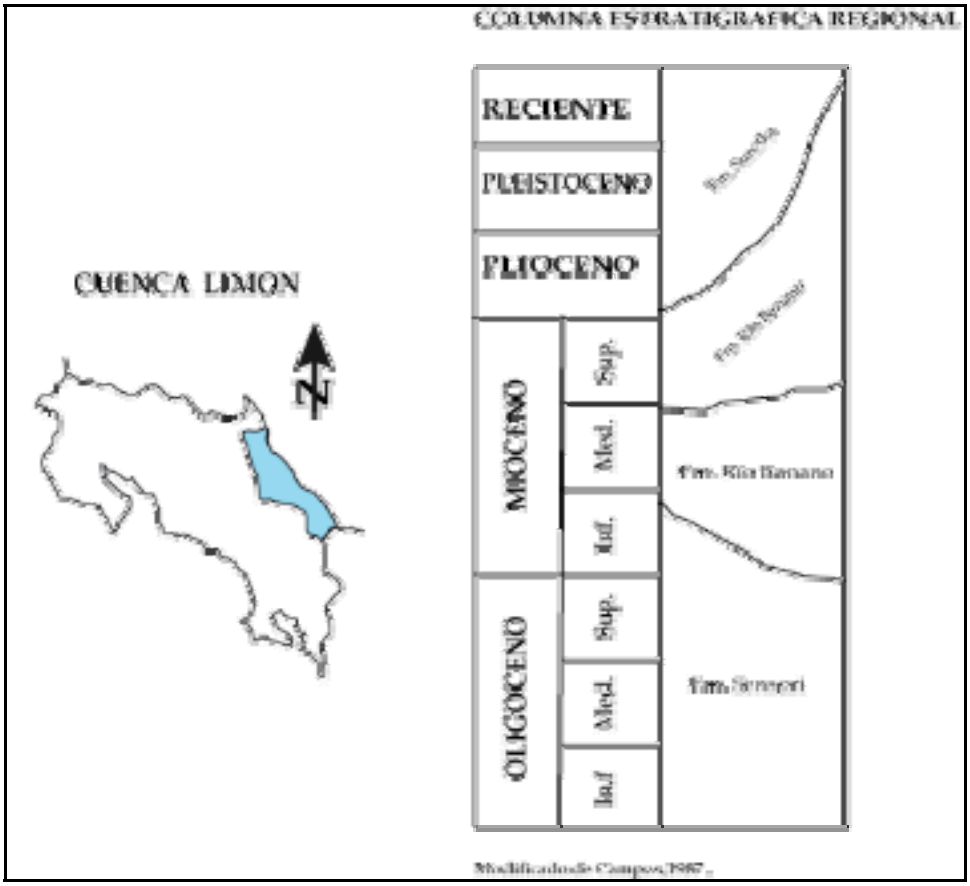


Figura 3.1: Columna estratigráfica regional de la Cuenca Sedimentaria Limón Sur. Tomado de Campos, 1987.

3.2 Geología Local

Para una mejor comprensión de la condición hidrogeológica se tratarán ambas cuencas por separado. Se utilizó como base la información geológica regional así como estudios más locales de geología, tales como Salazar (1996) y correlación de campo. Posteriormente se realiza una correlación con la información de los resultados de los sondeos eléctricos verticales

y las descripciones de los registros litológicos de pozos cercanos, con lo que se determina finalmente el modelo geológico de las cuencas del río Destierro y Peje objeto de este estudio.

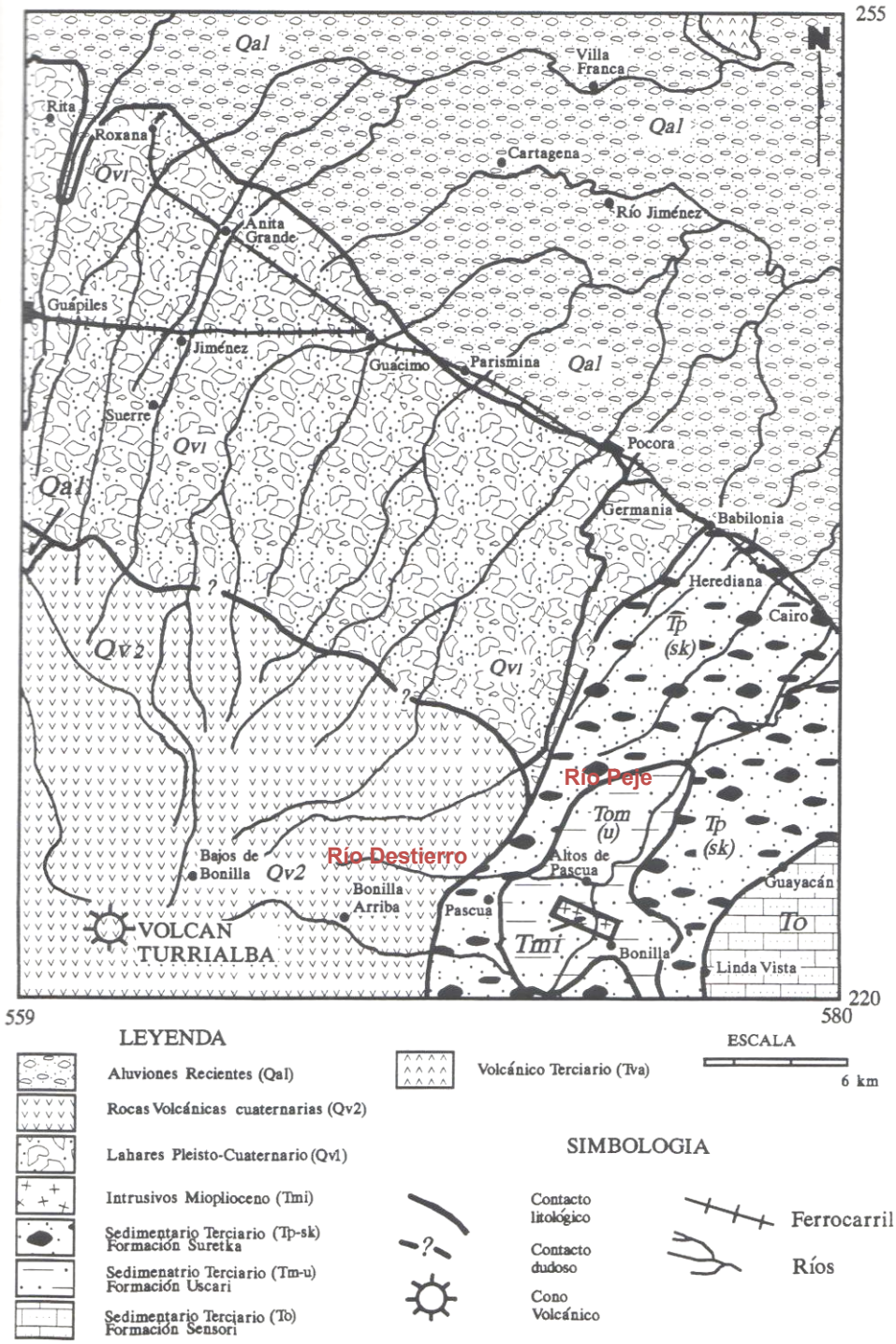


Figura 3.2: Mapa Geológico Regional. Tomado del Mapa Geológico de Costa Rica, 1:200 000, parte de las Hojas Limón y San José.

La Figura 3.4 muestra el mapa geológico local correspondiente al área de estudio.

3.2.1 Geología de la cuenca del río Destierro

La información base se obtiene del estudio elaborado por Salazar (1996) quien define la geología del cantón de Guácimo, donde se ubica la cuenca del río Destierro. En general las lavas de los volcanes Turrialba, Dos Novillos y el Cerro Alto Botella son andesitas, andesitas – basálticas y basaltos con fenocristales de plagioclasa, olivino, augita, augita titanífera, hipersteno, hornblenda y magnetita, con textura porfirítica – afanítica y microtexturas, la matriz es de color gris a negra cuando está sana y rojizo y pardo rojizo cuando está alterada (oxidada).

Las coladas de lava están compuestas por una brecha inferior donde se presentan bloques de lava de tamaños variables e irregulares. Sobre esta yace una sección masiva, poco porosa, con fracturas irregulares y discontinuas. La tercera capa consiste de una sección porosa, donde sobreyace una potente brecha superficial similar a la inferior y finalmente la capa vidriosa que sirve para determinar el contacto entre una capa de lava y otra. La Figura 3.3 presenta la estructura típica de una lava blocosa o tipo aa.

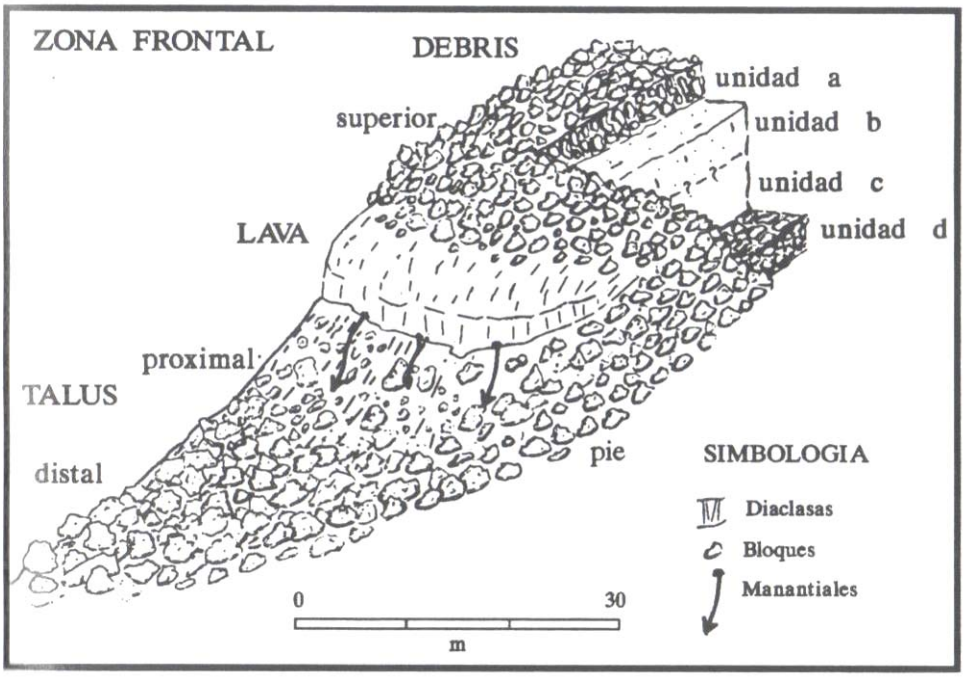


Figura 3.3: Estructura típica de una colada de lava blocosa. Tomado de Salazar (1996).

Las coladas de lava se ubican hacia la parte sur y central de la cuenca en estudio del río Destierro. Son coladas de lavas provenientes de los volcanes Turrialba, Dos Novillos y Alto Botella. Las más antiguas están erosionadas y presentan relieves menos abruptos, en tanto que las recientes son más rugosas y cortas. La edad de los volcanes Turrialba y Dos Novillos data de hace 500 000 años, la edad es Pleistoceno.

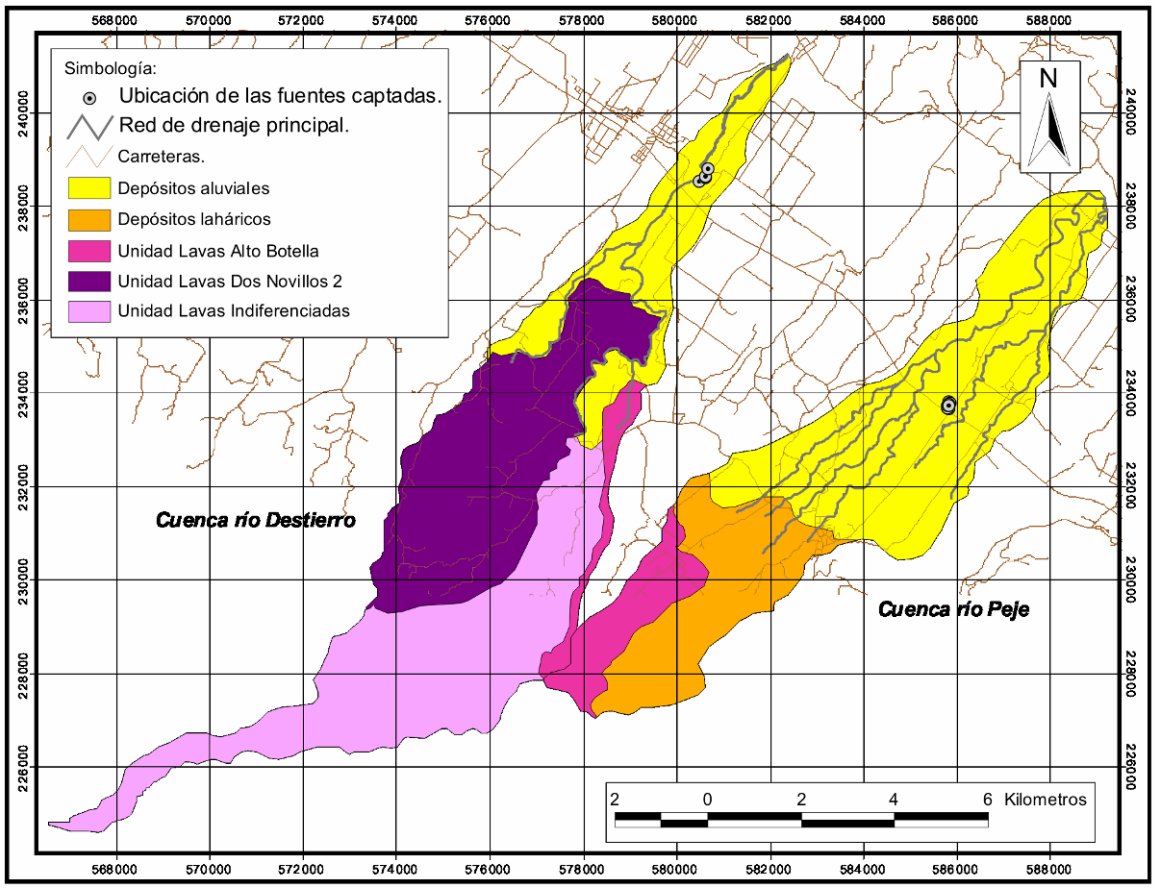


Figura 3.4: Mapa geológico local del área de estudio.

La cuenca alta del río Destierro está conformada por una serie de unidades de coladas de lava, al menos cinco, diferenciadas por Salazar (1996). Para efectos prácticos de este estudio y por la poca influencia que puedan tener desde el punto de vista hidrogeológico en la zona baja, se decide agruparlas dentro de una sola unidad denominada Unidad de Lavas Indiferenciadas, más adelante se señalarán algunas de las principales características.

3.2.1.1 Unidad Lavas Alto Botella

Se localiza a lo largo del cauce principal del río Destierro en la parte este de la cuenca delimitada para el presente estudio. Es una colada de unos 7 km de longitud y 1 km de ancho, que se desplazó hacia el norte. El mejor afloramiento en la zona de estudio se ubica a la altura del puente camino a San Bosco, en las coordenadas 232.878 N y 578.667 E (Fotografía 3.1). La colada presente un espesor visible de unos 20 m, la mitad comprende la sección brechosa de la parte superior y al menos 10 m de lava masiva color gris con poca fracturación.

Fotografía 3.1: Vistas del afloramiento de la Unidad de Lavas Alto Botella en la zona de estudio a la altura del puente del río Destierro en las coordenadas 232.878 N y 578.667 E.

Las fotografías anteriores fueron tomadas desde el puente de la ruta a San Bosco. El río está muy encañonado en este punto, lo que dificultó el descenso. Ambas muestran la parte masiva y densa de lo que sería el núcleo de la colada de lava.

La sección brechosa de la colada de lava está conformada en superficie por bloques de tamaños métricos, en promedio 1,5m, esparcidos alrededor del pueblo conocido como San Bosco (Fotografía 3.2). La parte más densa de lo que sería el núcleo de la colada se ubicaría a la altura del puente sobre el río Destierro antes mencionado.

Fotografía 3.2: Bloques de lo que constituye la sección brechosa de la colada Alto Botella a la altura de San Bosco (coordenadas 232.719 N y 578.488 E)

La Unidad de Lavas Alto Botella de acuerdo con Salazar (1996) y observaciones de campo, sobreyace discordante los rellenos coluvio aluviales del Pleistoceno y es sobreyacida por la unidad de lavas Dos Novillos 1. Ésta última se encuentra dentro de la Unidad de Lavas Indiferenciadas definida en el presente estudio.

Se trata de basaltos alcalinos con fenocristales de plagioclasa, olivino, augita titanífera, en una matriz compuesta por plagioclasa, vidrio volcánico, magnetita, piroxenos y olivino (Salazar, 1996). Esta unidad como su nombre lo indica se originó en el cerro Alto Botella.

3.2.1.2 Formación Dos Novillos

Definida por primera vez por Salazar (1996). Está constituida por al menos 10 coladas de lava o unidades litológicas. Dentro de la cuenca del río Destierro es posible encontrar las coladas denominadas como del Miembro Superior que incluye las coladas Dos Novillos 1, 2 y 3. Se pudo diferenciar en el campo la Colada Dos Novillos 2, la cual se ubica entre el río Perla y la quebrada Honda, el resto de coladas se incorporan dentro de la Unidad de Lavas Indiferenciadas del presente estudio.

3.2.1.3 Lavas Indiferenciadas

Incluye las coladas Dos Novillos 1 y 3 definidas por Salazar (1996). Abarcan prácticamente la cuenca alta del río Destierro al sur. La Colada Dos Novillos 1 consiste de un flujo lávico de 7 km de largo y 2 km de ancho con dirección de flujo al NE. Sobreyace discordante a la unidad Alto Botella y es sobreyacida por las unidades Lavas Dos Novillos 2 y 3.

Por otra parte, la Colada Dos Novillos 3 se localiza en la parte más alta de la cuenca, al sur de la zona de estudio en el interior del volcán Dos Novillos, comprende numerosos flujos lávicos algunos con menos de 1 km de longitud, sobreyace discordante a las otras dos unidades de lavas. Representa la última etapa de la actividad efusiva del volcán Dos Novillos, son varios flujos de lavas.

3.2.1.4 Unidad Lavas Dos Novillos 2

Se extiende entre los ríos Perla y la quebrada Honda. La longitud expuesta es de unos 12 km y 3 km de ancho. Sobreyace discordante a la Unidad de Lavas Alto Botella. Su expresión en superficie es a manera de loma alargada en dirección NE, separada por los ríos Perla y quebrada Honda, el primero señala su límite este y el segundo el límite oeste. Se observa aguas abajo de la confluencia del río Perla con el río Destierro dos curvaturas casi en ángulos de 90° que señalan lo que se define como el frente de la colada.

La colada de Lava Dos Novillos 2 está compuesta por andesitas basálticas con fenocristales de plagioclasa, augita, hipersteno y poco olivino, en una matriz pilotaxítica con plagioclasa, magnetita y piroxenos. También existen basaltos con plagioclasa y augita titanífera con poco olivino y magnetita y andesita basalto con fenocristales de plagioclasa y augita con poco olivino, hipersteno y magnetita.

El mejor afloramiento observado fue en la margen izquierda del río Destierro justo en la confluencia con el río Perla (Fotografía 3.3) en las coordenadas 234.742 N y 579.103 E. Se pudieron observar lavas andesíticas de color gris, con textura afanítica porfirítica con plagioclasa y piríboles. La roca se presenta muy sana, con una alta densidad de fracturas que

permiten una permeabilidad bastante buena en la unidad. Se estima que este punto corresponde con el núcleo de la colada Dos Novillos 2.

Fotografía 3.3: Vista del afloramiento de lo que sería el núcleo denso de la colada Dos Novillos 2 en la margen izquierda del río Destierro justo en la confluencia con el río Perla (234.742 N y 579.103 E).

En la margen derecha de la quebrada Honda se puede observar lo que corresponde con la brecha de la colada Dos Novillos 2, se trata de bloques angulares de composición andesítica englobados en matriz arenosa gruesa muy consolidada, en disposición caótica y con un espesor visible de por lo menos 5m. La composición de los bloques es monomíctica y los tamaños varían entre 5 y 50cm. La Fotografía 3.4 es una vista en las coordenadas 235.990 N y 577.601 E, en el límite oeste de la colada. La permeabilidad a simple vista se observa baja, pero la porosidad es bastante alta.

La brecha superior de la colada consiste de bloques de tamaños centimétricos en promedio de 10 cm englobados en una matriz tobácea media de color rojizo a café, en superficie eventualmente forma lomas de unos 2 m de altura (Fotografía 3.5, ubicada en coordenadas 234.667 N y 577.639 E); los bloques son monomícticos y están esparcidos a lo largo del terreno.

Fotografía 3.4: Afloramiento de la brecha de la colada Dos Novillos 2 en la margen derecha de la quebrada Honda en las coordenadas 235.990 N y 577.601 E.

Fotografía 3.5: Vista del afloramiento de brecha de colada superior en la Colada Dos Novillos 2.

La morfología de la parte superior de las coladas de lava es ondulada y de contornos suaves, producto de la cobertura de suelos limosos arcillosos, las pendientes son bajas excepto en los ríos y quebrada que tienden a formar verdaderos surcos y cárcavas. La Fotografía 3.6 es un ejemplo de la vista de los terrenos sobre la colada Dos Novillos 2, como se observa, el uso del suelo en la zona es principalmente ganadería y en los últimos años cultivos de piña.

3.2.1.5 Unidad de Lavas del Terciario

A la altura del puente del ferrocarril en el río Destierro, se pudieron observar en la margen izquierda afloramientos de brechas de lo que se asocia con lavas del Terciario, posiblemente del basamento ígneo o asociadas inclusive a las lavas de Lomas de Sierpe. Serían las unidades más antiguas de la cuenca en estudio. El contacto observado en este punto (238.423 N y 580.156 E) es discordante y muy recto, como se aprecia en la Fotografía 3.7. Estas lavas no se correlacionan con ninguna de las anteriores, debido a que la edad y estratigrafía hacen poco probable dicha correlación. Estas lavas afloran también cerca de las

tomas de las nacientes de Milano, solo que se encuentran muy alteradas, de color amarillento y no se distingue su composición.

Fotografía 3.6: Vista panorámica de los terrenos sobre la colada de lava Dos Novillos 2, nótese las formas onduladas y los contornos suaves.

Fotografía 3.7: Contacto discordante entre la unidad de brechas de lavas del Terciario y los depósitos aluviales recientes en la margen izquierda del río Destierro junto al puente del ferrocarril en las coordenadas 238.423 N y 580.156 E.

Esta unidad de lavas es descrita en el registro litológico del pozo BO – 13 a unos 15 m de profundidad. Señala el informe de perforación que de 15 a 26 m de profundidad aparecen rocas volcánicas porosas en el techo y luego se vuelve dura, densa con tramos vesiculares y fracturados, con cristales en textura porfirítica y de permeabilidad aparente secundaria. Entre 26 y 30 m se describe una capa de arcilla gris azulada con poca arena de baja permeabilidad y de 30 hasta 56 m de profundidad lavas con tramos densos y otros brechosos, porfirítica y muy fracturada con permeabilidad aparente media. Se presume entonces que existen al menos dos coladas de lavas en este sector del pozo BO – 13 y por debajo de los depósitos aluviales recientes.

3.2.1.6 Unidad de depósitos aluviales

Los materiales erosionados de los edificios volcánicos han sido transportados principalmente por los cauces de los ríos, son depositados y clasificados de acuerdo al tamaño, los más grandes cerca de la fuente aportada y los más finos alejados de la misma. Salazar (1996) diferencia entre los Abanicos Aluviales Pleistocénicos para los de mayor tamaños y ubicados en las partes altas cerca de los frentes de coladas y la Llanura Aluvial Pleistocénica para aquellos más al norte de la hoja Bonilla y sur de la hoja Guácimo. Para concordar con las definiciones de Salazar (1996) se distinguen entre los aluviones antiguos y los aluviones recientes.

- **Subunidad de aluviones antiguos**

Denominada por Salazar (1996) como Abanico Aluvial Pleistocénico. Se trata de aluviones antiguos compuestos por areniscas de granulometrías variables, conglomerados finos y brechas, sobreyacidos por flujos de bloques métricos compuestos por lavas y finalmente terrazas aluviales. El basamento de estas unidades se asocia posiblemente a coladas de lavas más antiguas, es sobreyacida discordante por las coladas del volcán Dos Novillos y el cerro Alto Botella.

Varios afloramientos de esta unidad se pudieron observar a lo largo de la zona de estudio. Uno de los más significativos se observó en la margen derecha del río Perla en las coordenadas 233.188 N y 578.049 E. Se trata de aluviones bastante gruesos mal seleccionados, compuestos por bloques subredondeados y subesféricos de lavas de distinta composición, con tamaños decimétricos en general pero con otros bloques de tamaños métricos, todos englobados en una matriz de arena gruesa algo consolidada, en contacto por bloque y con una muy mala selección. El espesor visible en la margen derecha del río Perla asciende a los 10m (Fotografía 3.8).

La unidad de aluviones antiguos aflora en el fondo del cañón del río Destierro al este de la finca Frutex, en las coordenadas 235.904 N y 579.301 E, al norte del frente de colada Dos Novillos 2. El punto observado corresponde con aluviones más finos, posiblemente del techo del depósito o de las facies distales a la corriente fluvial que los originó, la matriz es arcillosa de color café amarillento, que engloba clastos de tamaños centimétricos (<10cm), de composición volcánica, subredondeados y de alta esfericidad, en contacto por matriz (Fotografía 3.9). En este punto además se observó un contacto disconcordante de la unidad de aluviones antiguos con la unidad de aluviones recientes del río Destierro, que los sobreyacen con espesores potentes de hasta 20 m o más.

- **Subunidad de aluviones recientes**

Se localiza en los alrededores del río Destierro y dentro de los cauces de los otros ríos principales de la cuenca como el Perla y la quebrada Honda. Se trata de depósitos de materiales arenosos y conglomerados o aluviones, de textura gruesa, intercalados con capas de arenas poco consolidadas.

Uno de los mejores afloramientos se ubica justo en el punto de la toma de una de las nacientes de El Cairo, en la margen derecha del río Destierro en las coordenadas 238.792 N y

580.647. Son aluviones algo consolidados, con bloques de tamaños centimétricos con muy poco porcentaje de matriz, cuando la hay es de composición arenosa, de color negro, presente en ocasiones lentes de areniscas con laminaciones cruzadas. El espesor observado en este punto es de 20 m.

Fotografía 3.8: Afloramiento de la unidad de aluviones antiguos en la margen izquierda del río Perla en las coordenadas 233.188 N y 578.049 E.

Fotografía 3.9: Afloramiento de aluviones antiguos en las coordenadas 235.904 N y 579.301 E.

La parte superior de estos depósitos aluviales se observan al lado del corte de la línea férrea justo al norte de las instalaciones de la empresa CODELA. Se trata de arenas finas a medias de color café, consolidadas, que se degradan a suelos arenosos limosos de color rojizo café; hay capas de espesores milimétricos de arenas de color negro. El espesor visible del afloramiento es de unos 5 m y en la base se describen aluviones finos con bloques de lavas alterados y muy degradados. La Fotografía 3.10 muestra dicho corte, en el cual se nota el aluvión grueso en la base del afloramiento, y la parta media y alta secuencia de arenas en laminaciones.

En la margen izquierda del río Destierro cerca de las coordenadas 236.701 N y 578.935 E, se pudo observar un espesor de más de 30 m de aluviones gruesos, con bloques de

tamaños métricos de hasta 5 m o más, englobados en poca matriz arenosa y poco consolidados, muy propensos a la erosión fluvial en especial en la base (socavación del talud).

Fotografía 3.10: Corte en la unidad de aluviones recientes al norte de CODELA, al lado de la línea férrea.

En la margen derecha del río Destierro, cerca de las coordenadas 236.701 N y 578.935 E, existe una terraza aluvial de más de 15 m de altura con respecto al cauce del río Destierro y que se ubica a unos 15 m por debajo del nivel general del terreno. Esta área esta actualmente sembrada de piña; se ubica dentro de las instalaciones de la empresa Frutex. Se trata de un área de por lo menos 2 Hectáreas o más, conformada por aluviones gruesos con bloques de tamaños hasta 1,5 m englobados en matriz limo arenosa de color crema. Este afloramiento es importante ya que se trata de una terraza aluvial del río Destierro, ubicada en una zona de meandro del río, el cual pasa a unos 15m de profundidad. La Fotografía 3.11 es una vista de la terraza aluvial citada.

En la margen derecha del río Destierro en las cercanías de la zona de ubicación de las tomas de Milano, se pueden observar cortes de más de 20 m de altura de aluviones asociados al río Destierro, el cual ha trazado un profundo cañón hacia este sector. Se muestran al menos dos niveles de terrazas aluviales, la más baja se asocia con la terraza de inundación extraordinaria, se ubica aproximadamente a 1 m por encima del nivel normal del río. La terraza más alta se extiende hasta 2 m por encima del cauce normal del río, se muestra en la Fotografía 3.12, en la que también se distinguen con facilidad los bloques de aluvión grueso.

A lo largo de los drenajes de las fincas piñeras que se extienden en la parte noreste y suroeste de la Carretera Braulio Carrillo, se pueden observar afloramientos de lo que constituye la unidad más superior de arenas y aluviones finos. Los suelos son limo arenosos, son frecuentes los bloques redondeados de lavas, en tamaños de no más de 10cm esparcidos a lo largo del terreno y que se observan durante los movimientos de suelos para preparación de los terrenos (ver Fotografía 3.11). Como se muestra en esta fotografía, los suelos tienen coloración café clara, y los bloques de aluvión son redondeados y esféricos de tamaños centimétricos; estos bloques inalterados de lava, están cubiertos por una capa de alteración color crema.

Los terrenos conformados por las unidades de aluviones recientes son de topografía plana con pequeñas ondulaciones, cortados por quebradas intermitentes y actualmente por

drenajes agrícolas, la mayoría de carácter permanente. La Fotografía 3.14 es una vista de las zonas de cultivo de piña, que se siembra aprovechando los suelos y la topografía de estos terrenos al pie del flanco norte del volcán Turrialba.

Fotografía 3.11: Vista de la zona de terraza aluvial que ahora se ubica levantada con respecto al cauce del río Destierro, se ubica cerca de las coordenadas 236.701 N y 578.935 E.

Fotografía 3.12: Terraza más alta del río Destierro en las zona circundante a las tomas de Milano.

3.2.2 Geología de la cuenca del río Peje

La geología de la cuenca del río Peje es en cierto modo menos compleja que en la cuenca del río Destierro. En este caso no se cuenta con estudio locales geológicos, por lo que las descripciones de las unidades así como su delimitación en el campo, se hace basándose en las observaciones de campo. El río Peje presenta una morfología de cauce más regular que el río Destierro y permitió un recorrido a través del cauce desde la cota 400 m.s.n.m. hasta la carretera Braulio Carrillo a 120 m.s.n.m., para poco más de 4 km de recorrido lineal en total.

Fotografía 3.13: Terrenos recién trabajados donde se removió la capa de suelo vegetal.

Fotografía 3.14: Vista panorámica de los terrenos planos conformados por la unidad de depósitos aluviales recientes.

3.2.2.1 Unidad Lavas Alto Botella

Esta unidad no se logró observar en el campo, pues abarca la parte más alta de la cuenca del río Peje. Fue descrita con mejor precisión en la geología de la cuenca del río Destierro. Esta unidad tiene su origen el cerro Alto Botella, se trata de coladas de lava blocosas de composición basáltica alcalina. En la base de esta unidad se ubican algunas de las nacientes registradas, como por ejemplo la NAC – 145.

3.2.2.2 Unidad de lahares

Abarca la parte media alta de la cuenca en estudio. Se trata de lahares polimícticos con clastos principalmente de andesitas, englobados en una matriz arcillosa en un 60%. Los clastos tienen tonalidades rojas, cafés y crema. Sobreyaciendo a los lahares y de manera discordante están las unidades de aluviones recientes. Es posible observar varios niveles de lahares que obedecen posiblemente a distintos eventos, el más inferior presenta una granulometría más

fina, mientras que el más superior es monomíctico y con una granulometría mayor. La Fotografía 3.15 es una vista de un afloramiento observado en las coordenadas 230.773 N y 581.777 E, en el cual se observa el límite o contacto entre la unida de lahares subyacientes con la unida de aluviones sobreyacientes.

Fotografía 3.15: Afloramiento de la unidad de lahares en las coordenadas 230.773 N y 581.777 E.

3.2.2.3 Unidad de aluviones recientes

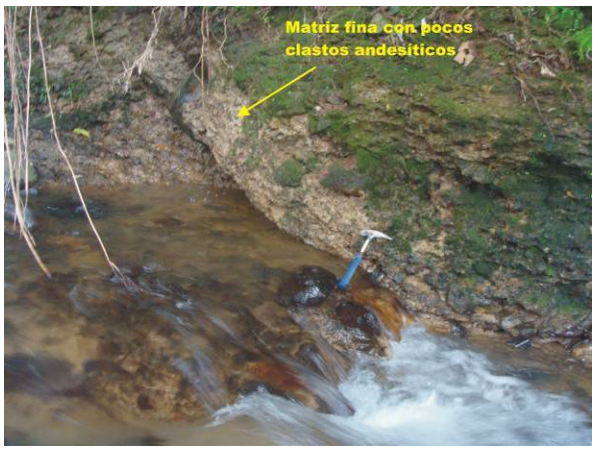
Esta unidad comprende la mayor parte de la cuenca en estudio. Los aluviones recientes se extienden por encima de las unidades de lahares, son bloques subredondeados de moderada esfericidad, con tamaños desde milimétricos hasta decimétricos, de composición andesítica, flotando en matriz semiconsolidada arcillosa – arenosa de color café claro. El espesor de aluviones en la parte alta cerca del contacto con los lahares, presenta unos 3,5 a 4,0 m; conforme se desciende en el cauce del río Peje el espesor va aumentando. La Fotografía 3.16 fue tomada en las coordenadas 230.760 N y 581.675 E, y en ella se observa la matriz arcillosa de color café claro y los bloques centimétricos.

Aguas abajo del río Peje, las secuencias de aluviones son más espesas y es posible observar varios eventos de depósitos fluviales. Un ejemplo se observa en la Fotografía 3.17, donde los clastos son angulares de esfericidad baja, en matriz arcillosa en un 50% a 60% del depósito. Los eventos se diferencian por las granulometrías que se vuelven más finas o más gruesas y la cantidad de matriz. Los contactos entre depósitos permite el afloramiento de agua como se puedo observar en varios puntos a lo largo del cauce. La Fotografía 3.18 muestra un contacto entre eventos de depósitos de aluviones; estas zonas de contacto permiten el afloramiento esporádico de agua.

En los alrededores de la zona donde descargan las nacientes captadas para la comunidad de El Cairo. Se pudieron observar afloramientos de aluviones medios, compuestos por clastos volcánicos en matriz arcillosa y limosa de color café oscuro debido al alto contenido

de materia orgánica, el promedio de los diámetros es de unos 10 cm, son bastante redondeados y esféricos, que evidencian un alto grado de transporte (ver Fotografía 3.19).

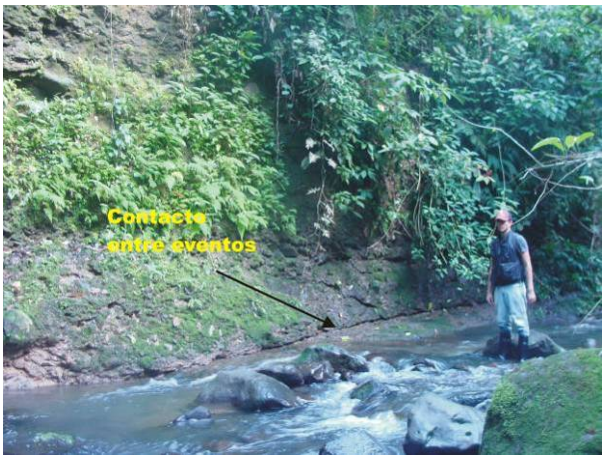
Fotografía 3.16: Vista de un afloramiento de aluviones en las coordenadas 230.760 N y 581.675 E.



Fotografía 3.17: Afloramiento de secuencias de aluviones en las coordenadas 232.406 N y 583.686 E.

En los cortes de los drenajes agrícolas de la Finca Ojo de Agua se pueden observar afloramientos de aluviones medios como se observa en la Fotografía 3.20. Están englobados en matriz arcillosa de color café oscuro, con una cobertura muy baja de suelo orgánico, debido a que fue removido para el cultivo de la piña. Los bloques tienen diámetros de 10 a 15 cm, están alterados y son de composición volcánica.

Se cuenta con cinco reportes de perforación de pozos en la zona de la Empresa FRUCTA S.A. Tres de los pozos tienen profundidades entre 27, 25 y 20 m (pozos BO – 14, BO – 16 y BO – 17 respectivamente), todos son pozos surgentes de acuerdo con el informe de perforación. El pozo BO – 15 tiene una profundidad de 42 m. El pozo BO – 18 pertenece al a Hacienda Ojo de Agua y tiene 15 m de profundidad. De acuerdo con los registros litológicos, todos los pozos captan secuencias de depósitos aluviales únicamente, de granulometrías medianas y gruesas.



Fotografía 3.18: Vista de un ejemplo de contacto entre diferentes eventos de depósitos de aluviones en las coordenadas 230.984 N y 582.176 E.

Fotografía 3.19: Vista de afloramientos en superficie de aluviones recientes en los alrededores de las nacientes de El Cairo, en las coordenadas 233.810 N y 585.810 E.

Fotografía 3.20: Vista de los drenajes agrícolas y los afloramientos de aluviones medios que conforman la superficie del terreno donde se cultiva la piña en la Finca Ojo de Agua.

3.3 Condiciones estructurales de la zona de estudio

La parte alta de las cuencas, en especial de la cuenca del río Destierro está conformada por una serie de estructuras tectónicas tales como fallas y pliegues, la mayoría asociada a la actividad de los volcanes Turrialba e Irazú, presentan rumbos NE-SO, N-S y NO-SE.

La principal estructura tectónica presente en los alrededores de la zona es la falla Guápiles – Siquirres – Matina. Tiene un rumbo casi paralelo a la carretera Braulio Carrillo, es una falla regional de tipo inversa, que delimita la zona transicional entre la llanura aluvial y los materiales volcánicos productos de la actividad de los volcanes Turrialba y Dos Novillos hacia la zona de Guácimo y al volcán Irazú hacia la parte de Pococí, continua luego hacia el norte de los volcanes Barva y Poás hasta casi llegar a Ciudad Quesada.

Una de las evidencias más fuertes en la zona es el cambio brusco en el cauce del río Reventazón al este, cerca del poblado de La Gloria, el río presenta una curvatura casi de 90° hacia el este y luego retorno el rumbo hacia el NE en otro ángulo de casi 90°. Una proyección de este supuesto lineamiento, cruzaría por el frente de colada Dos Novillos 2 y explicaría además el quiebre brusco en el cauce del río Destierro. Justo en la zona donde se interpreta que cruza la falla inversa, existen en los bordes del río Destierro depósitos muy gruesos de varias decenas de metros de aluviones e incluso una terraza aluvial levantada.

4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.

4.1 Exploración geofísica en la cuenca del río Destierro

Se realizaron un total de 6 sondeos eléctricos verticales dentro de la zona de estudio en la cuenca del río Destierro. La ubicación de los sondeos se centró en lo que se definiría como la zona de influencia de las nacientes captadas para Milano en la margen derecha del río Destierro. (Ver Figura 4.1)

Para el SEV #1 ubicado más al noreste, se describen en total 7 capas eléctricas. Las primeros 4 capas corresponden con un espesor de 9,01 m de aluviones recientes, serían bloques de aluviones con matriz arenosa como los observados en el corte al norte de las instalaciones de CODELA o bien en el corte de la toma de la naciente #1. Las resistividades son del orden de 400 hasta 1800 Ohm – m y se estima que no están saturadas. La capa con menor resistividad de 68 Ohm – m y de 20 m de espesor se correlaciona con aluviones recientes saturados y de granulometría gruesa en matriz arenosa. A una profundidad de 29 m aparece lo que sugiere sería el techo de las brechas de las lavas del Terciario observadas en el cauce del río Destierro, tiene un espesor de 44 m, la resistividad es alta de 195 Ohm – m, lo que sugiere que pueden ser rocas no saturadas de granulometrías gruesas. La unidad inferior ubicada a 73 m de profundidad tiene resistividad de 65 Ohm – m y se puede asociar a las capas de lavas fracturadas y saturadas.

Los SEV #2 y #3 presentan 6 y 7 capas respectivamente. Las capas superiores de aluviones recientes no saturados tienen espesores de mínimo 4,92 m y máximo 10,66 m en el

SEV #3. Estas capas superiores presentan valores de resistividad altos de más de 100 Ohm – m y hasta 685 Ohm – m. Se describen como aluviones finos en matriz areno limosa y con bloques pequeños. En el SEV #2 continua una capa de 34 m de espesor con resistividades de 85 a 285 Ohm – m que sugiere la presencia de aluviones gruesos saturados, con bloques medianos en matriz arenosa limosa y finalmente a una profundidad de 39m aparecen brechas de coladas con resistividades de 108 a 350 Ohm – m, la capa más inferior sugiere la presencia de lavas fracturadas con resistividades de 60 Ohm – m.

El SEV #3 presenta por debajo de los aluviones recientes, un espesor de 19 m de aluviones saturados, con bloques pequeños y en matriz arenosa, con resistividad de 202 Ohm – m. Por debajo de esta capa aparece lo que sugiere son las brechas de coladas Terciarias, a 30 m de profundidad, con un espesor de 62 m y resistividades de 91 Ohm – m, son más porosas y posiblemente saturadas.

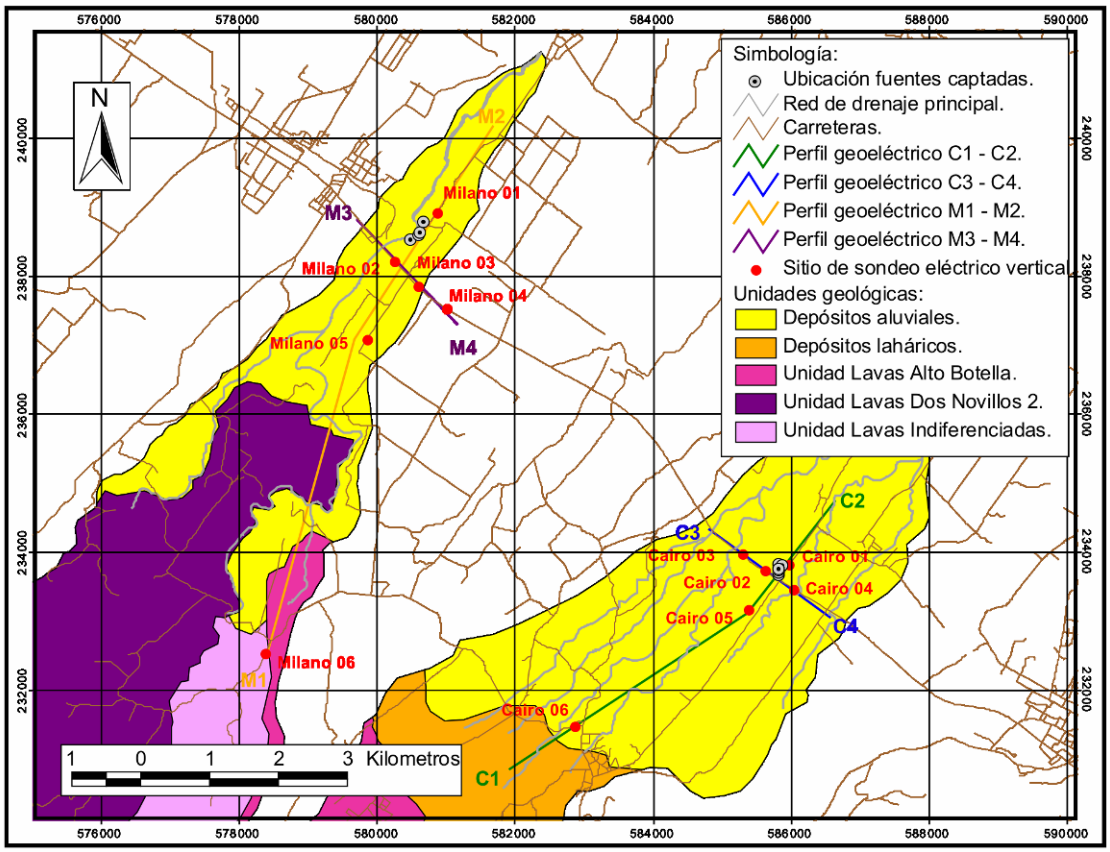


Figura 4.1: Ubicación de los sondeos eléctricos verticales y ubicación de los perfiles

El SEV #4 presenta condiciones ligeramente distintas, las resistividades de las capas son altas de más de 100 Ohm – m y que se describen como aluviones recientes de granulometrías gruesas en matriz areno limosa y que a 29 m de profundidad sobreyacen lo que sugiere se trata de brechas de coladas Terciarias o lahares, las resistividades son menores que las capas superiores, en este caso de 90 Ohm – m.

El SEV #5 se ubica ligeramente más al suroeste que el resto de los sondeos descritos. Se describen 8 capas en total. Las 3 capas superiores que en conjunto tiene un espesor de 5,1 m consisten de los aluviones finos y suelos observados en los drenajes agrícolas de la Finca Frutex. Son de matriz areno limosa y con bloques esparcidos de tamaños centimétricos. Luego aparece una capa de 62 m de espesor que serían los aluviones recientes que se observan en el corte del cañón del río Destierro. Son de granulometría gruesa englobados en matriz arenosa y limosa, con resistividades de 90 a 130 Ohm - m posiblemente saturados. A los 67 m de profundidad se describen lahares o brechas de coladas, materiales compuestos por bloques medianos en matriz arenosa que se extienden hasta los 102 m de profundidad.

El SEV #6 se ubica en la cota de los 300 m sobre el nivel del mar, en las cercanías del pueblo San Bosco, es el sondeo más al suroeste y se realiza para conocer los espesores de las unidades aquí descritas. Este sondeo se ubica por encima de la colada de lava Alto Botella. Las primeras dos capas consisten de suelos con boques de lava grandes, típico de la zona de brecha superior, el espesor es de 1,54m. Continua luego una capa de 3,8m de espesor con una resistividad de 2295 Ohm – m que se correlaciona con un bloque de lava densa sobre bloques de lava más pequeños, de 3,9m de espesor y resistividades menores. A partir de los 9,54 m de espesor comienza lo que sería la posible brecha superior de la colada, muy fracturada, saturada y con resistividades de 90 Ohm – m con un espesor de 55m. El núcleo de la colada se esperaría que fuera más denso y por ende con resistividades mayores. A los 65 m aproximadamente aparecen bloques densos con resistividades muy altas de 2000 Ohm – m, como no se conoce la profundidad de esta capa, bien se podría correlacionar con el núcleo de la colada.

4.2 Exploración geofísica en la cuenca del río Peje

Se llevaron a cabo 6 sondeos eléctricos verticales (SEV) dentro del área de estudio de la cuenca del río Peje. Los sondeos se concentraron en la zona de influencia directa de las nacientes de El Cairo, con el propósito de conocer más a fondo la estratigrafía y la hidrogeología. Solamente un sondeo eléctrico se realizado en la parte alta de la cota de los 300 m.s.n.m., los restantes cinco sondeos se hicieron en las cercanías de la carretera Braulio Carrillo y otras aledañas. Se cuenta con información de los registros litológicos de los pozos de la empresa FRUCTA (BO – 14, BO – 15, BO – 16 y BO – 17) y otro de la empresa Hacienda Ojo de Agua (BO – 18), los cuales servirán para realizar las respectivas correlaciones con las capas geo – eléctricas que aparecen en los sondeos geofísicos.

El SEV #1 está prácticamente en línea con la ubicación de las nacientes principales, cabe señalar que la zona de captaciones incluye alrededor de 6 nacientes, unas pertenecen al acueducto de El Cairo y otros al de La Luisiana. La profundidad de exploración fue de 71 m y se encontraron alrededor de 6 capas resistivas. Los primeros 22 m de profundidad están conformados por materiales coluvio aluviales, bloques de varios tamaños englobados en matriz arenosa a limosa, con resistividades que van de los 163 a los 880 Omh – m. Continúa hasta la profundidad de exploración capas de lahares meteorizados con alto contenido de arcillas, con resistividades inferiores de 61 y 28 Ohm – m.

El SEV #2 se ubica sobre la carretera Braulio Carrillo, la profundidad de exploración es de 72 m y se interpretan 7 capas resistivas en total. Las 4 capas superiores consisten de materiales coluvio aluviales con variedad de bloques en cuanto a tamaño, englobados en matriz

areno limosa, con resistividades que varían entre 67 Ohm – m para los más finos hasta 165 y 820 Ohm – m para los más gruesos y saturados en agua, el espesor llega hasta los 9,6m. La capa inferior con resistividades de 30 Ohm – m corresponde con aluviones finos a medianos y saturados, alcanza hasta los 26 m. La capa inferior se asocia a lahares en matriz arenosa y resistividades de 260 Ohm – m con un espesor de 46 m. La capa inferior con resistividad de 16 Ohm – m corresponde a lahares con matriz arcillosa.

Para el caso del SEV #3 ubicado más al noroeste del perfil, se alcanzó una profundidad de 62 m de exploración. Las capas superiores no saturadas y más bien húmedas, tienen resistividades altas de 350 y 110 Ohm – m y un espesor de casi 5 m. Las siguientes 2 capas tienen resistividades de 61 y 86 Ohm – m para un espesor de 29 m, corresponden con depósitos coluvio aluviales de bloques finos a medianos en matriz areno limosa y arcillosa. A partir de los 34 m aparece una capa con una resistividad de 332 Ohm – m y un espesor de casi 8 m, de lo que se supone son rellenos coluvio – aluviales pero de granulometrías más gruesas que las sobreyacientes. Es a partir de los 42 m que aparecen los lahares en matriz arcillosa, con una resistividad de 33 Ohm - m y un espesor hasta la profundidad de exploración.

Para los casos de los sondeos 1, 2 y 3 se puede utilizar la información de los pozos de la empresa FRUCTA para las correlaciones al encontrarse todos muy cerca de los puntos de exploración. Los pozos BO – 14, BO – 16 y BO – 17 alcanzan una profundidad entre 20 y 27 m, en todos se describe una secuencia de “aluviones grandes y medianos” o bien, depósitos coluvio – aluviales gruesos y medios. Todos estos pozos presentan una condición de niveles freáticos surgentes. En ninguno de los pozos se describen capas de lahares.

Por su parte, el pozo BO - 15 alcanzó una profundidad de 42 m, no se describe cambios litológicos ni contactos con capas de lahares, como si sucede con los sondeos eléctricos y específicamente el SEV #3 ubicado más cerca de este pozo, donde a partir de los 42 m aparecen capas asociadas con lahares.

El SEV #4 se ubica al sureste sobre la carretera Braulio Carrillo, se llegó hasta una profundidad de exploración de 80 m. Las 4 capas superiores con un espesor de 8 m corresponden con rellenos de materiales coluvio – aluviales, posiblemente secos o húmedos, de granulometrías gruesas, con resistividades muy altas de 235 Ohm – m y hasta 1465 Ohm – m. La capa inferior al parecer es bastante homogénea, tiene un espesor de 72 m y una resistividad de 120 Ohm – m, la cual se interpreta como relleno coluvio – aluviales de granulometría fina y en matriz areno limosa. Es hasta los 80m donde aparece lo que se interpreta como lahares. Cabe señalar que el espesor de rellenos coluvio – aluviales son más altos hacia la parte sureste de la cuenca, en la margen derecha del río Peje.

El SEV #5 se ubica sobre la carretera que va hacia La Gloria, cerca de la Hacienda Ojo de Agua. Este sondeo alcanzó una profundidad de 83 m. Las primeras 3 capas con un espesor de casi 5 m tienen resistividades altas de 200 hasta 2100 Ohm – m y se interpreta como rellenos coluvio – aluviales gruesos y posiblemente secos. Aparece luego una capa con 31 m de espesor de sedimentos coluvio – aluviales finos a medios con resistividad de 98 Ohm – m. Es a partir de los 36 m que aparece capas que se interpretan como lahares en matriz arenosa, ya que las resistividades son altas de 316 Ohm – m y finalmente una capa de lahares en matriz arcillosa con resistividad de 30 Ohm – m y a una profundidad de 83 m.

El pozo BO – 18 tiene solamente 15 m de profundidad, las descripciones litológicos coinciden con la capa 4 del SEV #5 interpretada como rellenos coluvio – aluviales finos a medios.

El SEV #6 se realizó sobre la cota de los 300 m de altura con el fin de conocer más sobre la estratigrafía de la parte media de la cuenca en estudio. Este sondeo alcanzó una profundidad de 60 m. En general las capas encontradas presentan resistividades altas. Las capas superiores con un espesor total de 5,2 m son rellenos coluvio – aluviales gruesos y secos, las resistividades van de 186 a 528 Ohm – m. La capa subyaciente corresponde igualmente con rellenos coluvio – aluviales pero en matriz limosa y de granulometría media, la resistividad es de 66 Ohm – m y aparece hasta los 20 m de profundidad. Los siguientes 40 m de profundidad están correlacionados a rellenos coluvio – aluviales de grano grueso con resistividades de 200 y 250 Ohm – m.

La exploración geofísica permite determinar que la unidad superior que conforma la cuenca del río Peje en estudio está conformada por sedimentos coluvio – aluviales de granulometrías variadas y con espesores que alcanza varias decenas de metros. Dentro de esta capa se ubican las nacientes captadas de los acueductos El Cairo y La Luisiana. Hacia la parte noreste de la cuenca presentan niveles superiores confinados que provocan la surgencia en los pozos que solo captan el espesor de aluviones superior.

De acuerdo con las observaciones de campo y el levantamiento geológico, la unidad inferior a los rellenos coluvio – aluviales está asociada a gruesas capas de lahares, los cuales se caracterizan por la matriz arenosa a arcillosa, son de baja permeabilidad aunque no se descarta que estén saturados. Posiblemente sobreyacen otras unidades aún más antiguas de lavas.

4.3 Perfiles geoeléctricos.

A partir de la información bibliográfica recopilada, las observaciones de campo, el levantamiento geológico y los resultados obtenidos con la prospección geo – eléctrica, se realizaron dos perfiles para cada cuenca analizada, los cuales se indican a continuación:

- Cuenca del río Peje:
    - Perfil geoeléctrico longitudinal C1 – C2. (Figura 4.2)
    - Perfil geoeléctrico transversal C3 – C4. (Figura 4.3)
- Cuenca del río Destierro:
    - Perfil geoeléctrico longitudinal M1 – M2. (Figura 4.4)
    - Perfil geoeléctrico transversal M3 – M4. (Figura 4.5)

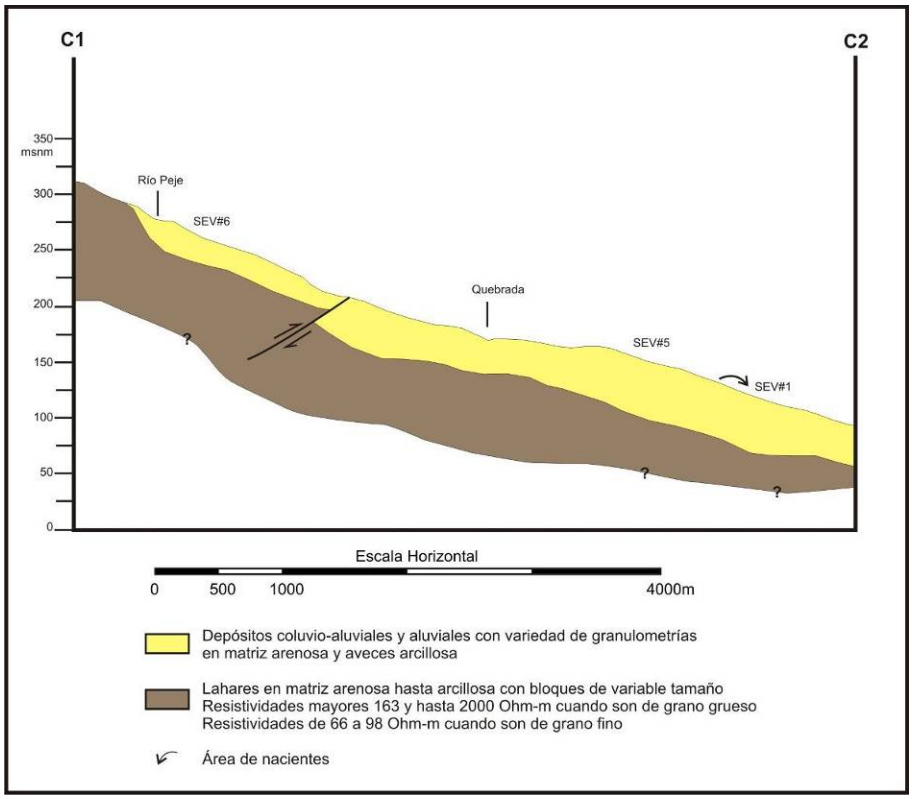


Figura 4.2: Perfil geoeléctrico longitudinal C1 – C2. Cuenca del río Peje.

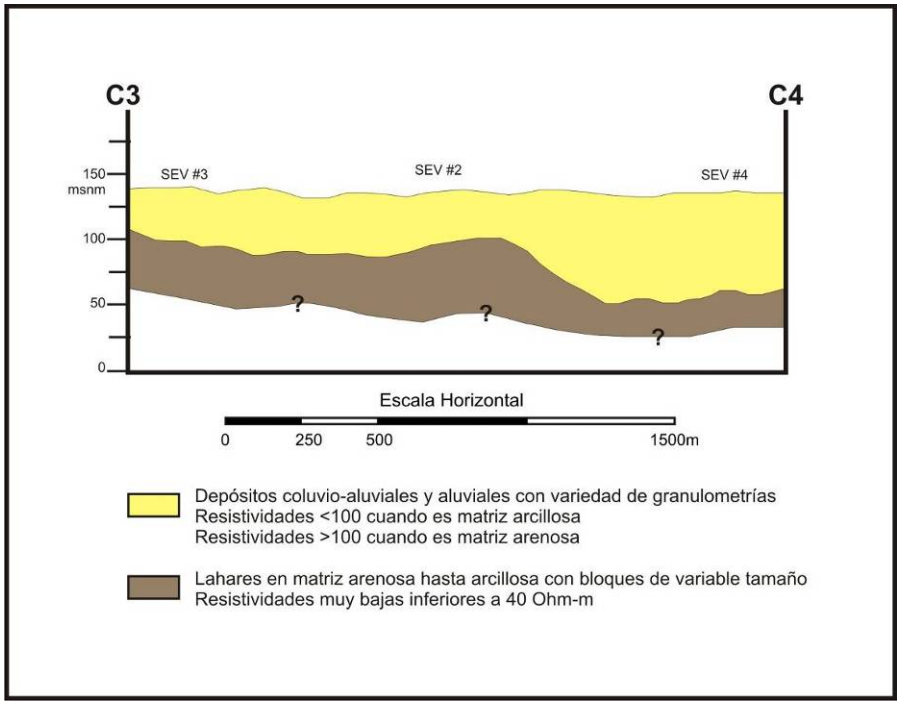


Figura 4.3: perfil geoeléctrico transversal C3 – C4. Cuenca del río Peje.

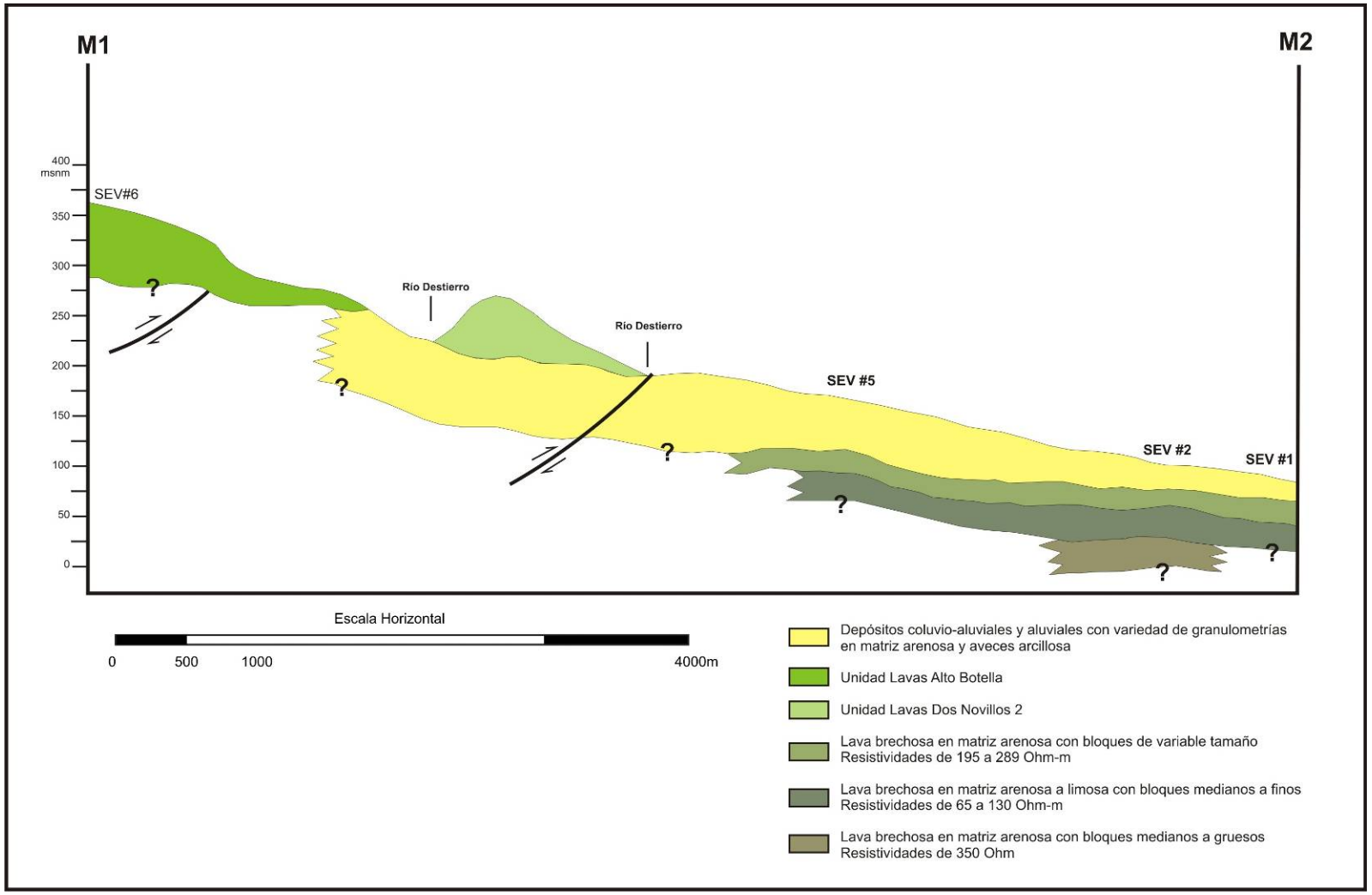


Figura 4.4: perfil geoeléctrico longitudinal M1 – M2. Cuenca del río Destierro.

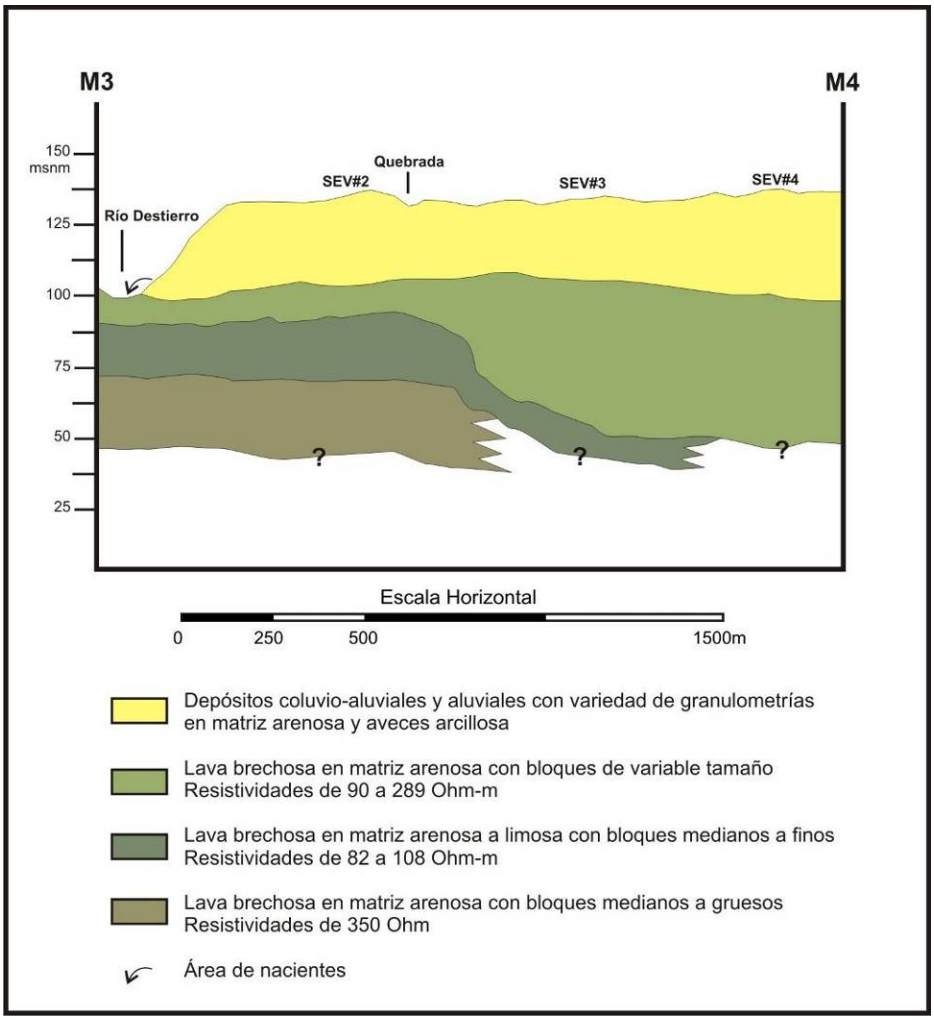


Figura 4.5: perfil geoeléctrico transversal M3 – M4. Cuenca del río Destierro.

5 HIDROLOGÍA

En este capítulo se realiza una descripción de las características hidrológicas del área de estudio definida para las cuencas de los ríos Peje y Destierro, tales como aforos, balance hídrico de suelos, pruebas de infiltración, etc. A través de las pruebas de infiltración se pretende determinar la capacidad de infiltración de los suelos así como determinar las zonas en las cuales ocurre una recarga preferencial al acuífero; el balance hídrico permite cuantificar la recarga por infiltración al acuífero; también se pretende establecer si existe una conexión hidráulica entre el acuífero y los ríos Peje y Destierro. De acuerdo a la descripción geológica del área de las dos cuencas, la unidad que corresponde al acuífero es la unidad de depósitos aluviales, por lo que la zona de interés en lo que resta del estudio se concentrará en esta unidad geológica.

5.1 Meteorología

Los datos meteorológicos de precipitación, temperatura, brillo solar, fueron obtenidos a través del Instituto Meteorológico Nacional y de la Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda (EARTH). El Cuadro 5.1 se muestra los datos de ubicación de las estaciones y su correspondiente elevación.

Cuadro 5.1: Localización de las estaciones meteorológicas

Estación		Coordenadas		Elevación (m.s.n.m.)
Nombre	Número	Latitud Norte	Longitud Oeste	
Estación Hacienda El Carmen	73091	10°12'	83° 29'	15
Estación El Cairo	73009	10°07'	83° 32'	60
Estación EARTH	73126	10°12' 45"	83° 35' 38"	59

5.1.1 Precipitación

Las cuencas de los ríos Peje y Destierro se caracterizan por presentar altas precipitaciones a lo largo de todo el año, siendo la precipitación total anual de 3813 mm en la Estación de El Carmen (período 1972 – 2007); en la estación del El Cairo (período 1938 – 1968) la precipitación total anual es de 3863 mm y en la estación de la EARTH (período 1996 – 2008) es de 3885 mm. Las lluvias se caracterizan por ser muy intensas y de corta duración. Prácticamente llueve todos los meses del año, sin embargo los meses de febrero, marzo y septiembre, octubre son los meses menos lluviosos del año.

El Instituto Meteorológico Nacional proporcionó datos correspondientes a la estación meteorológica Hacienda El Carmen, para la cual se reportan únicamente datos de promedios mensuales de precipitación para el período comprendido entre 1972 y 2007 (Figura 5.1).

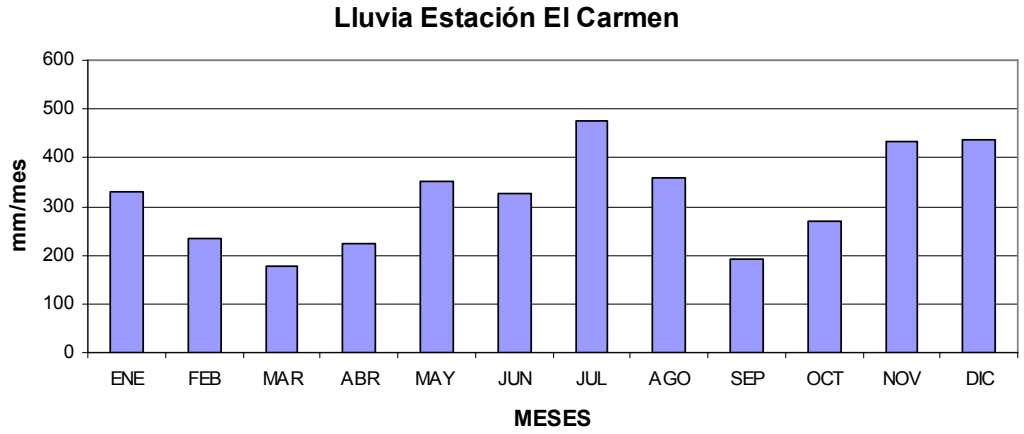


Figura 5.1: Precipitación mensual estación El Carmen (Años 1972 a 2007)

El AyA suministró datos de la Estación El Cairo cuyo período de lecturas es el comprendido entre 1938 y 1968 (Figura 5.3). Actualmente, esta estación del Instituto Meteorológico Nacional se encuentra cerrada.

La EARTH, suministró datos de precipitación promedio mensual para el período comprendido entre 1996 y 2008 (Figura 5.4).

En la Figura 5.2 se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas con respecto al área de estudio.

Las tres estaciones consideradas tienen un promedio anual muy similar, la estación de El Cairo y El Carmen muestran promedios mensuales muy similares, lo anterior probablemente debido a la cercanía entre una y otra, además que las condiciones topográficas también son muy similares, esto se aprecia en la Figura 5.5. Tomando en cuenta estas circunstancias, se propondrá utilizar el promedio mensual de las precipitaciones para la cuenca del Río Peje y en el caso de la cuenca del Río Destierro se propone utilizar únicamente la estación de la EARTH.

Según los datos de precipitación de estas estaciones, y como lo muestran los gráficos anteriores, el mes menos lluvioso es marzo. Los meses más lluviosos para las estaciones de El Cairo y El Carmen son julio, noviembre y diciembre; en la estación de la EARTH es el mes de noviembre. La información de los datos de las estaciones mencionadas se muestra en el anexo 8.

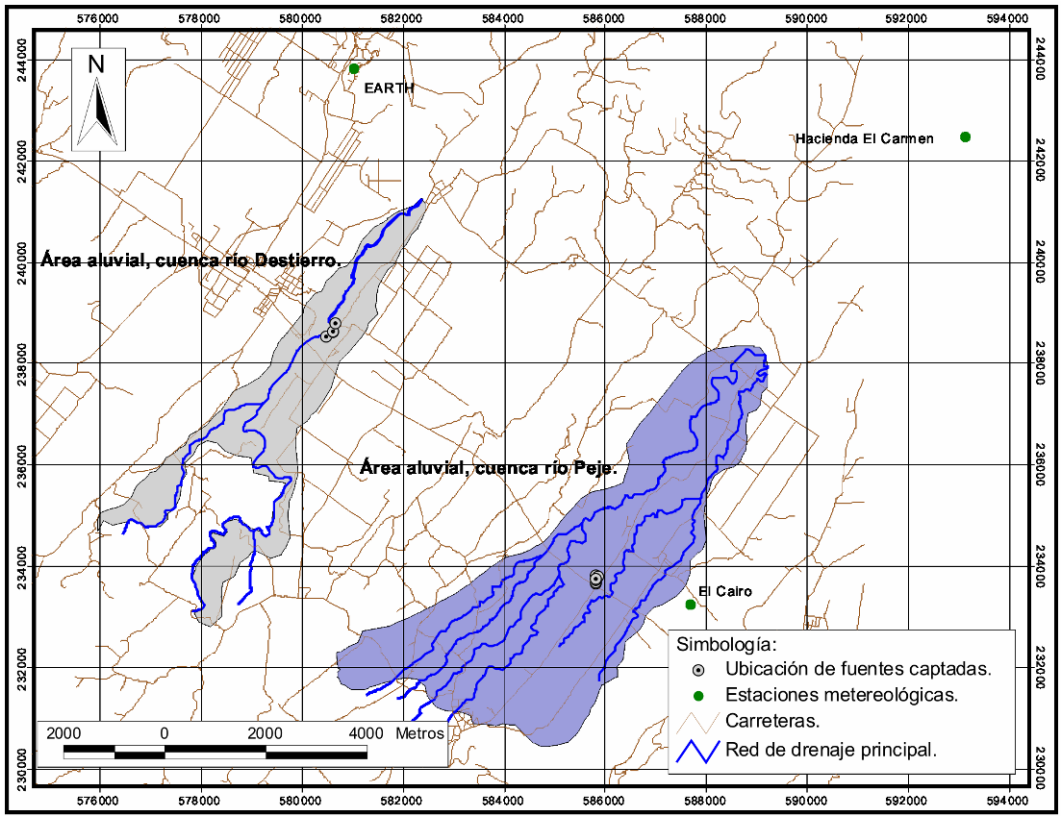


Figura 5.2: Ubicación de las estaciones meteorológicas Earth, El Carmen y El Cairo.

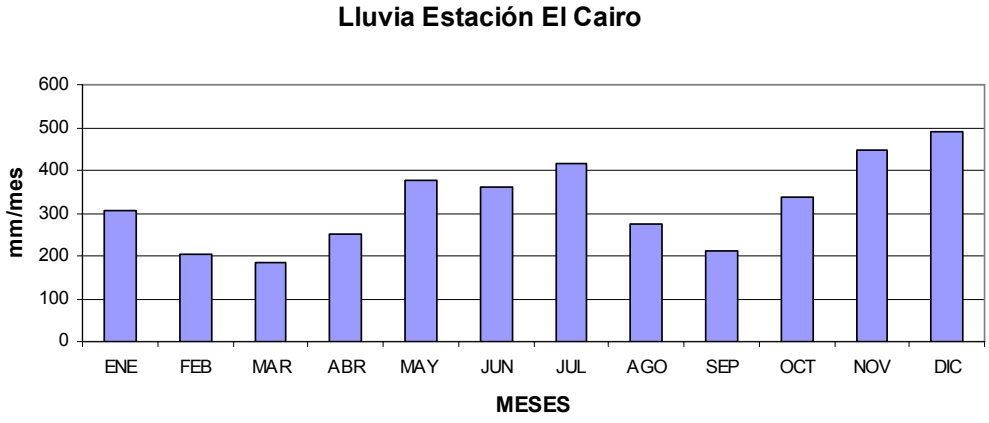


Figura 5.3: Precipitación mensual estación El Cairo (Años 1938 a 1968)

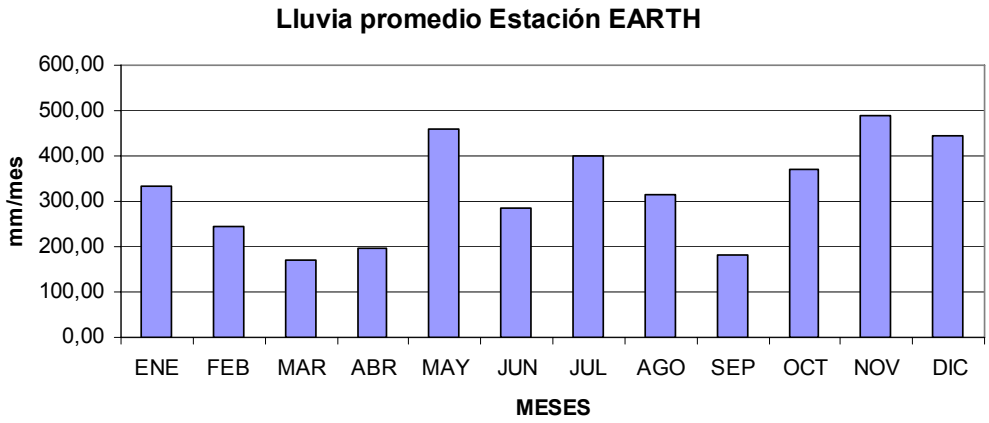


Figura 5.4: Precipitación mensual estación EARTH (Años 1996 a 2008)

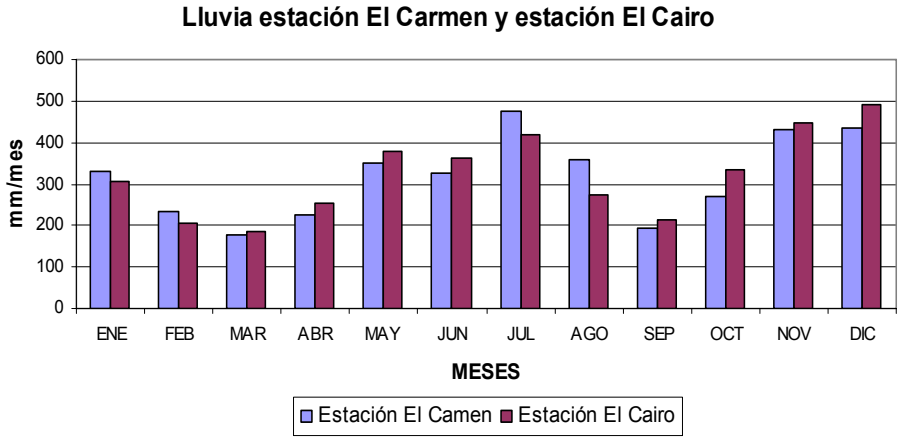


Figura 5.5: Precipitación mensual estación El Carmen y El Cairo

5.1.2 Temperatura

Los valores de temperatura registrados en Costa Rica responden principalmente a la posición geográfica del país, cuyas latitudes la ubican en las regiones en donde predomina el clima tropical. En la Figura 5.6 se muestra la variación de la temperatura promedio mensual, temperatura mínima y máxima de la estación El Carmen y en la Figura 5.7 se muestra la variación de la temperatura promedio mensual, temperatura mínima y máxima de la estación EARTH. En la estación del El Cairo no se registraron valores de temperatura.

Se puede notar que los meses más cálidos corresponden a septiembre y octubre, y los menos calientes a diciembre y enero. En general las temperaturas media mensual de la zona oscilan entre los 23,8 y 26,5 °C para la estación El Carmen y para la estación de la EARTH oscila entre los 24,9 y 27,0 °C; la temperatura ambiente mantiene un promedio de 26,2 °C anual para la estación El Carmen y de 25,0 °C para la estación de la EARTH sin presentar variaciones significativas mensualmente. En cuanto a temperaturas máximas y mínimas, en la estación de El Carmen el rango oscila entre 20,2 a 22,5 °C las mínimas y las máximas entre 29,7 a 31,6 °C. En tanto la estación de la EARTH el rango de temperaturas máximas oscila entre 30,5 a 32,5 °C y las mínimas entre 17,6 a 21,1 °C.

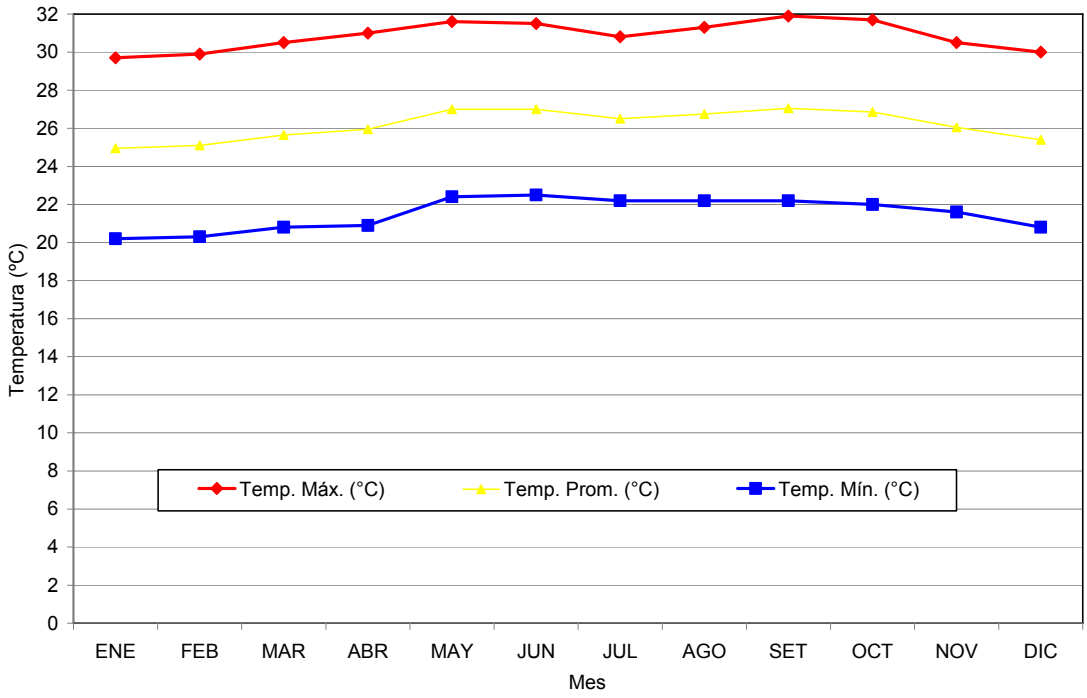


Figura 5.6: Temperatura media mensual estación El Carmen (Años 1972 a 2007)

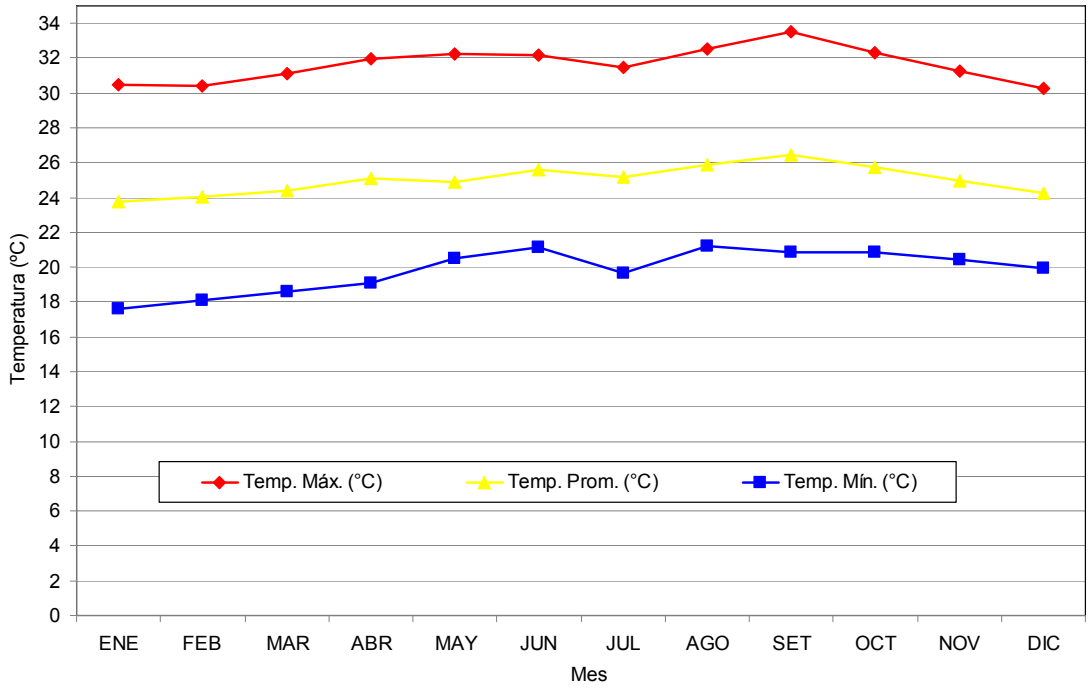


Figura 5.7: Temperatura media mensual estación EARTH (Años 1996 a 2008)

5.1.3 Brillo Solar y radiación solar

Se tienen registros de brillo solar (periodo 1973 a 2007) y radiación solar (periodo1979 a 1982) en la estación Hacienda El Carmen, del Instituto Meteorológico Nacional, cuyos datos se aportan en el Cuadro 5.2; la distribución en el tiempo de estos parámetros se observan en la Figura 5.8. La estación de El Cairo y EARTH no presentan datos de Brillo solar.

Cuadro 5.2: Brillo solar estación Hacienda El Carmen - Siquirres*

	Elementos	
Mes:	**Brillo solar (horas)**	**Radiación solar (Mjulios/m^2)**
Periodo:	**1973 – 2007**	**1979 – 1982**
Enero	4,80	15,00
Febrero	5,20	16,00
Marzo	5,20	18,00
Abril	5,40	17,00
Mayo	4,70	17,00
Junio	4,00	15,00
Julio	3,80	15,00
Agosto	4,20	16,00
Septiembre	4,90	17,00
Octubre	7,00	16,00

	Elementos	
Mes:	**Brillo solar (horas)**	**Radiación solar (Mjulios/m^2)**
Periodo:	**1973 – 2007**	**1979 – 1982**
Noviembre	4,10	14,00
Diciembre	4,30	14,00

*Instituto Meteorológico Nacional.
Datos promedios mensuales.
Brillo solar en horas y décimas de horas.
Radiación solar (Mjulio / m^2)

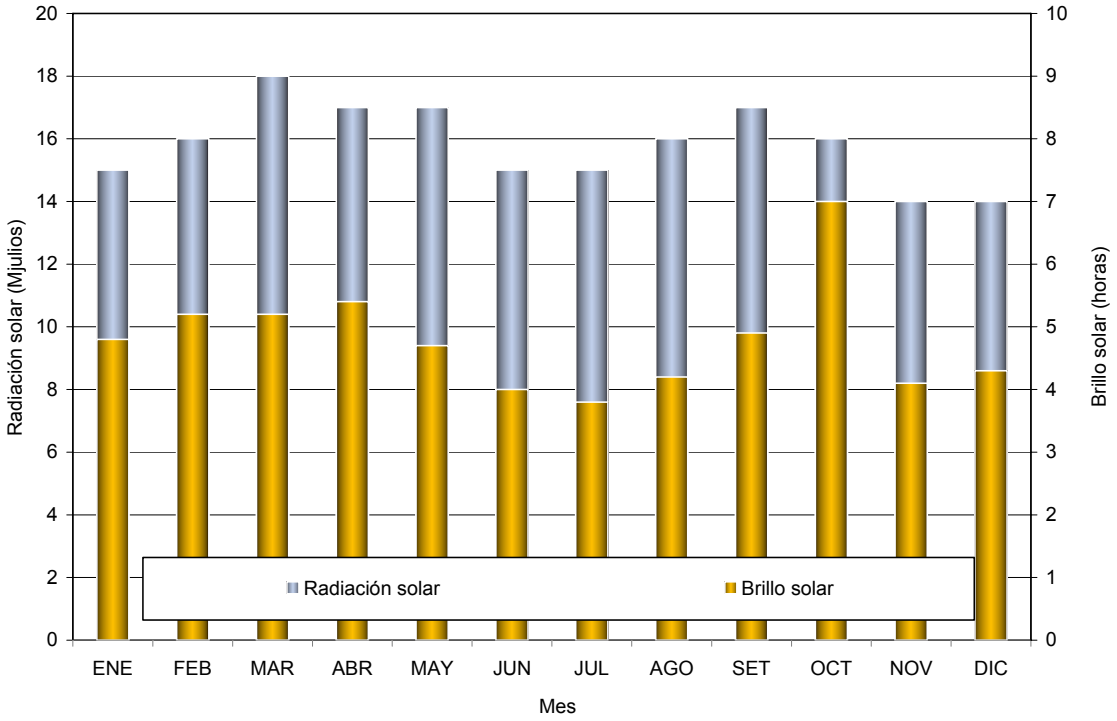


Figura 5.8: Radiación solar y brillo solar promedio mensual estación Hacienda El Carmen

5.2 Balance Hídrico de Suelos

5.2.1 Uso actual del suelo

Actualmente el uso del suelo es predominantemente agrícola especialmente en la parte baja de ambas cuencas, en donde se aprecian grandes extensiones de terreno cultivados de piña; estas tierras son utilizadas por varias corporaciones para la siembra y empacadoras de piña. Algunas de estas tierras han sido acondicionadas para el pastoreo de ganado de engorde, aunque en general se refieren a pequeñas áreas de uso particular.

La vegetación original que se encontraba donde están ahora las plantaciones de piña. Consistía en bosques densos, de composición florística mixta, con varios estratos arbóreos.

Para efectos de este estudio, el área se ha subdividido según sus usos predominantes, con el propósito de calcular la recarga potencial del acuífero y establecer potenciales impactos de las actividades sobre este recurso. Se establecieron 4 usos los cuales se definen a continuación:

- Bosque: Representa las áreas en donde prevalece una alta densidad de vegetación y donde prácticamente no se ha dado la intervención de alguna actividad humana.

- Cultivos: Son áreas en donde se ha presentado cultivo extensivo de plantación de piña principalmente, son zonas en donde ha habido un uso intensivo de la tierra y cuyo propósito son fines comerciales.

- Urbano: Corresponde a aquellas zonas en donde se han establecido pequeños núcleos de población y en donde la densidad de la misma es relativamente importante.

- Pasto: Se trata de vegetación con predominio de especies pioneras, con algunos árboles remanentes de las actividades anteriores o del bosque original. En su lugar la vegetación existente se refiere a pequeños arbustos, maleza y pasto. Estas áreas no son explotadas en relación a algún tipo de cultivo.

Para la elaboración del mapa de uso de suelo se eligieron las fotografías aéreas digitales del proyecto Carta 2005 en infrarrojo, las cuales permiten realizar una georeferenciación con un error medio cuadrático (RMS) de 10-15m en promedio y poseen un área de cobertura en terreno de 6 Km x 6 Km (36 Km^2), con una resolución de pixel de 2 m – 4 m. En los anexos se muestra el informe con la metodología empleada para la elaboración del mapa de uso de suelos.

Debido a que el objetivo principal es realizar una actualización del uso del suelo, el balance de pesos en el momento de escoger la fotografía aérea a utilizar recae sobre la fotografía más actualizada y reciente para la zona.

El tipo de proyecto presente se enfoca mas en una representación gráfica de los elementos por medio de polígonos, por lo tanto pasa a un segundo plano los pequeños errores inducidos por el factor de desplazamiento del relieve. Además, el área de estudio actual no presenta topografía irregular, que pueda inducir a grandes errores en cuanto áreas y distancias, sino que es una topografía relativamente plana (3.56% de inclinación) de la cota de 30 m.s.n.m. a la cota 300 m.s.n.m.

Se realizó una gira de comprobación de campo el día sábado 16 de mayo del 2009. Para la gira se contaba con un GPS tipo Garmin Oregon 300 con un desplazamiento de 4 m en promedio para ubicarse en la hoja cartográfica 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional (Hojas, Bonilla y Guácimo) además de las fotografías aéreas georeferenciadas impresas a escala 1: 10 000.

Durante el recorrido se recolectaron puntos de GPS y se marcaron en las fotografías los tipos de uso presentes. La escala para digitalizar se hizo en 1: 10 000 y los polígonos se digitalizaron con lógica topológica.

El Cuadro 5.3 aporta los datos de área cubierta por cada uno de los 4 tipos de uso de suelo establecidos para el área de estudio, la cual corresponde a la zona aluvial de cada cuenca. También se indica la distribución porcentual de estos usos en cada cuenca analizada.

Cuadro 5.3: Uso Actual del suelo en el área de estudio (zona aluvional)

Usos	Área de estudio Cuenca del Río Destierro		Área de estudio Cuenca del Río Peje	
	Área (Km^2)	%	Área (Km^2)	%
Bosque	3,32	32,35	6,99	28,96
Cultivos	2,57	25,05	4,12	17,04
Urbano	3,62	35,20	10,64	44,06
Pasto	0,76	7,40	2,40	9,94
TOTAL	**10,28**	**100,00**	**24,15**	**100,00**

5.2.2 Recarga

Para estimar la recarga al acuífero se recurre básicamente a la distribución de la precipitación en la zona y la correspondiente infiltración básica del suelo. El balance hídrico de suelos y la correspondiente estimación de la recarga al acuífero se realiza basado en el uso actual de la tierra y la geología local superficial. Para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual, se utilizó el modelo analítico propuesto por Schosinsky & Losilla (2000).

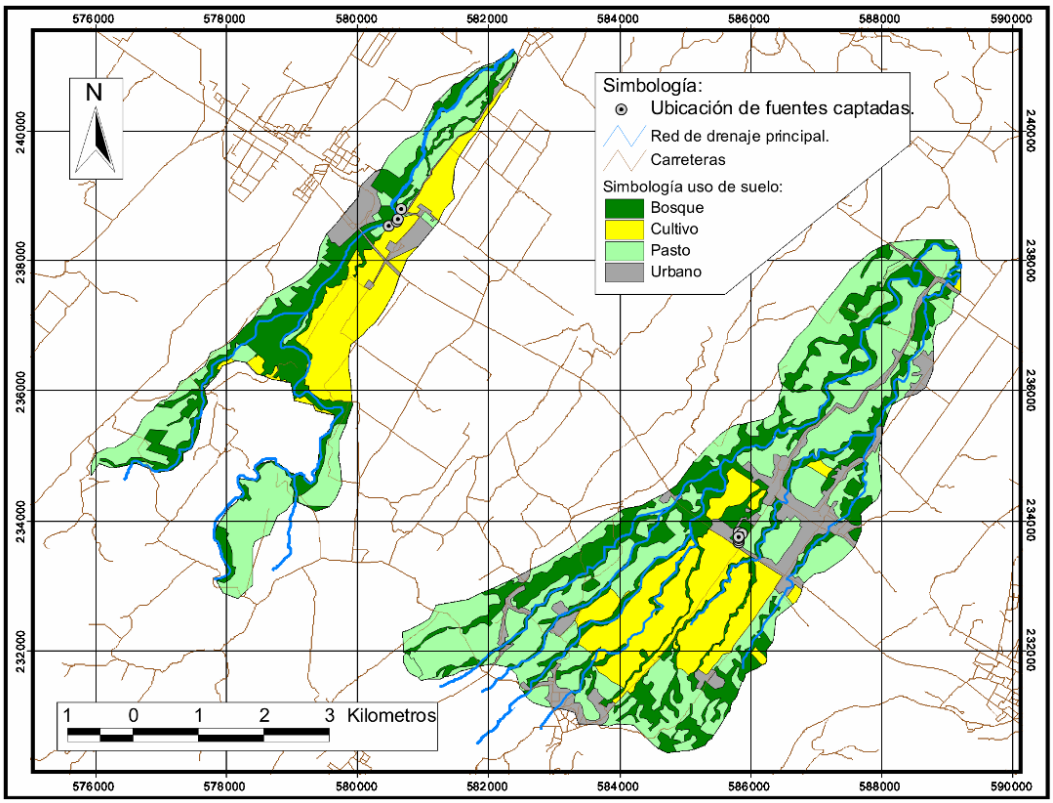


Figura 5.9: Mapa de uso del suelo en la zona de estudio

5.2.3 Infiltración

La capacidad de infiltración del suelo se determinó mediante ensayos tipo anillos concéntricos o método de Müntz (CUSTODIO & LLAMAS, 1983), el cual consiste en dos superficies cilíndricas abiertas por las dos bases y unidas entre sí para mantenerse concéntricas al hincarlas parcialmente en el terreno a una profundidad de unos 10 cm. Se añade un volumen conocido de agua y entre los dos cilindros se mantiene ese mismo nivel del agua. Midiendo los tiempos que tardan en infiltrarse los volúmenes de agua, se calcula la capacidad de infiltración.

Se realizaron 56 pruebas de infiltración utilizando el método de anillos concéntricos, distribuidas de la siguiente forma:

- En la parta baja de ambas cuencas y hasta la cota 300 msnm, se realizó una prueba por cada kilómetro cuadrado.
- Para la parte alta, se realizaron 5 ensayos para la cuenca del río Destierro y 3 para la cuenca del río Peje.

En el Cuadro 5.4 y en el Cuadro 5.5 se presentan los resultados para cada prueba. En el anexo 1 se muestran los cálculos de cada prueba de infiltración, para la obtención de cada coeficiente de infiltración los datos de campo se procesaron con la metodología de regresión logarítmica. En la Figura 5.10 se aprecian la ubicación de éstas pruebas en ambas cuencas.

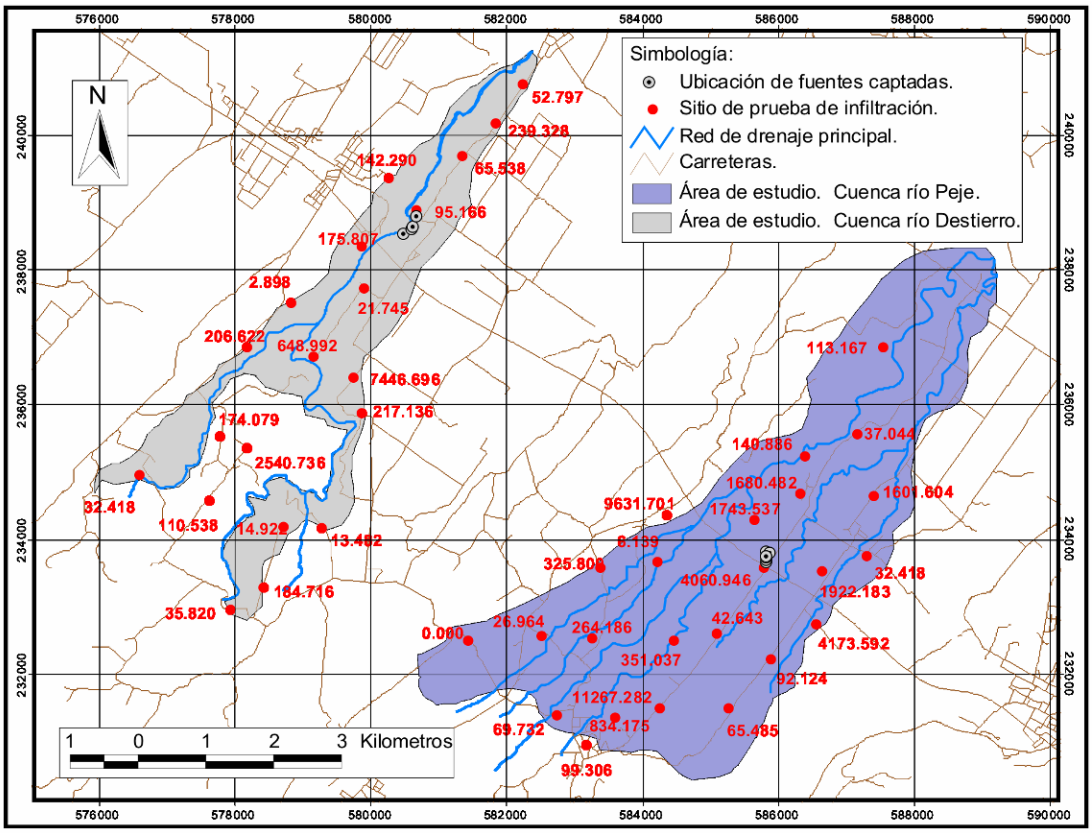


Figura 5.10: Ubicación de las pruebas de infiltración en ambas cuencas y toma de muestras para análisis de suelos

Cuadro 5.4: Coeficientes de infiltración en la cuenca del río Destierro.

Número de prueba	Altitud	CORDENADAS		UBICACIÓN/LUGAR	HOJA CART.	COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN (mm/d)
		Norte	Este			
1	63	241378	582559	Milano de Siquirres	GUACIMO	508
2	65	240750	582236	Milano de Siquirres	GUACIMO	53
3	73	240175	581845	Milano de Siquirres	GUACIMO	239
4	81	239692	581347	Calle a Milano	GUACIMO	66
5	114	238701	580757	Costado oeste Codela Milano	GUACIMO	95
6	107	239384	580280	Santa Emilia Pocora	GUACIMO	142
7	173	237498	578818	Argentina de Pocora	GUACIMO	3
8	128	238352	579888	Barrio El Carmen de Pocora	GUACIMO	176
9	184	236398	579743	Piñal del Monte hacia Portón Iberia	GUACIMO	7447
10	216	235822	579863	Piñal del Monte (Frutex) Pocora	GUACIMO	217
11	226	236448	577691	La Argentina de Pocora	GUACIMO	139
12	206	233576	583363	Calle Las Zúñigas, San Isidro, Herediana	GUACIMO	326
13	178	233668	584215	San Isidro	GUACIMO	6
14	279	234960	576592	La Argentina de Pocora	GUACIMO	32
15	340	233778	576140	Pocora Sur, Argentina	GUACIMO	0
16	266	234181	578661	San Bosco de Siquirres	GUACIMO	15
17	265	234164	579273	Portón Iberia, La Alegría de Siquirres	GUACIMO	13
18	337	232483	579336	Calle Vueltas, La Alegría	GUACIMO	43
19	319	233279	578405	San Bosco, La Alegría	GUACIMO	185
20	332	232966	577939	La Perla de San Bosco	GUACIMO	36
21	421	232611	576566	La Perla de San Bosco, Portón Iberia	GUACIMO	13
22	349	233636	577080	Quebrada Honda de Pocora	GUACIMO	12
23	350	232730	578453	San Bosco de Portón Iberia	GUACIMO	20
24	147	237735	579886	Detrás de la bodega central de Frutex	GUACIMO	22
25	299	234577	577608	Quebrada Honda de Pocora	GUACIMO	111
26	250	235528	577776	Quebrada Honda de Pocora	GUACIMO	174

Cuadro 5.5: Coeficientes de infiltración en la cuenca del río Peje.

Número de prueba	Altitud	CORDENADAS		UBICACIÓN/LUGAR	HOJA CART.	COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN (mm/d)
		Norte	Este			
27	103	234632	587406	Luisiana, El Cairo	BONILLA	1602
28	81	235132	588587	Luisiana, El Cairo	BONILLA	113
29	114	234544	586432	La Francia Siquirres	BONILLA	1680
30	89	235582	587110	La Francia Siquirres	BONILLA	37
31	96	235253	586353	Bº Acapulco, La Francia	BONILLA	141
32	132	234279	585637	Planta Fruta, Herediana	BONILLA	1744
33	166	234353	584352	Herediana, Siquirres	BONILLA	9632
34	279	232494	581423	Bº Los Ceibos, La Alegría	BONILLA	0
35	223	232606	582515	La Florida, SIQUIRRES	BONILLA	27
36	218	232527	583257	Bº Grano de Oro San Isidro	BONILLA	264
37	254	231351	583600	Asentamiento Manu	BONILLA	834
38	231	231498	584255	La Florida, SIQUIRRES	BONILLA	11267
39	221	231498	585299	Calle Fuentes, El Cairo	BONILLA	65
40	178	232225	585867	Calle Fuentes, El Cairo	BONILLA	92
41	157	232736	586550	Calle Malvina, El Cairo	BONILLA	4174
42	116	233780	587297	Las juntas el Cairo	BONILLA	32
43	136	233523	586641	Nuevo Cairo	BONILLA	1922
44	343	231251	580668	La Alegría, Siquirres	BONILLA	0
45	313	231364	581559	La Alegría, Siquirres	BONILLA	946

Número de prueba	Altitud	CORDENADAS		UBICACIÓN/LUGAR	HOJA CART.	COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN (mm/d)
		Norte	Este			
46	281	230952	583154	La Florida, Siquirres	BONILLA	99
47	170	236709	579151	Finca Frutex, Pocora	GUACIMO	649
48	204	236845	578168	La Argentina, Pocora	GUACIMO	207
49	262	235351	578171	Finca Mindoro, Pocora	GUACIMO	2541
50	140	233575	585782	Piñera, costado sur nacientes El Cairo	BONILLA	4061
51	193	232492	584454	Piñera Hacienda Ojo de Agua	BONILLA	351
52	186	232604	585084	Finca Ojo de Agua	BONILLA	43
53	394	230566	580253	La Alegría, SIQUIRRES	BONILLA	0
54	370	230431	581082	La Alegría, SIQUIRRES	BONILLA	1348
55	288	230835	582780	La Florida, SIQUIRRES	BONILLA	145
56	276	231399	582736	La Florida, SIQUIRRES	BONILLA	70

5.2.4 Análisis de suelos

En cada sitio en donde se efectuó cada prueba de infiltración se extrajo una muestra de suelo, la cual fue debidamente empacada y trasladada al respectivo laboratorio de suelos. En total se tomaron 56 muestras de suelo y se enviaron al laboratorio de suelos INTA del Ministerio de Agricultura y Ganadería en donde se realizaron ensayos para determinar la capacidad de campo, el punto de marchites y además se les solicitó que adicionalmente se determinara el contenido de materia orgánica; en el anexo 2 se muestran los resultados reportados por este laboratorio. También se envió por duplicado 56 muestras de suelo al laboratorio de suelos Technisoil Centroamericana S.A., a la cual se le encargó obtener los parámetros de granulometría, límites de atterberg, contenidos de humedad y densidad de suelos. En el anexo 3 se muestra el informe de este laboratorio. En la Figura 5.10 se muestra la ubicación de los sitios de toma de muestras en ambas cuencas.

Según los resultados de los análisis realizados a las 56 muestras de suelo (los cuales se observan en el Cuadro 5.6, estas corresponden con suelos cohesivos, color café amarillento o gris amarillento, de plasticidad alta o muy alta. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), todas las muestras se clasifican como limos de alta compresibilidad, MH. Granulométricamente, Badillo & Rodríguez (1991), indican que los suelos MH están compuestos por partículas finas, donde más del 50% de la muestra pasa la malla Nº 200, es decir, más del 50% tiene un diámetro menor o igual a 0,075 mm.

5.2.5 Aforos en ríos, quebradas y canales

Se realizó una campaña de aforos diferenciales a cada kilómetro a partir de la cota 300 m, hasta el límite inferior de cada cuenca, también se aforó el punto triple en la confluencia de los ríos. En la cuenca del Río Destierro se identificaron 5 canales que mantenían un caudal permanente, se hicieron 9 aforos en el río Destierro, 4 en la Quebrada Honda y 2 en el río Perla. Para la cuenca del Río Peje, no se hicieron aforos diferenciales en los canales, ya que éstos se encontraban secos; se realizaron 9 aforos en el río Peje, 5 en la quebrada Muralla, 6 en la quebrada El Cairo, 5 en la quebrada Once y 5 en el río Herediana. En el anexo 4 se muestran los datos y los cálculos de los respectivos caudales.

Cuadro 5.6: Resultados de los análisis de suelos.

Número de prueba	Coordenadas		Altura (msnm)	Plasticidad	Consistencia	Contenido de humedad	Límite líquido	Índice plástico	Capacidad de campo	Límite de marchitez	Clasificación SUCS	Densidad (gr/cm^3)	Cuenca
	Norte	Este											
1	230566	580253	394	Mediana a alta	Medianamente compacto	61%	84	26	39,7	22,8	MH	1,443	R. Peje
2	230431	581082	370	Muy alta	Blando y frágil	100%	147	53	38,4	23	MH	1,362	R. Peje
3	231251	580668	343	Alta	Poco compacto	74%	105	38	39	22,9	MH	1,389	R. Peje
4	231364	581559	313	Alta	Muy blanda	75%	114	47	39,2	23,1	MH	1,335	R. Peje
5	230835	582780	288	Alta	Semicompacta	63%	101	37	40,1	22,8	MH	1,416	R. Peje
6	230952	583164	281	Alta	Muy blanda	86%	126	45	39,3	23	MH	1,335	R. Peje
7	232494	581423	279	Alta	Muy blanda	79%	128	55	40,6	23,1	MH	1,335	R. Peje
8	231399	582736	276	Muy alta	Semicompacta	81%	136	48	39,8	22,9	MH	1,416	R. Peje
9	231351	583600	254	Alta	Muy blanda	65%	103	38	38,7	23,1	MH	1,335	R. Peje
10	231498	584255	231	Alta	Suelta	60%	104	44	42,2	21,5	MH	1,308	R. Peje
11	232606	582515	223	Alta	Semicompacta	63%	104	36	39,8	22	MH	1,416	R. Peje
12	231489	585299	221	Muy alta	Medianamente compacto	70%	124	55	44,2	21,9	MH	1,443	R. Peje
13	232527	583257	218	Alta	Poco compacto	62%	91	32	39,7	23,7	MH	1,389	R. Peje
14	233576	583363	206	Alta	Semicompacta	67%	91	30	39	22,9	MH	1,416	R. Peje
15	233668	584215	178	Mediana a alta	Medianamente compacto	55%	83	33	40,2	23,9	MH	1,443	R. Peje
16	232225	585876	178	Muy alta	Blando y frágil	62%	97	36	39,8	22,17	MH	1,362	R. Peje
17	234353	584352	166	Alta	Semicompacta	56%	88	33	41	20,99	MH	1,416	R. Peje
18	232736	586550	157	Alta		59%	90	28	43,7	21,83	MH	1,416	R. Peje
19	234279	585637	132	Alta		57%	85	26	45	23,9	MH	1,416	R. Peje
20	233523	586641	136	Mediana a alta	Semicompacta	57%	77	29	39,8	22,48	MH	1,416	R. Peje
21	233780	587297	116	Mediana a baja	Blando y frágil		68	25	38,8	21,02	MH	1,362	R. Peje
22	234544	586432	114	Mediana a baja	Blando y frágil		62	20	40,1	23,15	MH	1,362	R. Peje
23	234632	587406	103	Mediana a alta	Compacta	56%	66	16	45,1	23,3	MH	1,416	R. Destierro
24	235233	586353	96	Mediana a baja	Blando y frágil		66	20	40,2	22,5	MH	1,362	R. Destierro

Número de prueba	Coordenadas		Altura (msnm)	Plasticidad	Consistencia	Contenido de humedad	Límite líquido	Índice plástico	Capacidad de campo	Límite de marchitez	Clasificación SUCS	Densidad (gr/cm^3)	Cuenca
	Norte	Este											
25	235582	587110	89	Mediana a baja	Blando y frágil		73	27	39,2	21,8	MH	1,362	R. Destierro
26	235132	588587	81	Mediana a baja	Blando y frágil		66	23	39,6	22,7	MH	1,362	R. Destierro
27	232604	585089	186	Mediana a alta	Semicompacta		63	15	39,9	21,87	MH	1,416	R. Destierro
28	232492	584454	193	Mediana a alta	Semicompacta		68	20	44,6	21,98	MH	1,416	R. Destierro
29	233575	585782	140	Mediana a alta	Semicompacta		63	11	39,6	23,04	MH	1,416	R. Destierro
30	241378	582559	63	Mediana a alta	Semicompacta	47%	79	31	40	22,85	MH	1,416	R. Destierro
31	240750	582236	65	Alta	Poco compacto	52%	82	28	39,6	21,66	MH	1,389	R. Destierro
32	240175	581845	73	Alta	Poco compacto	50%	78	27	41,1	23,45	MH	1,389	R. Destierro
33	239692	581347	81	Alta	Semicompacta	70%	92	24	39,8	21,36	MH	1,416	R. Destierro
34	238701	580757	114	Mediana a alta	Semicompacta	48%	84	35	39,5	21,47	MH	1,416	R. Destierro
35	239384	580280	107	Muy alta	Muy blanda	131%	155	43	40,2	23,84	MH	1,335	R. Destierro
36	237498	578818	173	Muy alta	Semicompacta	129%	190	63	41,1	22,09	MH	1,416	R. Destierro
37	238352	579888	128	alta	Muy blanda	87%	129	46	44,3	23,42	MH	1,335	R. Destierro
38	236398	579743	184	mediana a alta	Semicompacta	49%	74	23	39,9	22,89	MH	1,416	R. Destierro
39	235822	579863	216	mediana a alta	Semicompacta	45%	63	19	37,7	20,09	MH	1,416	R. Destierro
40	230448	577691	226	alta	Semicompacta	79%	94	29	43,9	22,87	MH	1,416	R. Destierro
41	235528	577776	250	alta	Semicompacta	74%	96	36	39,7	21,38	MH	1,416	R. Destierro
42	234575	577616	310	alta	Semicompacta	62%	87	29	40,1	22,78	MH	1,416	R. Destierro
43	237735	579886	147	alta	Semicompacta	61%	78	24	44,2	22,41	MH	1,416	R. Destierro
44	232730	578453	350	alta	Semicompacta	78%	104	27	39,8	23,09	MH	1,416	R. Destierro
45	233636	577080	349	alta	Semicompacta	82%	97	31	40,5	22,87	MH	1,416	R. Destierro
46	232611	576566	421	alta	Semicompacta	98%	94	30	39	23,58	MH	1,416	R. Destierro
47	232966	577939	332	muy alta	Semicompacta	105%	120	39	40,6	23,91	MH	1,416	R. Destierro
48	233279	578405	319	muy alta	Semicompacta	96%	130	40	39,1	23,73	MH	1,416	R. Destierro
49	232483	579336	337	muy alta	Semicompacta	88%	122	36	43,8	22,46	MH	1,416	R. Destierro

Número de prueba	Coordenadas		Altura (msnm)	Plasticidad	Consistencia	Contenido de humedad	Límite líquido	Índice plástico	Capacidad de campo	Límite de marchitez	Clasificación SUCS	Densidad (gr/cm^3)	Cuenca
	Norte	Este											
50	234164	579273	265	mediana a baja	Blando y frágil		74	19	44	21,98	MH	1,362	R. Destierro
51	234181	578661	266	mediana a alta	Compacta	37%	66	8	45	22,09	MH	1,416	R. Destierro
52	234960	576592	279	mediana a baja	Blando y frágil		85	28	40,1	23,45	MH	1,362	R. Destierro
53	233778	576140	340	mediana a baja	Blando y frágil		101	38	39,6	23,78	MH	1,362	R. Destierro
54	236709	579149	170	mediana a baja	Blando y frágil		70	21	39,7	22,8	MH	1,362	R. Destierro
55	236845	578168	204	mediana a baja	Blando y frágil		73	30	38,4	23	MH	1,362	R. Destierro
56	235351	578171	262	mediana a alta	Semicompacta		62	16	39	22,9	MH	1,416	R. Destierro

La separación entre las secciones de aforos es de aproximadamente un kilómetro; se procuró mantener esa distancia, sin embargo no siempre se encontró una sección idónea a esa distancia por lo que en algunas circunstancias es mayor o menor según el caso. La Figura 5.11 muestra las secciones de aforos de los ríos, quebradas y canales en ambas cuencas. En los apartados 5.3.5.1 y 5.2.5.2 se muestran los datos de caudal de cada aforo diferencial.

5.2.5.1 Cuenca del Río Destierro

Cuadro 5.7: Aforos diferenciales Destierro*

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	315	233231	578696	Portón Iberia	2338		
2	247	234298	579075	San Bosco Abajo	26356	24018	Efluente
3	235	234720	579127	Después de la Unión	5056	-21300	Influente
4	199	235900	579450	Piñera Frutex Arriba	7270	2214	Efluente
5	141	236701	578911	Piñera Frutex	6529	-741	Influente
6	104	237666	579434	Arriba Pista Piñera	10367	3837	Efluente
7	98	238541	580320	Abajo Línea Tren	11102	736	Efluente
8	74	239555	580975	Camino a Milano	8740	-2363	Influente
9	46	242232	582569	milano abajo	10372	1632	Efluente

*Aforos entre el 6 y 8 de noviembre de 2008

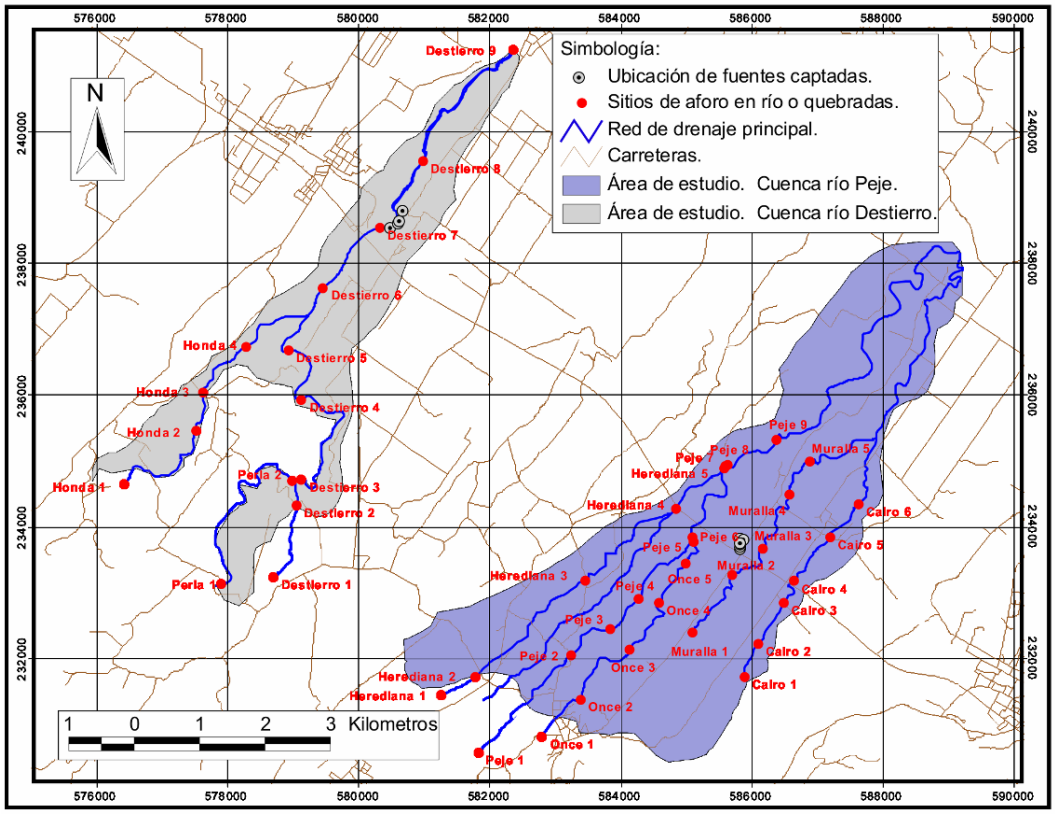


Figura 5.11: Ubicación de sitios de aforo de ríos y quebradas

Cuadro 5.8: Aforos diferenciales Río Perla*

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	315	233135	577905	San Bosco, P. Mealico	3118		
2	244	234692	578979	Unión con Río Destierro	4163	1045	Efluente

*Aforos realizados el 6 de diciembre de 2008

Cuadro 5.9: Aforos diferenciales Quebrada Honda*

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	276	234638	576420	La Argentina Arriba	864		
2	263	235437	577555	La Argentina Pocora	3068	2204	Efluente
3	229	236040	577626	La Argentina Pocora	1795	-1273	Influente
4	197	236750	578265	La Argentina Abajo	1326	-469	Efluente

*Aforos realizados el 7 de diciembre de 2008

5.2.5.2 Cuenca del Río Peje

Cuadro 5.10: Aforos diferenciales Río Peje*

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	335	230746	581653	La alegría de Siquirres	417		
2	229	232066	583216	Grano de Oro	1368	951	Efluente
3	202	232455	583830	Piñera Ojo de agua	836	-532	Influente
4	191	232904	584266	Piñera Ojo de agua	1113	277	Efluente
5	143	233765	585115	Unión Río Peje y Quebrada Once	861	-252	Influente
6	143	233790	585120	Unión Río Peje y Quebrada Once	1709	847	Efluente
7	112	234880	585565	Unión Peje y Herediana	2753	1044	Efluente
8	113	234937	585626	Unión Peje y Herediana	5242	2489	Efluente
9	87	235338	586311	Peje abajo	3208	-2034	Influente

*Aforos entre el 29 y 6 de diciembre de 2008

Cuadro 5.11: Aforos diferenciales Quebrada Muralla*

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	187	232300	584800	Piñera Ojo de agua	120		
2	161	233264	585681	Piñera Ojo de agua	173	53	Efluente
3	148	233640	586168	La Francia	318	145	Efluente
4	111	234485	586525	La Francia	424	105	Efluente
5	94	234992	586889	La Francia Abajo	465	41	Efluente

*Aforos el 31de noviembre de 2008

Cuadro 5.12: Aforos diferenciales Quebrada El Cairo*

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	197	231837	585885	Calle Fuentes	37		
2	179	232234	586071	Calle Fuentes	81	44	Efluente
3	157	232828	586500	Calle Fuentes	97	16	Efluente
4	144	233161	586644	El Cairo Abajo Pista	129	32	Efluente
5	111	233823	587207	El Cairo	129	0	Efluente

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
6	108	234359	587601	El Cairo Abajo	220	91	Efluente

*Aforos el 31de noviembre de 2008

Cuadro 5.13: Aforos diferenciales Quebrada Once*

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	294	230800	582786	Florida Siquirres	374		
2	248	231372	583382	Florida Siquirres	510	136	Efluente
3	199	232127	584122	Piñera Ojo de agua	395	-115	Influente
4	178	232839	584556	Piñera Ojo de agua	287	-108	Influente
5	158	233444	584984	Piñera Ojo de agua	315	28	Efluente

*Aforos entre el 29 y 31 de noviembre de 2008

Cuadro 5.14: Aforos diferenciales Río Herediana*

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	310	231150	581825	cruce portón	160		
2	237	231770	581700	Portón Iberia	534	374	Efluente
3	201	233154	583459	grano de oro abajo	534	0	
4	146	234175	584934	puente sobre pista	1069	536	Efluente
5	110	234966	585523	unión con el Peje	629	-440	Influente

*Aforos el 29 de noviembre y 6 de diciembre de 2008

Los aforos diferenciales permiten determinar aquellos tramos en que el curso de corriente es influente (recarga al acuífero) o efluente (descarga del acuífero). Como puede observarse de la Figura 5.12 en la cuenca del Río Destierro, se presentan dos tramos influentes de un total de 12 tramos, el resto es efluente. En el caso de la cuenca del Río Peje se presentan cuatro tramos influentes de un total de 25 tramos.

También se hizo una campaña de aforos diferenciales a los canales que se ubican en las plantaciones de piña. En la cuenca del Río Peje a pesar de que en las áreas de cultivo de piña existen canales, ninguno presentaba caudal, por lo que en esta cuenca no se hizo ningún aforo en canales. En la cuenca del Río Destierro se aforaron 5 canales, a continuación se muestran los resultados:

Cuadro 5.15: Aforos diferenciales canal No.1. Cuenca del Río Destierro

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	152	237319	580258	Cultivo de piña	1,65		
2	155	237716	580257	Cultivo de piña	5,81	4,16	efluente
3	130	238048	580288	Cultivo de piña	7,38	1,57	efluente

Cuadro 5.16: Aforos diferenciales canal No.2. Cuenca del Río Destierro

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	173	236866	580070	Cultivo de piña	0,41		
2	158	237345	580004	Cultivo de piña	5,85	5,44	efluente
3	145	237694	579897	Cultivo de piña	12,89	7,04	efluente

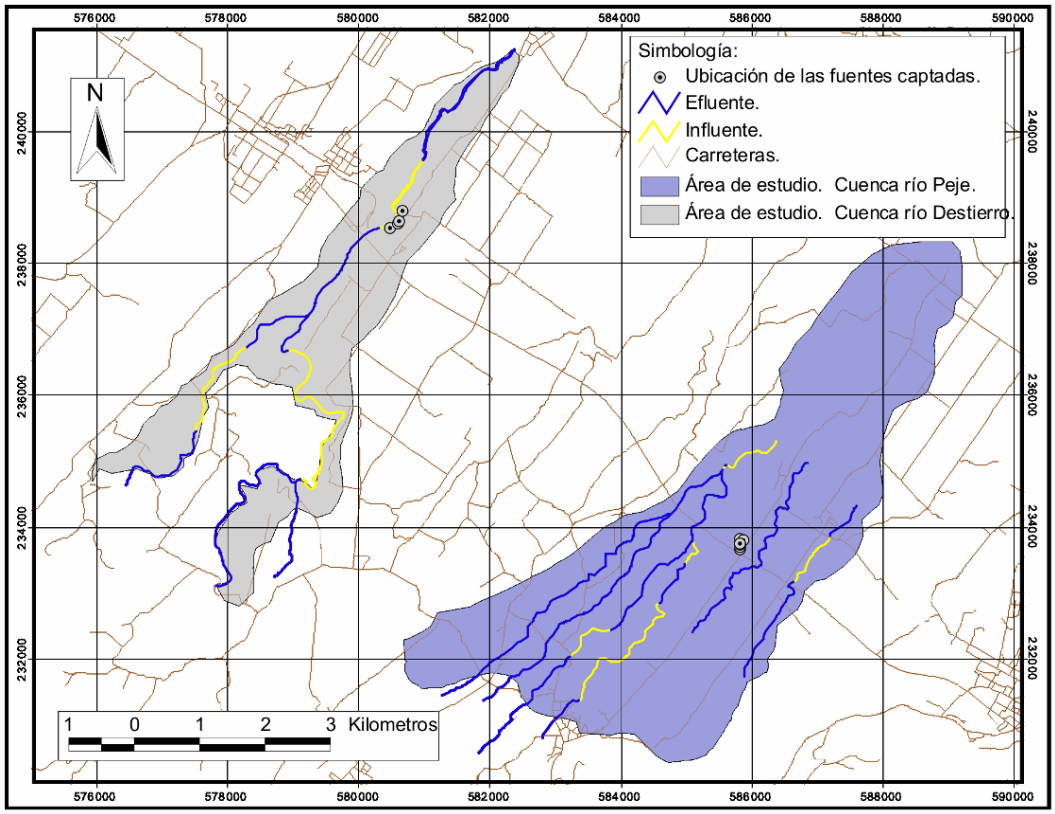


Figura 5.12: Tramos efluentes e influentes de ríos y quebradas en las cuencas del Río Destierro y Río Peje.

Cuadro 5.17: Aforos diferenciales canal No.3. Cuenca del Río Destierro

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	166	236963	579861	Cultivo de piña	1,51		
2	173	237108	579870	Cultivo de piña	5,32	3,81	efluente
3	142	237581	579743	Cultivo de piña	10,11	6,3	efluente

Cuadro 5.18: Aforos diferenciales canal No.4. Cuenca del Río Destierro

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	179	236523	579682	Cultivo de piña	0,29		
2	163	236985	579597	Cultivo de piña	5,96	5,67	efluente

Cuadro 5.19: Aforos diferenciales canal No.5. Cuenca del Río Destierro

No. aforo	Altitud	X	Y	LUGAR	Caudal (l/s)	Diferencia	Tramo
1	169	236866	579372	Cultivo de piña	3,37		
2	160	237168	579359	Cultivo de piña	8,10	4,73	efluente

Los aforos diferenciales practicados en los canales que se encuentran en las plantaciones de piña en la cuenca del Río, dan como resultado que en todos los casos son efluentes, es decir, el acuífero descarga en dichos canales. En la Figura 5.13 se muestra la ubicación de los aforos y su correspondiente identificación de la efluencia de los tramos.

5.2.6 Evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) se hizo utilizando la ecuación de Blaney - Cridde (modificado), la cual utiliza las siguientes variables: temperatura, brillo solar, humedad relativa y viento. Según Soto (1989), estas variables son incorporadas siguiendo el siguiente algoritmo:

$$ETP\ (diaria) = a * p * (0{,}45 * t + 8) - b$$
$$ETP\ (mensual) = EVTPd * N$$

En estas ecuaciones “a” y “b” son factores de corrección que dependen de la magnitud del brillo solar, la humedad relativa y el viento según se observa en el Cuadro 5.20, “p” es el porcentaje diario medio de horas diurnas anuales y “t” es la temperatura en ºC.

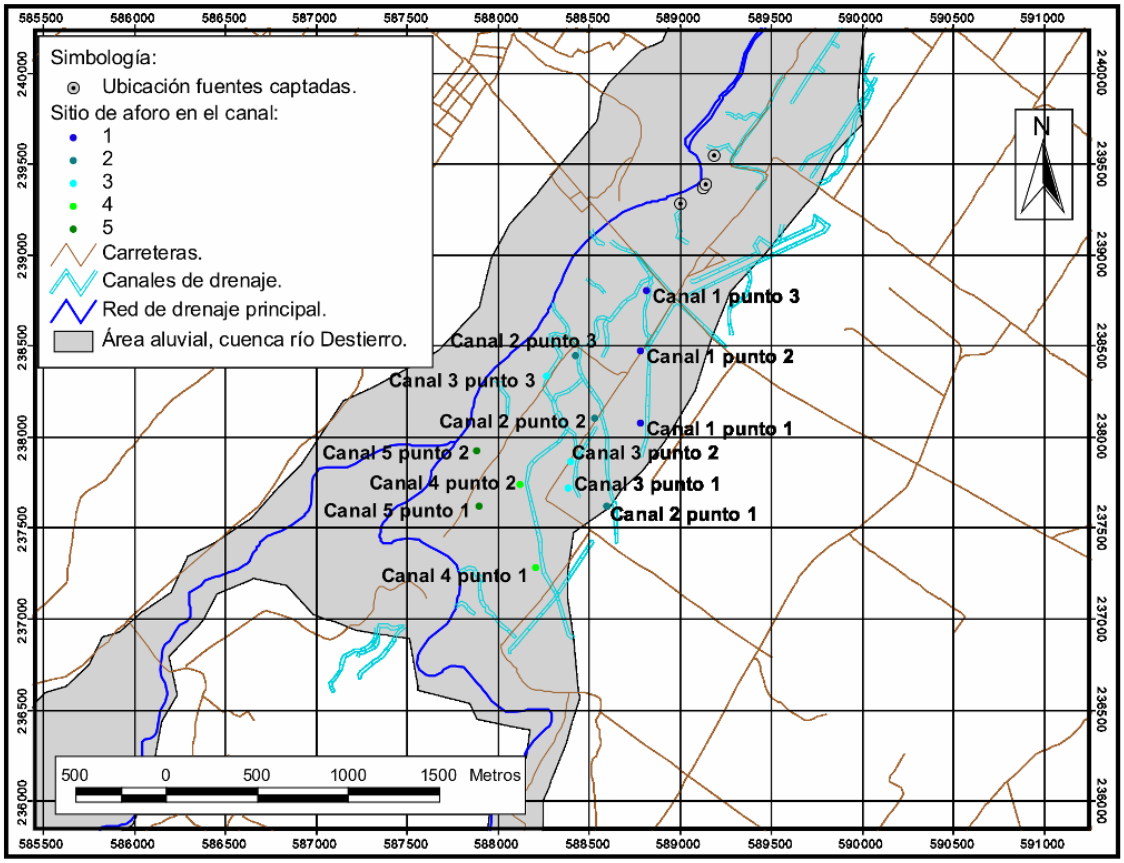


Figura 5.13: Ubicación de los aforos en los canales de las plantaciones piñeras.

Cuadro 5.20: Factores de corrección "a" y "b" para Blaney - Cridde (modificado).

Factor de corrección	a	b	a	b	a	b
Humedad relativa	Baja		Media		Alta	
Razón de luminosidad:	Baja					
Viento bajo	1,15	2,00	1,05	2,00	0,80	1,45
Viento medio	1,28	1,80	1,15	1,55	0,88	1,55
Viento alto	1,40	1,60	1,25	1,70	0,98	1,65
Razón de luminosidad:	Media					
Viento bajo	1,35	2,30	1,20	2,20	0,97	1,80
Viento medio	1,55	2,05	1,38	2,15	1,06	1,75
Viento alto	1,73	1,80	1,52	2,10	1,16	1,70
Razón de luminosidad:	Alta					
Viento bajo	1,55	2,60	1,37	2,40	1,14	2,15
Viento medio	1,82	2,30	1,61	2,50	1,22	1,95
Viento alto	2,06	2,00	1,82	2,55	1,31	1,70

Fuente: Soto, 1989.

Cuadro 5.21: Porcentaje diario medio (p) de horas diurnas anuales a diferentes latitudes en el hemisferio norte.

Lat. (grados)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
60	0,15	0,20	0,26	0,32	0,38	0,41	0,40	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13
58	0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,40	0,39	0,34	0,28	0,23	0,18	0,15
56	0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16
54	0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,38	0,37	0,33	0,28	0,23	0,19	0,17
52	0,19	0,22	0,27	0,31	0,35	0,37	0,36	0,32	0,28	0,24	0,20	0,17
50	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18
48	0,20	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,21	0,19
46	0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,35	0,34	0,31	0,28	0,24	0,21	0,20
44	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,34	0,31	0,28	0,25	0,22	0,20
42	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
40	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
35	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22
30	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23
25	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24
20	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
15	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
10	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26
5	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

Fuente: Doorendbos, J. & Pruitt, W, 1986.

La clasificación de viento y humedad relativa en intensidad baja, media o alta, a la cual hace alusión el Cuadro 5.20, se da a partir de los siguientes criterios:

- Humedad relativa:
  - Alta: mayor de 50 %.
  - Media: 20 % - 50 %
  - Baja: menor de 20 %

- Velocidad del viento media mensual:
  - Alta: mayor de 5 m / s
  - Media: 2 - 5 m / s
  - Baja: menor de 2 m / s

La razón de luminosidad es la relación de la cantidad efectiva media de horas sol (n) por la cantidad potencial de horas sol (N), donde este último parámetro se toma del Cuadro 5.20. Así, la clasificación de la razón de luminosidad se da de la siguiente forma:

- Alta: mayor de 0,8
- Media: 0,6 - 0,8
- Baja: menor de 0,6

De las 3 estaciones meteorológicas del Cuadro 5.1, se utilizarán las estaciones Hacienda El Carmen (Siquirres) y la estación de la EARTH, ya que cuentan con registros para todos los parámetros requeridos por el método de Blaney – Cridde (modificado). De esta forma, la ETP mínima, máxima y media representativa para la cuenca del río Peje será calculada con los datos de la estación Hacienda El Carmen; para la cuenca del río Destierro se utilizarán los datos de la estación de la EARTH. El Cuadro 5.23 y el Cuadro 5.24 muestran el resultado de dicho cálculo.

Cuadro 5.22: Cantidades máximas diarias medias de horas de fuerte insolación "N" en el hemisferio Norte

Lat. (grados)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
50	8,50	10,10	11,80	13,80	15,40	16,30	15,90	14,50	12,70	10,80	9,10	8,10
48	8,80	10,20	11,80	13,60	15,20	16,00	15,60	14,30	12,60	10,90	9,30	8,30
46	9,10	10,40	11,90	13,50	14,90	15,70	15,40	14,20	12,60	10,90	9,50	8,70
44	9,30	10,50	11,90	13,40	14,70	15,40	15,20	14,00	12,60	11,00	9,70	8,90
42	9,40	10,60	11,90	13,40	14,60	15,20	14,90	13,90	12,90	11,10	9,80	9,10
40	9,60	10,70	11,90	13,30	14,40	15,00	14,70	13,70	12,50	11,20	10,00	9,30
35	10,10	11,00	11,90	13,10	14,00	14,50	14,30	13,50	12,40	11,30	10,30	9,80
30	10,40	11,10	12,00	12,90	13,60	14,00	13,90	13,20	12,40	11,50	10,60	10,20
25	10,70	11,30	12,00	12,70	13,30	13,70	13,50	13,00	12,30	11,60	10,90	10,60
20	11,00	11,50	12,00	12,60	13,10	13,30	13,20	12,80	12,30	11,70	11,20	10,90
15	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20
10	11,60	11,80	12,00	12,30	12,60	12,70	12,60	12,40	12,10	11,80	11,60	11,50

Lat. (grados)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
5	11,80	11,90	12,00	12,20	12,30	12,40	12,30	12,30	12,10	12,00	11,90	11,80
0	12,10	12,10	12,10	12,10	12,10	12,10	12,10	12,10	12,10	12,10	12,10	12,10

Fuente: Doorendbos, J. & Pruitt, W, 1986.

Cuadro 5.23: Cálculo de evapotranspiración potencial mínima, máxima y media para la cuenca del río Destierro.

Mes:	ETP promedio (mm)	ETP mínima (mm)	ETP máxima (mm)
Enero	76,84	57,90	97,21
Febrero	74,28	57,30	92,50
Marzo	83,29	64,93	104,66
Abril	87,54	68,50	109,30
Mayo	89,34	75,08	113,81
Junio	93,54	79,10	115,30
Julio	95,26	76,18	117,02
Agosto	92,81	78,00	115,00
Septiembre	91,81	74,11	114,47
Octubre	87,52	72,30	108,30
Noviembre	77,75	64,68	96,27
Diciembre	78,31	65,40	96,50

Cuadro 5.24: Cálculo de evapotranspiración potencial mínima, máxima y media para la cuenca del río Peje.

Mes:	ETP promedio (mm)	ETP mínima (mm)	ETP máxima (mm)
Enero	80,64	66,55	94,73
Febrero	77,61	64,30	91,00
Marzo	87,62	72,69	102,56
Abril	90,48	74,90	106,10
Mayo	96,85	82,15	111,54
Junio	98,62	84,20	113,00
Julio	100,26	86,03	114,48
Agosto	96,05	81,50	110,60
Septiembre	93,88	78,88	108,87
Octubre	91,32	76,40	106,30
Noviembre	81,19	68,42	93,97
Diciembre	81,97	68,30	95,60

5.2.7 Balance hídrico de suelos

El balance hídrico de suelos se realizó para ambas cuencas específicamente en la zona que corresponde a la unidad aluvial, siguiendo la metodología propuesta por

Schosinsky (2006), cuyo objetivo principal es evaluar la infiltración de lluvia que penetra al suelo en cada cuenca, para ello es indispensable determinar: la precipitación mensual de la zona, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal (uso del suelo) y su pendiente.

En la zona aluvional las pendientes promedio es de 3,56%, lo cual ubica a esta área en el rango de pendientes entre 2 y 7% de acuerdo con el modelo de Schosinsky & Losilla (2000). Como puede notarse de la figura 5.14 en la cuenca del río Destierro las áreas con pendientes superiores a 7% corresponde a un 30% del total del área y en la cuenca del río Peje corresponde a 15% del total del área; además se puede notar que las zonas en donde se ubican estas áreas corresponden a las riberas de los ríos.

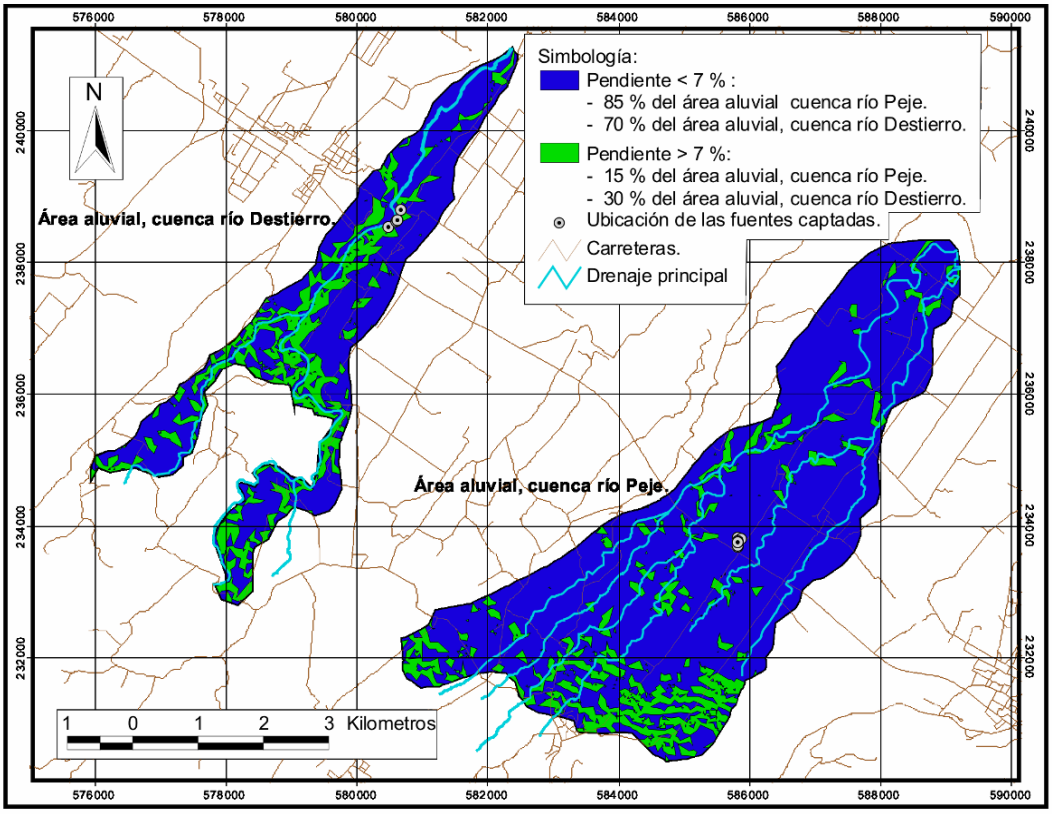


Figura 5.14: Mapa de pendientes en las cuencas Río Destierro y Río Peje

Con los datos de infiltración se puede realizar un balance hídrico de suelos para estimar el agua que queda libre para recargar el acuífero que se encuentra debajo del suelo analizado. Para poder realizar el balance se determinan: La infiltración de lluvia que penetra al suelo, la cobertura vegetal del suelo (uso de suelo), la profundidad de las raíces extractoras del agua, la capacidad de campo, el punto de marchitez del suelo, la evapotranspiración potencial y la humedad del suelo al inicio del análisis.

En la Figura 5.15 se muestra el mapa en que se determinan las áreas comunes de la superposición de mapas de uso de suelo, ubicación de las pruebas de suelos y pruebas de infiltración.

Para cada uso de suelo en cada cuenca se tomó en cuenta el promedio de los datos de las pruebas de infiltración y el promedio de los datos obtenidos en laboratorio. Además para cada cuenca se tomó en cuenta el promedio mensual de precipitación de la o las estaciones que le corresponden; así mismo los datos mensuales de evapotranspiración potencial, tomando en cuenta la temperatura promedio, máxima y mínima. De lo anterior resultan 24 procesos de cálculo para determinar la infiltración al acuífero superficial.

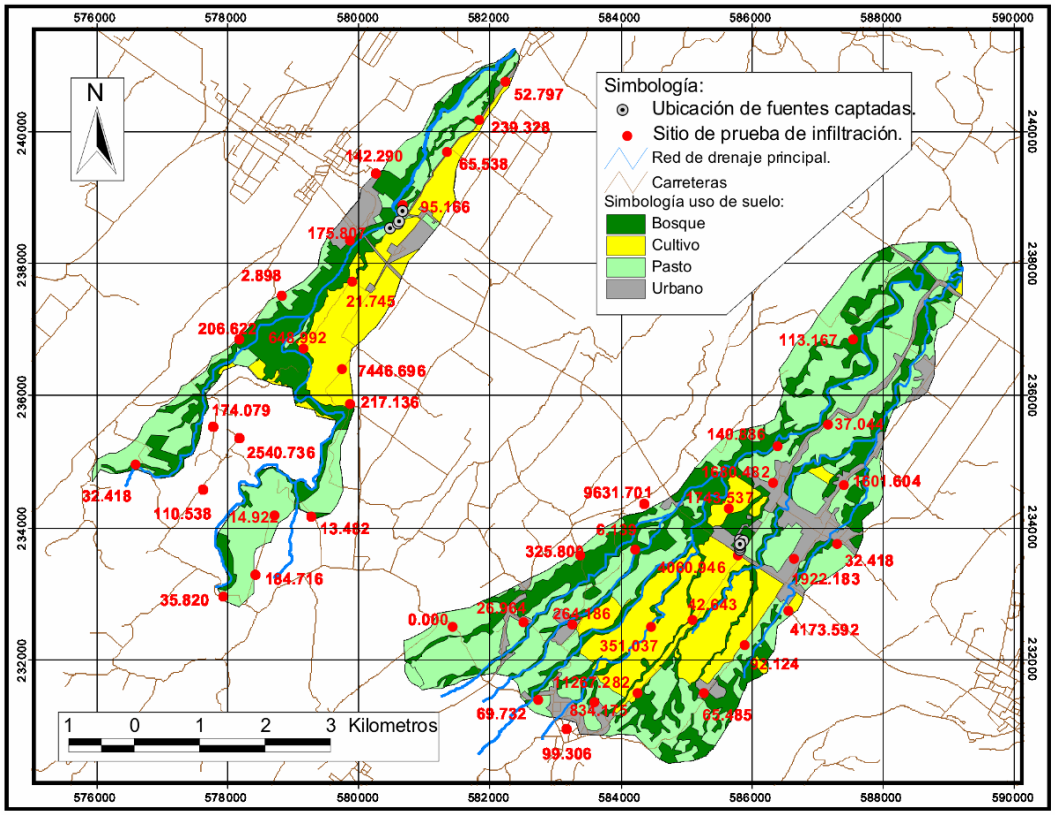


Figura 5.15: Superposición de mapas de uso de suelo, ubicación de muestras de suelo y pruebas de infiltración.

La fracción de lluvia interceptada por follaje se asume en un 20% para la zona boscosa y de un 12 % en el resto de áreas; precipitaciones mensuales inferiores a 5 mm se consideran que no infiltran ni escurren (Schosinsky & Losilla, 2000). De acuerdo con lo anterior la precipitación efectiva mensual queda determinada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{Pe = 0{,}88 * C_i * P}$$

Donde:
P_e= Precipitación efectiva mensual en mm
P= Precipitación media mensual en mm
C_i= Coeficiente de infiltración

$$C_i = C_{FC} + k_{.o.} + C_{PU}$$

$k_{.o.}$ y C_{PU} son factores que dependen de la cobertura vegetal y la pendiente de la cuenca respectivamente, ver Figura 5.15. El factor de vegetación $k_{.o.}$ se ha determinado tomando en cuenta la información del mapa de uso del suelo, Figura 5.9.

Cuadro 5.25: Componentes del coeficiente de infiltración (SCHOSINSKY & LOSILLA, 2000)

DESCRIPCIÓN	C_i
Por textura de suelo, C_{FC}:	
Arcilla compacta impermeable	0,10
Por combinación de limo y arcilla	0,20
Suelo limo-arenoso no muy compacto	0,40
Por pendiente, C_{PU}:	
Muy plana 0,02 – 0,06 %	0,03
Plana 0,3 – 0,4 %	0,20
Algo plana 1 – 2 %	0,15
Promedio 2 – 7 %	0,10
Fuerte > 7 %	0,06
Por cobertura vegetal, $k_{.o.}$:	
Cobertura con zacate < 50 %	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate > 75 %	0,21

$$K_{fc} = 0{,}267 * \ln(fc) - 0{,}000154 * fc - 0{,}723$$

K_{fc} es el porcentaje de lluvia que infiltra por textura del suelo y está basado en estimaciones de la distribución espacial de la lluvia (Schosinsky & Losilla, 2000); fc se define como el coeficiente de infiltración básica del suelo en mm/d obtenida de las pruebas de infiltración para las zonas definidas.

En el anexo 5 se muestran las hojas de cálculo de los respectivos balances hídricos de suelos para cada zona y tipo de suelo definido. Se utilizó la hoja electrónica elaborada por Schosinsky para ejecutar estos cálculos. Del Cuadro 5.26 al Cuadro 5.33, se muestra un resumen de los resultados obtenidos del balance hídrico de suelos para cada cuenca en la zona aluvial, según el uso y la pendiente y de acuerdo a las tres condiciones de temperatura (máxima, mínima y promedio); y como puede notarse en la última columna se hace una comprobación de la ecuación del balance hídrico con lo cual se validan los resultados obtenidos.

Cuadro 5.26: Balance hídrico de suelos Cuenca Río Destierro para temperatura máxima

Uso de suelo	Área (Km^2)	Ret. (mm/año)	Esc. (mm/año)	ETR (mm/año)	Recarga (mm)	P= Ret+Esc+ETR +R
Bosque	3,32	777	0	1280	1827	3884
Cultivos	2,57	466	0	1280	2138	3885

Uso de suelo	Área (Km^2)	Ret. (mm/año)	Esc. (mm/año)	ETR (mm/año)	Recarga (mm)	P= Ret+Esc+ETR +R
Pasto	3,62	466	1140	1279	1000	3885
Urbano	0,76	466	1772	1253	393	3884

* P = Precipitación; RET= Retención de la vegetación; ESC= Escurrimiento superficial; REC= Recarga al acuífero
** ETR = Evapotranspiración real

Cuadro 5.27: Balance hídrico de suelos Cuenca Río Peje para temperatura máxima

Uso de suelo	Área (Km^2)	Ret. (mm/año)	Esc. (mm/año)	ETR (mm/año)	Recarga (mm)	P= Ret+Esc+ETR +R
Bosque	6,99	768	589	1249	1232	3838
Cultivos	4,12	461	0	1249	2129	3838
Pasto	10,64	461	743	1249	1386	3838
Urbano	2,40	461	0	1249	2128	3838

* P = Precipitación; RET= Retención de la vegetación; ESC= Escurrimiento superficial; REC= Recarga al acuífero
** ETR = Evapotranspiración real

Cuadro 5.28: Balance hídrico de suelos Cuenca Río Destierro para temperatura mínima

Uso de suelo	Área (Km^2)	Ret. (mm/año)	Esc. (mm/año)	ETR (mm/año)	Recarga (mm)	P= Ret+Esc+ETR +R
Bosque	3,32	777	0	833	2274	3884
Cultivos	2,57	466	0	833	2585	3885
Pasto	3,62	466	1140	833	1445	3885
Urbano	0,76	466	1772	833	812	3884

* P = Precipitación; RET= Retención de la vegetación; ESC= Escurrimiento superficial; REC= Recarga al acuífero
** ETR = Evapotranspiración real

Cuadro 5.29: Balance hídrico de suelos Cuenca Río Peje para temperatura mínima

Uso de suelo	Área (Km^2)	Ret. (mm/año)	Esc. (mm/año)	ETR (mm/año)	Recarga (mm)	P= Ret+Esc+ETR +R
Bosque	6,99	768	589	904	1577	3838
Cultivos	4,12	466	0	833	2585	3885
Pasto	10,64	461	743	904	1731	3838
Urbano	2,40	461	0	904	2473	3838

* P = Precipitación; RET= Retención de la vegetación; ESC= Escurrimiento superficial; REC= Recarga al acuífero
** ETR = Evapotranspiración real

Cuadro 5.30: Balance hídrico de suelos Cuenca Río Destierro para temperatura promedio

Uso de suelo	Área (Km^2)	Ret. (mm/año)	Esc. (mm/año)	ETR (mm/año)	Recarga (mm)	P= Ret+Esc+ETR +R
Bosque	3,32	777	0	1028	2080	3885
Cultivos	2,57	466	0	1028	2390	3885
Pasto	3,62	466	1139	1028	1251	3885
Urbano	0,76	466	1773	1253	393	3885

* P = Precipitación; RET= Retención de la vegetación; ESC= Escurrimiento superficial; REC= Recarga al acuífero
** ETR = Evapotranspiración real

Cuadro 5.31: Balance hídrico de suelos Cuenca Río Peje para temperatura promedio

Uso de suelo	Área (Km^2)	Ret. (mm/año)	Esc. (mm/año)	ETR (mm/año)	Recarga (mm)	P= Ret+Esc+ETR +R
Bosque	6,99	768	589	1076	1404	3838
Cultivos	4,12	461	0	1076	2301	3838
Pasto	10,64	461	743	1076	1559	3838
Urbano	2,40	461	0	1076	2301	3838

* P = Precipitación; RET= Retención de la vegetación; ESC= Escurrimiento superficial; REC= Recarga al acuífero
** ETR = Evapotranspiración real

El siguiente cuadro muestra los resultados de la cuantificación de los caudales que genera cada componente en la cuenca. Para el caso de la cuenca del Río Destierro, ell acuífero se recarga por infiltración de lluvia un 45% del total de la lluvia del año; y de ese porcentaje la zona que recibe mayor recarga es la zona de bosque con un 39%; mientras que la zona de cultivo el porcentaje de la recarga es de un 34%. En la cuenca del Río Peje, el acuífero se recarga por infiltración de lluvia un 45% del total de la lluvia del año; y de ese porcentaje la zona que recibe mayor recarga es la zona de pasto con un 40%; mientras que la zona de cultivo el porcentaje de la recarga es de un 34%. Lo anterior se observa en el Cuadro 5.32 y en el Cuadro 5.33.

Cuadro 5.32: Resumen de resultados del Balance Hídrico de suelos en el acuífero del Río Destierro para la condición de temperatura promedio.

Uso de suelo	Área (Km^2)	Recarga		Volumen Escorrentía (l/s)	Volumen Retenido (l/s)	Vol. ETR. (l/s)	Porcentaje recarga %
		(l/s)	(mm)				
Bosque	3,32	219	2080	0	82	108	39
Cultivos	2,57	195	2390	0	38	84	34
Pasto	3,62	144	1251	131	54	118	25
Urbano	0,76	9	393	43	11	30	2
TOTAL	**10,27**	**567**		**173**	**185**	**340**	**100**
%		45		14	15	27	**100**

En la Figura 5.16 se muestran las zonas de recarga de los acuíferos del Río Destierro y del Río Peje, como puede observarse la zona de mayor recarga ocurre en el área de cultivos en ambas cuencas. El porcentaje de recarga en ambas cuencas resulta en 45 % de la precipitación, lo cual se considera un valor relativamente alto. Nótese que la recarga ocurre en toda el área de la zona aluvional y en la zona de cultivo es en donde la recarga ocurre en mayor proporción.

Cuadro 5.33: Resumen de resultados del Balance Hídrico de suelos en el acuífero del Río Peje para la condición de temperatura promedio.

Uso de suelo	Área (Km^2)	Recarga		Volumen Escorrentía (l/s)	Volumen Retenido (l/s)	Vol. ETR. (l/s)	Porcentaje recarga %
		(l/s)	(mm)				
Bosque	6,99	311	1404	131	170	239	24
Cultivos	4,12	301	2301	0	60	141	23

Pasto	10,64	526	1559	251	155	363	40
Urbano	2,40	175	2301	0	35	82	13
TOTAL	**24,15**	**1313**		**381**	**421**	**824**	**100**
%		45		13	14	28	**100**

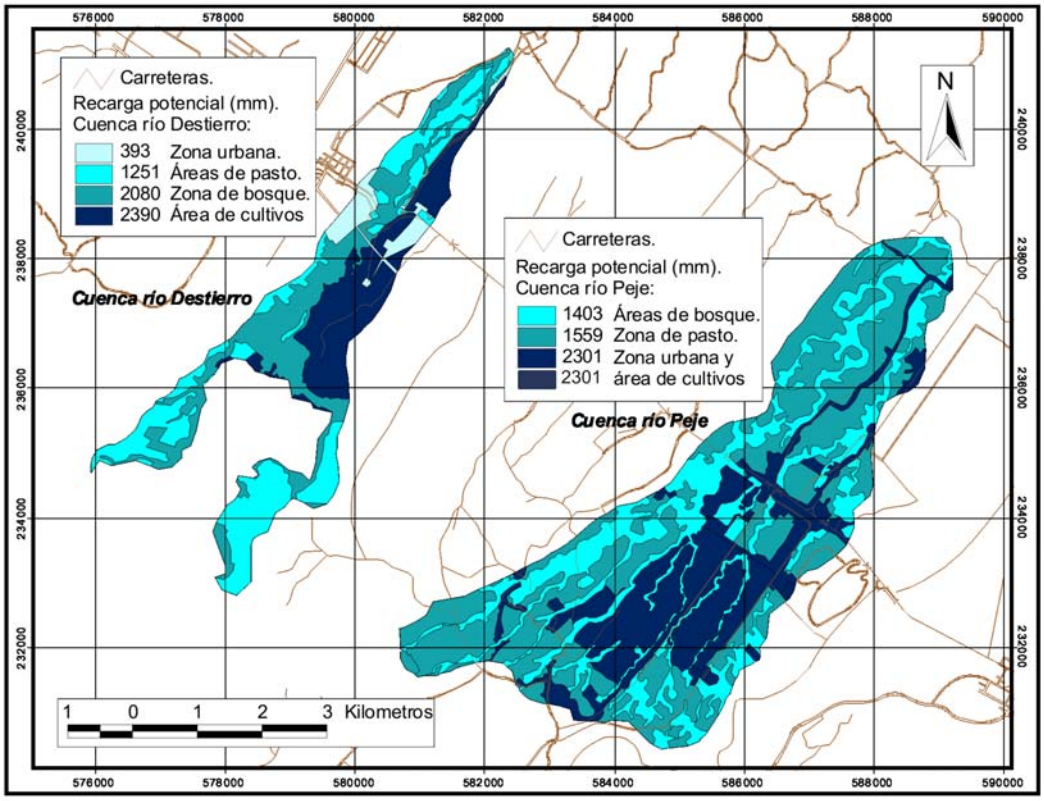


Figura 5.16: Zonas de recarga en la zona aluvional de las cuencas R. Destierro y R. Peje.

6 HIDROGEOLOGÍA

6.1 Hidrogeología del área de estudio

6.1.1 Cuenca Río Destierro

En la parte baja de la cuenca se presentan los depósitos aluviales que corresponden a los materiales erosionados de los edificios volcánicos transportados principalmente por los cauces de los ríos. Estos materiales constituyen el principal acuífero de la cuenca. Hacia la parte alta de la cuenca los materiales predominantes son de origen volcánico, principalmente se trata de coladas de lavas provenientes de los volcanes Turrialba, Dos Novillos y Alto Botella.

6.1.2 Cuenca Río Peje

La hidrogeología de esta cuenca se presenta menos compleja que la de la cuenca del río Destierro. En la parte baja hay presencia de depósitos aluviales, los cuales corresponden al igual que la cuenca del río Destierro, a materiales erosionados de los edificios volcánicos los cuales han sido transportados por los cauces de los ríos y constituyen el principal acuífero de esta cuenca.

Los materiales de la parte media alta de la cuenca se tratan de lahares con clastos de andesitas englobados en una matriz arcillosa. Estos lahares subyacen a los aluviones descritos anteriormente. En la parte alta de la cuenca predominan materiales de origen volcánicos asociados a las coladas de lava provenientes del volcán Alto Botella.

6.1.3 Acuífero aluvial

De acuerdo con las características hidrogeológicas, en el área de estudio se tiene un acuífero poroso sedimentario, albergado en materiales aluviales que contienen gravas y arenas. Este es un acuífero de tipo libre, cuyo nivel freático oscila entre unos pocos centímetros hasta aproximadamente los 8 m de profundidad. Se ubica en materiales con características heterogéneas, debido a la presencia de lentes arenosos y arcillosos que generalmente producen variaciones es su conductividad hidráulica y por lo tanto en el comportamiento del flujo. El espesor del mismo varía entre 40 a 70 m en la cuenca del río Peje y entre 20 a 60 m en la cuenca del río Destierro.

6.2 Características y producción de los pozos

Esta zona ha sido poco explotada desde el punto de vista del recurso hídrico subterráneo. El detalle de la información técnica de la construcción de los pozos y la litología de las perforaciones se obtuvieron del archivo del SENARA y de la base de datos del Departamento de Aguas Subterráneas del AyA.

Se solicitó la información de los pozos ubicados en las coordenadas 572,000 – 595,000 Este y 230,000 – 246,000 Norte de las hojas cartográficas Guácimo y Bonilla escala 1:50 000 del IGN. El SENARA entregó la información solicitada, que consiste en la lista de pozos con las coordenadas y la información básica; además suministró la litología de aquellos pozos que tenían tal información. Posteriormente entregó los reportes de perforación en donde se incluye información específica de cada pozo.

El inventario de los pozos de la zona se presenta en el Cuadro 6.1 con la información general y en la Figura 6.1 se muestra la ubicación de los pozos.

En general los pozos construidos se perforaron en diámetros de 12” y en su mayoría se armaron en 6” y 8” en PVC con empaque de grava, se utilizaron rejillas del mismo material y del mismo diámetro. El método de perforación utilizado es el de percusión con cable, siendo necesaria la utilización de la técnica de ademar con tubería de acero, dado que el material atravesado es inconsolidado. En general estos pozos han sido equipados con bombas de tipo sumergibles con capacidades entre 2 a 5 HP. La profundidad promedio de los mismos es de 40 m, siendo el de menor profundidad el BO –

12 de 9 m y el de mayor profundidad el BO – 18 con 115 m. La producción de los pozos es variable, los caudales de prueba oscilan entre 0,5 hasta 30 l/s.

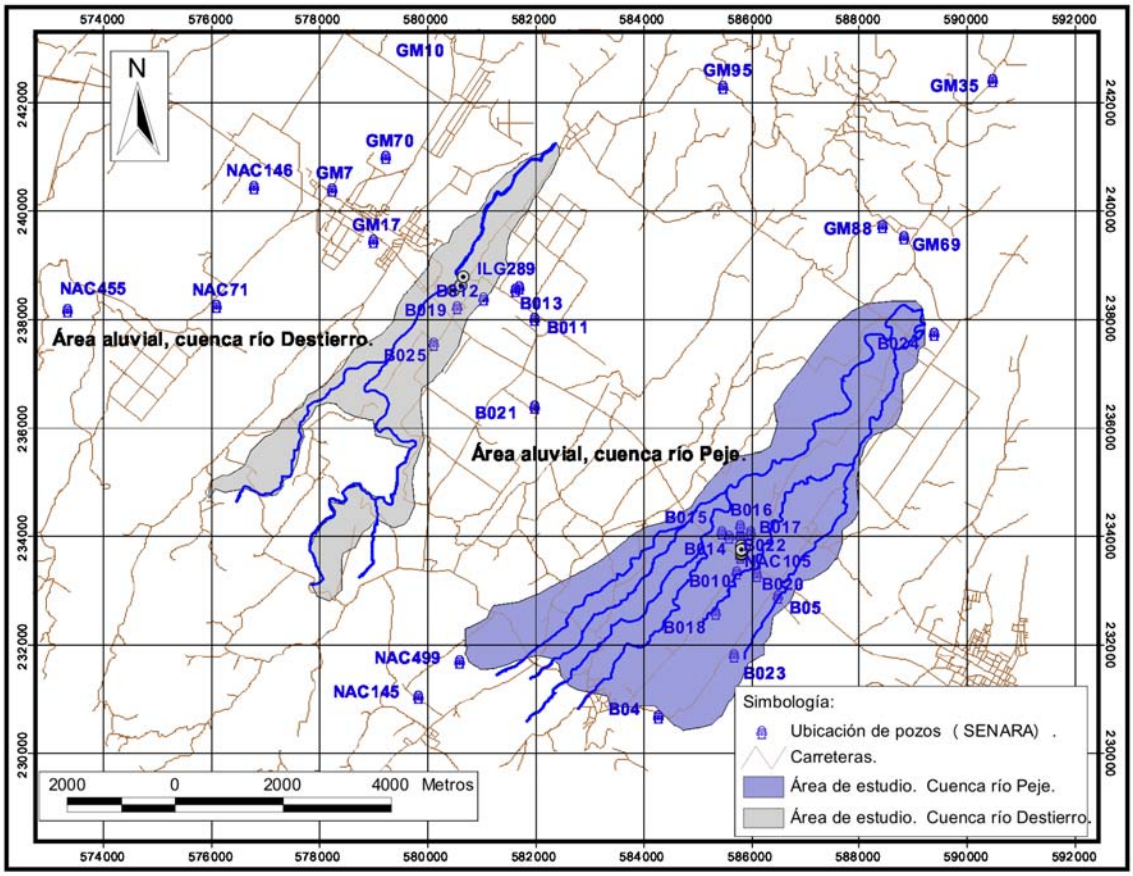


Figura 6.1: Ubicación de los pozos en los alrededores del área de estudio, según la base de datos del SENARA.

En el listado que se suministró se indican 67 pozos, de los cuales 7 son propiedad del AyA; 41 reportan nivel estático, 34 reportan nivel dinámico; 19 tienen información litológica.

En el anexo 6 se muestra la tabla con la información suministrada y las respectivas litologías. El Departamento de Aguas Subterráneas suministró información de 6 pozos que el AyA construyó en la zona; en el anexo se muestra la información técnica de las perforaciones.

En la Figura 6.1 se ubican los pozos en las cuencas de los respectivos pozos indicados. Como puede apreciarse en la cuenca del Río Peje se ubican 13 pozos y en la cuenca del Río Destierro solamente 3.

Cuadro 6.1: Inventario de pozos.

Pozo	X	Y	Propietario	Q_{fin} (l/s)	N.E. (m.b.n.s.)	N.D. (m.b.n.s.)	Profundidad (m)	Litología
B01	589750	231350	AYA	4,4	4,9		74,7	
B010	585750	233350	GRUPO AGRICOLA LA FRANCIA	0,5	6,0		18,0	
B011	582000	238000	MATAS DE COSTA RICA S.A.		4,5	19,0	40,0	
B012	581050	238400	CORRUGADOS DEL ATLANTICO	19,8	9,0	27,0	39,0	
B013	581650	238550	CORRUGADOS DEL ATLANTICO	10,0			56,0	sí
B014	585600	234000	FRUCTA C.R.S.A.	10,0	0,0	17,2	27,0	sí
B015	585480	234100	FRUCTA C.R.S.A.	3,8	4,8	19,5	42,0	sí
B016	585800	234200	FRUCTA C.R.S.A.	4,2	0,5	9,4	20,0	sí
B017	586000	234100	FRUCTA C.R.S.A.	4,6	0,9	0,9	20,0	sí
B018	585350	232600	HACIENDA OJO DE AGUA		3,0		115,0	sí
B019	580550	238225	AGROINDUSTRIAL BABILONIA	6,3	12,1	25,0	60,0	sí
B02	588325	230450	AYA	12,0	2,7	28,9	45,7	
B020	586128	233300	ASESORES GONZALEZ Y ASOCIADOS	2,0	5,0	30,0	39,0	sí
B021	582000	236400	FOLLAJES TROPICALES AAM S	2,0			30,0	
B022	585800	234000	FRUCTA C.R.S.A.	5,0			60,0	
B023	585700	231825	NOLICHUKY S.A	2,0			75,0	
B024	589400	237750	AYA COMUNAL	8,0	6,7	15,5	35,0	sí
B025	580133	237567	FIDUCIARIA CUSCATLAN S.A.	8,0			70,0	
B03	588500	230450	AYA	18,4	6,4	29,0	49,7	
B04	584300	230700	AYA	30,0	23,7	28,0	70,0	
B05	586500	232900	RAMON AGUILAR FACIO	1,3	9,1	14,0	21,3	
B06	591250	230750	CABSHA	1,6	9,0	19,6	30,0	
B07	590850	231000	ESTÁNDAR FRUIT COMPANY	3,4	21,0		46,0	
B08	590100	233200	MARCELINO LOSILLA GARCIA	0,6	12,0		19,0	
GM10	580350	243450	E.A.R.T.H.	0,5			46,0	
GM16	580600	244300	E.A.R.T.H.	10,0	2,9	22,6	38,0	

Pozo	X	Y	Propietario	Q_{fin} (l/s)	N.E. (m.b.n.s.)	N.D. (m.b.n.s.)	Profundidad (m)	Litología
GM17	579000	239450	PLANTAS HOLANDESAS S.A.	1,3	1,5		6,0	
GM35	590492	242430	HACIENDA OJO DE AGUA	8,0			35,0	
GM38	580750	244000	E.A.R.T.H.	7,5				
GM69	588840	239520	C.C.S.S.	2,3	13,5	19,0	30,0	sí
GM7	578250	240400	DANCOPLANTAS S.A.	1,2			22,0	
GM70	579240	241000	E.A.R.T.H.	0,5				
GM84	580770	244940	E.A.R.T.H.	0,5				
GM88	588450	239720	ASOCIACION AGRÍCOLA Y ASENT. PEJ	6,7	13,0	14,4	55,0	sí
GM9	580400	243900	E.A.R.T.H.	0,5				
GM95	585500	242300	COMUNIDAD	3,5	21,0	27,5	40,0	sí
ILG289	581700	238600	ORNAMENTALES SIEMPRE VERDE	16,0				
ILG329	593000	231000	INCOFER	1,9				
ILG362	592500	230600	CENTRO TURÍSTICO PACUARE	3,0				
ILG583	593100	237600	CIA BANANERA LOS LAURELES	0,6				
ILG584	594600	237200	CIA BANANERA LA ESTRELLA	3,0				
ILG953	590700	230950	VERDE DOS MIL S.A.	0,3			30,0	
MN107	592200	231750	ECOTURISMO S.A.		4,0		14,0	sí
MN122	593300	231300	AYA	3,5	2,8	18,2	27,0	sí
MN19	593450	237350	CIA BANANERA LOS LAURELES	10,0	2,2	4,0	30,0	
MN20	592780	238260	CIA BANANERA MTE BLANCO	13,0			30,0	sí
MN21	592723	237900	CIA BANANERA MTE BLANCO	3,0	1,5	1,7	11,0	sí
MN22	592780	237550	CIA BANANERA MTE BLANCO	5,0	3,0	3,5	15,0	sí
MN23	594350	237460	CIA BANANERA MTE BLANCO	2,5	2,8	5,6	14,0	
MN24	594600	237460	CIA BANANERA MTE BLANCO	7,5	2,8	3,8	21,0	
MN25	591850	236800	COBAL CIA BANAN. SAN JOSE	6,3	6,5	10,0	14,0	
MN48	593100	234300	BANANERA SIQUIRRES S.A.	16,0	2,1	6,3	20,0	sí
MN49	593100	234100	BANANERA SIQUIRRES S.A.					
MN69	594130	234260	CIA BANANERA INDIANA S.A.					

Pozo	X	Y	Propietario	Q_{fin} (l/s)	N.E. (m.b.n.s.)	N.D. (m.b.n.s.)	Profundidad (m)	Litología
MN71	594150	237300	CIA BANANERA LOS LAURELES	9,5	3,3	14,8	20,0	
MN84	592600	236550	CIA BANANERA SAN JOSE	6,5	4,0	14,5	20,0	sí
NAC105	585800	233650						
NAC145	579850	231050						
NAC146	576800	240450						
NAC455	573320	238170						
NAC499	580600	231700						
NAC71	576100	238250	AYA	20				
PAR23	593200	241800	CIA BANANERA EL CARMEN	15,14	4,74	8,67	40	
PAR24	593050	241550	CIA BANANERA EL CARMEN	10	5	15	40	
PAR25	594050	242900	CIA BANANERA EL CARMEN	19	3,87	7,9	40	
PAR26	593800	242900	CIA BANANERA EL CARMEN	8,3	5,12	12	33	
PAR28	594900	243100	CIA BANANERA EL CARMEN	15,77	4,75	7,1	36	
PR59	592950	240900	AYA	6,5	3,23	7	39	sí

*Fuente: Archivo de pozos del SENARA
**Fuente: Archivo de datos de pozos del Departamento de Aguas Subterráneas del AyA.
*** Pozos ubicados en la zona de estudio. Descripción litológica en el anexo 6.

Además de los pozos mencionados, existe una serie de pozos excavados, cuyas profundidades son generalmente inferiores a los 10 m. El revestimiento de los mismos generalmente se trata de tuberías de concreto de 0,90 m de diámetro. La extracción del agua usualmente se hace a través de un balde el cual es introducido por medio de un cable sujeto generalmente por una base de madera.

6.3 Mediciones del nivel de agua en los pozos

El día 15 de enero del 2009 se realizó una campaña de medición de niveles freáticos en los pozos de ambas cuencas en conjunto con funcionarios del AyA. En total se realizaron 18 mediciones. Se considera que las mediciones realizadas en una misma fecha son más representativas que el reporte de mediciones que se tiene de la base de datos del SENARA, los cuales han sido realizados en diferentes fechas en el año así como en diferentes años. Por lo tanto para el modelo de líneas isofreáticas se utilizarán los datos tomados el 15 de enero del 2009. En el Cuadro 6.2 se muestran los datos obtenidos en dicha campaña de medición.

Cuadro 6.2: Campaña de medición de nivel estático el 15 de enero del 2009

Pozo	Coordenadas		Nivel estático	Nivel dinámico	Elevación	Profundidad
	X	Y				
GM84	580983	244913		27,40	44	50
GM16	580948	244803	10,22		46	
GM9	580918	244643	7,93		46	
GM38	580693	243970		26,17	48	50
GM7	580640	244007	21,99		48	50
GM70	579001	240802	2,16		90	50
GM95	586033	241575	16,82		52	38
Artesanal	585783	242180	6,49		50	10
Artesanal	585795	242183	9,91		51	12
BO25	580119	237565	19,17		160	30
BO18	585470	232724	6,1	13,27	170	
BO17	585980	233809	1,05		150	
Artesanal	588714	237308	6,04		71	8
Artesanal	589185	238955	9,43		58	15
Artesanal	590005	237847	4,14		59	10
Artesanal	587879	235098	5,45		94	7
Artesanal	588894	236520	2,47		75	9
Artesanal	590872	239151	3,77		49	15

*Mediciones realizadas por Ing. Federico Arellano y por Hidrog. Viviana Ramos el día 15 de enero de 2009

6.4 Líneas isofreáticas y dirección del flujo subterráneo

Con base en la información recopilada de los niveles piezométricos en los pozos el día 15 de enero del 2009 y considerando que no se tienen datos de niveles piezométricos en las partes altas de ambas cuencas, se consideraron las elevaciones de los niveles de los ríos para establecer las líneas isofreáticas del acuífero superficial. En la Figura 6.2 se muestra el mapa resultante.

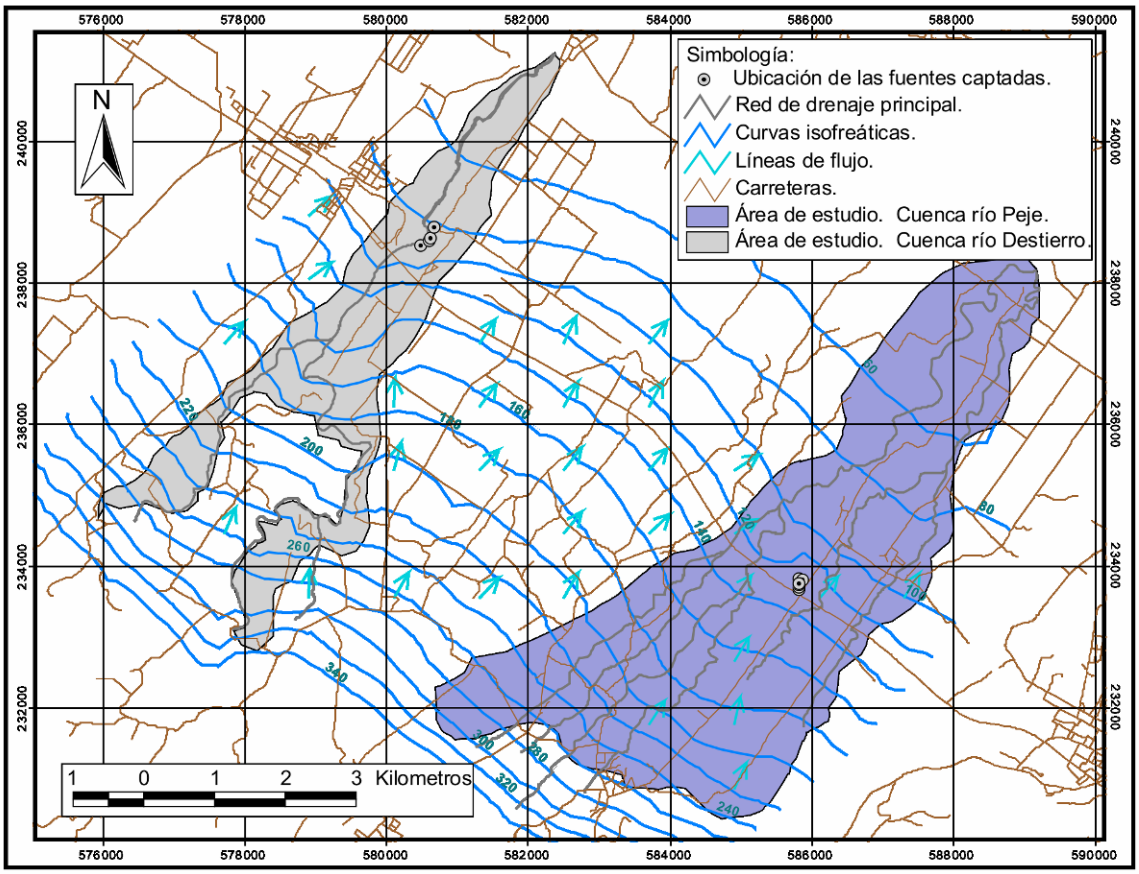


Figura 6.2: Líneas isofreáticas en las cuencas Río Destierro y Río Peje.

Los niveles de las isofreáticas en la zona aluvial muestran valores que van desde los 240 m.s.n.m hasta 60 m.s.n.m en la parte baja en ambas cuencas y, la dirección del flujo muestran una tendencia general del suroeste hacia el noreste; tal como se aprecia en la Figura 6.2. Las líneas de flujo siguen la dirección del drenaje natural de los ríos y quebradas de la zona evidenciando una influencia bastante significativa de éstos drenajes sobre el acuífero.

Como se aprecia de la Figura 6.2, las curvas se encuentran más seguidas entre la línea isofreática 240 y la 160, lo cual evidencia un gradiente mayor en la parte superior de las cuencas. En la parte baja las líneas se aprecian más separadas por lo que el gradiente es menor.

Se puede determinar el gradiente hidráulico del acuífero midiendo la diferencia de carga entre dos líneas equipotenciales y la distancia entre ambas; de modo que:

$i = \Delta h / L$
i = gradiente hidráulico
Δh = Diferencia de carga hidráulica entre dos líneas equipotenciales
L = Distancia entre las dos líneas equipotenciales

Para la cuenca del Río Peje el gradiente hidráulico se calculó en el tramo inferior de la cuenca entre las equipotenciales 100 y 60 m.s.n.m. con una distancia entre ambas de 1,625 m.

$\Delta h = h_1 – h_2 = 100 – 60$
$\Delta h = 40m$
$L = 1,625$ m
$i = 2,46\ E^{-02}$

Para el tramo inferior del acuífero superior de la cuenca del Río Destierro entre las equipotenciales 200 y 100 m.s.n.m. con una distancia entre ambas de 1,333 m.

$\Delta h = h_1 – h_2 = 100 – 60$
$\Delta h = 40$ m
$L = 1,333$ m
$i = 3,0\ E^{-02}$

De acuerdo con los resultados el gradiente de la cuenca del Río Destierro en la zona baja es un 23% mayor que el de la cuenca del Río Peje.

6.5 Parámetros hidráulicos del acuífero

6.5.1 Transmisividad.

Este parámetro se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unitario.

Permite conocer el caudal que pasa a través de una sección cualquiera de un acuífero, toda vez que sean conocidos el espesor saturado del acuífero (b), el gradiente hidráulico (i), y por supuesto la conductividad hidráulica del acuífero (K).

Conociendo los caudales extraídos en cada pozo y los correspondientes descensos dinámicos (s) producidos por el bombeo, se puede calcular los caudales específicos de los mismos (Q/s), que en principio, y en régimen permanente, cabe considerar como directamente proporcionales a la transmisividad del acuífero. Según Custodio & Llamas (1983), esta relación se conoce como la ecuación de Galofré, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$T(m^2/d) = \frac{100\ Q(l/s)}{s(m)}$$

La transmisividad del acuífero superficial, se determinó a partir de la información de los pozos que están ubicados en la zona de estudio. Se toman aquellos pozos que reportan nivel estático y nivel dinámico, además se indagó en los reportes de perforación que suministró el SENARA para cada pozo, en los cuales en ningún caso se muestran los datos de la prueba de bombeo ni los resultados de la transmisividad.

Al pozo BO – 18 ubicado en la finca La Francia, propiedad de Hacienda Ojo de Agua, se le hizo una prueba de recuperación el día 15 de enero de 2009. En la figura 6.3 se muestra la gráfica de la recuperación, con el análisis de la misma se determinó la transmisividad en ese sitio en 6,6 m^2/d.

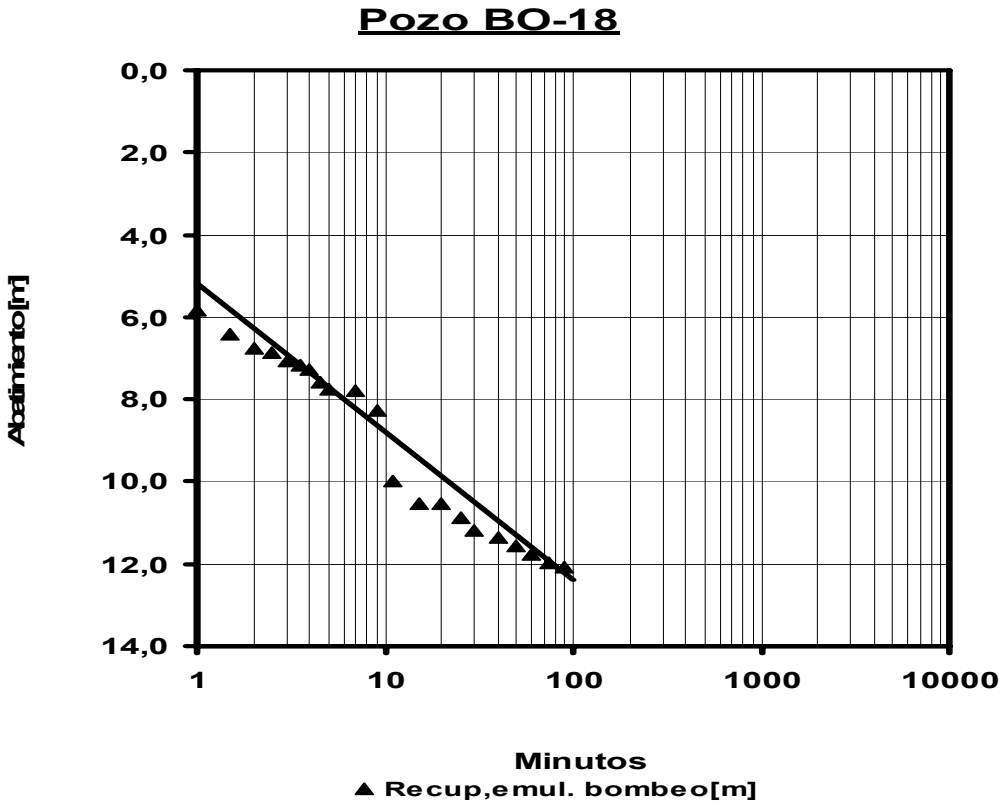


Figura 6.3: Gráfico abatimiento vs. tiempo. Prueba de recuperación pozo BO – 18.

En el Cuadro 6.3 se muestran los valores de transmisividad. Para la obtención de este parámetro se utilizó la fórmula de Galofré, mencionada anteriormente.

Cuadro 6.3: Valores de transmisividad de los pozos en la zona de estudio

Pozo	X	Y	Propietario	Qfin (l/s)	N.E. (m.b.n.s.)	N.D. (m.b.n.s.)	Prof (m)	T(m^2/d)
B014	585600	234000	FRUCTA C.R.S.A.	10,0	1,0	17,2	27,0	58,1
B015	585480	234100	FRUCTA C.R.S.A.	3,8	4,8	19,5	42,0	25,7
B016	585800	234200	FRUCTA C.R.S.A.	4,2	0,5	9,4	20,0	46,7
BO18*	585350	232600	HACIENDA OJO DE AGUA	1,5	6,0	13,2	20,0	6,6
B02	588325	230450	AYA	12,0	2,7	28,9	45,7	45,8
B020	586128	233300	ASESORES GONZALEZ	2,0	5,0	30,0	39,0	8,0
B024	589400	237750	AYA COMUNAL	8,0	6,7	15,5	35,0	91,3
B03	588500	230450	AYA	18,4	6,4	29,0	49,7	81,4

Pozo	X	Y	Propietario	Qfin (l/s)	N.E. (m.b.n.s.)	N.D. (m.b.n.s.)	Prof (m)	T(m^2/d)
B05	586500	232900	RAMON AGUILAR FACIO	1,3	9,1	14,0	21,3	25,9
B06	591250	230750	CABSHA	1,6	9,0	19,6	30,0	14,6
GM16	580600	244300	E.A.R.T.H.	10,0	2,9	22,6	38,0	50,7
GM69	588840	239520	C.C.S.S.	2,3	13,5	19,0	30,0	41,8
GM95	585500	242300	COMUNIDAD	3,5	21,0	27,5	40,0	53,8

* Valor de transmisividad calculado a partir de la prueba de recuperación realizada a este pozo el día 15-enero-2009

Se debe considerar que los valores de transmisividad obtenidos mediante este procedimiento son relativos, dado que se requiere un análisis exhaustivo de cada prueba de bombeo para obtener la transmisividad del acuífero en cada punto; sin embargo para los propósitos de este estudio, la aproximación por la fórmula de Galofré se considera apropiada. De acuerdo a los datos del Cuadro 6.3, los pozos BO – 2, BO – 3 y BO – 6 no se consideraran dado que su emplazamiento es en la margen derecha del río Reventazón la cual pertenece a otra unidad acuífera.

Con el propósito de obtener datos espaciales de transmisividad, se trazó un mapa de isotransmisividades con el cual se obtuvieron datos en ambas cuencas. Sin embargo, hay que hacer notar que en la cuenca del Río Destierro no existen pozos que puedan reportar transmisividades; en la cuenca del río Peje se identificaron cuatro, y los otros tres se encuentran fuera de ambas cuencas. En la Figura 6.4 se muestra el mapa de isotransmisividades.

6.6 Balance hídrico del acuífero superficial

A continuación se presenta el cálculo de los diferentes componentes del balance hídrico en el acuífero, de acuerdo al principio de conservación de la masa expresado en la ecuación de continuidad correspondiente a:

Entradas = Salidas ± Cambio en el almacenamiento

El propósito es tratar de obtener el orden de magnitud e importancia relativa de los diferentes términos involucrados en el balance hídrico. En cuanto a las salidas o extracciones del acuífero, se cuantifican las extracciones por pozo, las descargas de las fuentes o manantiales, la salida por flujo subterráneo y los tramos efluentes de los ríos, quebradas y canales. En el tanto las entradas al acuífero se cuantifican con el aporte por infiltración de lluvia y por el aporte de los tramos influentes de los ríos, quebradas y canales y el aporte por flujo subterráneo proveniente de las otras unidades geológicas. La ecuación de balance del acuífero de la zona aluvial en ambas cuencas queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{I + \Sigma\Delta r_i + FS_e = \Sigma\Delta r_e + Qp + F + FS_s}$$

Donde:

I : infiltración por lluvia (del balance hídrico de suelos)
$\Sigma\Delta r_i$: Tramos influentes de los ríos, quebradas y canales

$\Sigma\Delta r_e$: Tramos efluentes de los ríos, quebradas y canales
Qp : Extracción por pozos
F : Descarga de fuentes o manantiales
FS_s : Flujo subterráneo salidas obtenido por (T*i*L (Darcy))
FS_e : Flujo subterráneo entradas obtenido por (T*i*L (Darcy))

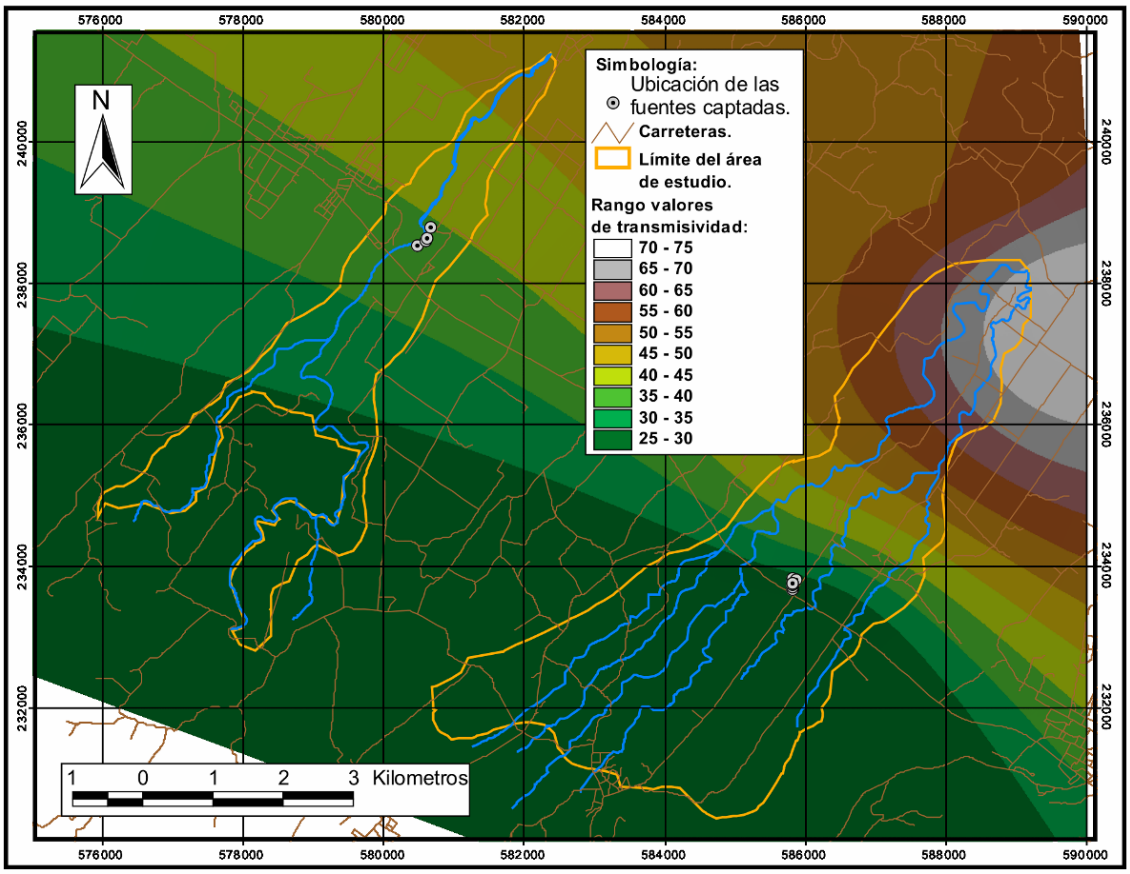


Figura 6.4: Mapa de isotransmisividades en las cuencas del R. Destierro y R. Peje.

6.6.1 Extracciones del acuífero

El cálculo del volumen de extracciones del acuífero se hace tomando en cuenta los usos actuales del agua; es decir, a partir del abastecimiento de agua para uso doméstico y de tipo agroindustrial tales como las empacadoras de frutas; esta estimación se hará con base en los datos de caudal de los pozos emplazados en cada cuenca. Además deberá tomarse en cuenta el flujo de agua subterránea del acuífero y el aporte de los ríos quebradas y canales en los tramos en donde el comportamiento de estos cuerpos de agua sea efluente.

6.6.1.1 Cuenca del Río Destierro

En esta cuenca la extracción por pozos es relativamente poca, solamente existen tres pozos reportados que aprovechan agua subterránea en esta cuenca. Los pozos BO – 19 y el BO – 25 tienen profundidades superiores a los 60 m por lo cual se presume que ambos captan el acuífero inferior, por lo que no serán tomados en cuenta para la extracción de agua subterránea del acuífero superior.

Cuadro 6.4: Pozos emplazados en la cuenca del Río Destierro

Pozo	X	Y	Propietario	Q (l/s)	Prof. (m)
B012	581050	238400	Corrugados del Atlántico	19,8	39,0
B019	580550	238225	Agroindustrial Babilonia	6,3	60,0
B025	580133	237567	Fiduciaria Cuscatlán S.A.	8,0	70,0
Total de extracción por pozos del acuífero superior				**19,8 l/s**	

Las fuentes de Milano se consideran descargas del acuífero superior y sus caudales medidos en enero de 2009 se reportan a continuación:

Cuadro 6.5: Aforo fuentes de Milano*

Fuente	X	Y	Q (l/s)
Milano Nº 1	238614	580605	1,81
Milano Nº 2	238633	580616	3,86
Milano Nº 3	238791	580662	3,25
Milano Nº 4	233675	585812	0,57
TOTAL		**9,5 l/s**	

*Fecha de aforo: semana del 5 al 9 de enero de 2009

El acuífero descarga en la parte baja de la cuenca de sentido suroeste a noreste y el cálculo de este caudal obedece a la ley de Darcy, la cual se puede apreciar a continuación:

Q = KiA, se transforma en Q =KbLi; es decir, Q = Tli
Siendo:
T la transmisividad del acuífero en m^2/d
i el gradiente hidráulico del acuífero en m/m
l la sección transversal del acuífero en m.

La sección transversal del acuífero en el corte medio de la cuenca del Río Destierro entre las cotas 100 y 60 m.s.n.m. es de 1,061 m. El gradiente hidráulico en ese punto es i= 3,0 E^{-02} m/m y la transmisividad del acuífero en ese tramo es 40 m^2/d (ver Figura 6.4). Por lo tanto el caudal que pasa por esa sección del acuífero es:

Q = T * i * L
Q = 40 * 3,0 E^{-02} * 1061
Q = 1273 m^3/d
Q = 14,7 l/s

Los tramos efluentes de los ríos, quebradas y canales en la cuenca del río Destierro se muestran en el Cuadro 6.6:

Cuadro 6.6: Descarga del acuífero en los tramos efluentes de ríos, quebradas y canales en la cuenca del Río Destierro

Curso de agua	Caudales totales (l/s)
Río Destierro	11137
Río Perla	1045
Quebrada Honda	931
Canal 1	5,73
Canal 2	12,48
Canal 3	3,81
Canal 4	5,67
Canal 5	4,73
TOTAL	**13145**

6.6.1.2 Cuenca del Río Peje

En esta cuenca la extracción por pozos es mayor que en la cuenca del Río Destierro, existen 12 pozos reportados que aprovechan agua subterránea en esta cuenca. Los pozos BO – 18, BO – 23 y BO – 4 tienen profundidades superiores a los 60 m por lo cual se presume que estos pozos captan el acuífero inferior, por lo que no serán tomados en cuenta para la extracción de agua subterránea del acuífero superior.

Cuadro 6.7: Pozos emplazados en la cuenca del Río Peje.

Pozo	X	Y	Propietario	Q (l/s)	Prof. (m)
B010	585750	233350	Grupo Agrícola la Francia	0,5	18,0
B014	585600	234000	Fructa C.R.S.A.	(No está en uso)	
B015	585480	234100	Fructa C.R.S.A.	3,8	42,0
B016	585800	234200	Fructa C.R.S.A.	4,2	20,0
B017	586000	234100	Fructa C.R.S.A.	4,6	20,0
B018	585350	232600	Hacienda Ojo de Agua		115,0
B020	586128	233300	Asesores González y Asociados	2,0	39,0
B023	585700	231825	Nolichuky S.A	2,0	75,0
B04	584300	230700	AyA	30,0	70,0
B05	586500	232900	Ramón Aguilar Facio	1,3	21,3
Total de extracción por pozos del acuífero superior				**16,3 l/s**	

Las fuentes del El Cairo y Luisiana se consideran descargas del acuífero superior y sus caudales medidos en enero de 2009 se reportan a continuación:

Cuadro 6.8: Aforo fuentes de El Cairo y Luisiana*

Fuente	X	Y	Q (l/s)
El Cairo	233820	585819	19,03
Luisiana Nº 1	233675	585812	0,57
Luisiana Nº 2	233696	585809	0,06
Luisiana Nº 3	233743	585809	0,61
Luisiana Nº 4	233796	585858	2,44
Luisiana Nº 5	233761	585815	0,59
Luisiana Nº 6	233755	585813	0,31

Fuente	X	Y	Q (l/s)
TOTAL		**23,6 l/s**	

*Fecha de aforo: semana del 5 al 9 de enero de 2009

El acuífero descarga en la parte baja de la cuenca de sentido suroeste a noreste y el cálculo de este caudal obedece a la ley de Darcy, la cual se puede apreciar a continuación:

Q = KiA, se transforma en Q =KbLi; es decir, Q = Tli
Siendo:
T la transmisividad del acuífero en m^2/d
i el gradiente hidráulico del acuífero en m/m
l la sección transversal del acuífero en m.

La sección transversal del acuífero en el corte medio de la cuenca del Río Peje entre las cotas 100 y 60 m.s.n.m. es de 1,900 m. El gradiente hidráulico en ese punto es 2,46 E^{-02} m / m y la transmisividad del acuífero en ese tramo es 50 m^2/d (ver Figura 6.4). Por lo tanto el caudal que pasa por esa sección del acuífero es:

Q = T * i * L
Q = 50 * 2,46 E^{-02} * 1900
Q = 2337 m^3/d
Q = 27 l/s

Los tramos efluentes de los ríos, quebradas y canales en la cuenca del río Peje se muestran en el Cuadro 6.9:

Cuadro 6.9: Caudales aportados por el acuífero en los tramos efluentes de ríos, quebradas y canales en la cuenca del Río Peje

Curso de agua	Caudales totales (l/s)
Río Peje	4084
Quebrada Muralla	345
Quebrada El Cairo	183
Quebrada Once	164
Río Herediana	909
TOTAL	**5985**

6.6.2 Aportes al acuífero

El cálculo del volumen de entradas del acuífero se hace tomando en cuenta el volumen de infiltración por agua de lluvia de acuerdo al balance hídrico de suelos. Además deberá tomarse en cuenta el aporte de los ríos quebradas y canales en los tramos en donde el comportamiento de estos cuerpos de agua sea influente y el aporte por flujo subterráneo provenientes de las otras unidades geológicas que se encuentran aguas arriba del acuífero aluvial considerado. Es importante considerar que aguas arriba del acuífero existen zonas de cultivo de piña y que esta zona recarga al acuífero por lo que existe un peligro potencial de contaminación hacia el acuífero.

6.6.2.1 Cuenca del Río Destierro

En la parte alta de la cuenca, las unidades geológicas correspondientes a las coladas de lavas descritas tienen un aporte subterráneo al acuífero aluvial de sentido suroeste a noreste y el cálculo de este caudal obedece a la ley de Darcy, la cual se puede apreciar a continuación:

Q = KiA, se transforma en Q =KbLi; es decir, Q = Tli
Siendo:
T la transmisividad del acuífero en m^2/d
i el gradiente hidráulico del acuífero en m/m
l la sección transversal del acuífero en m.

La sección transversal del acuífero entre las secuencias de las coladas de lavas y el acuífero de la cuenca del Río Destierro se encuentra entre las cotas 200 y 180 m.s.n.m y tiene una longitud 2,100 m. El gradiente hidráulico en ese punto es i= 4,0 E^{-02} m/m y la transmisividad del acuífero en ese tramo es 30 m^2/d (ver Figura 6.4). Por lo tanto el caudal que pasa por esa sección del acuífero es:

Q = T * i * L
Q = 30 * 4,0 E^{-02} * 2100
Q = 2520 m^3/d
Q = 29,2 l/s

El aporte por infiltración de lluvia de acuerdo al balance hídrico de suelos se muestra en el Cuadro 6.10.

Cuadro 6.10: Aporte al acuífero por infiltración de lluvia en la cuenca del Río Destierro

Uso de suelo	Pendiente 2 - 7%	
	Área (Km^2)	Vol. Recarga (l/s)
Bosque	3,32	219
Cultivos	2,57	195
Pasto	3,62	144
Urbano	0,76	9
Total	**10,27**	**567**

Los tramos influentes de los ríos, quebradas y canales en la cuenca del río Destierro se muestran en el Cuadro 6.11:

Cuadro 6.11: Recarga al acuífero en los tramos influentes de ríos, quebradas y canales en la cuenca del Río Destierro

Curso de agua	Caudales totales (l/s)
Río Destierro	3103
Río Perla	---
Quebrada Honda	469

Curso de agua	Caudales totales (l/s)
Canal 1	----
Canal 2	----
Canal 3	11,37
Canal 4	----
Canal 5	----
TOTAL	**3583**

6.6.2.2 Cuenca del Río Peje

En la parte alta de la cuenca, las unidades geológicas correspondientes a los depósitos de lahares descritos tienen un aporte subterráneo al acuífero aluvial de sentido suroeste a noreste y el cálculo de este caudal obedece a la ley de Darcy, la cual se puede apreciar a continuación:

Q = KiA, se transforma en Q =KbLi; es decir, Q = Tli
Siendo:
T la transmisividad del acuífero en m^2/d
i el gradiente hidráulico del acuífero en m/m
l la sección transversal del acuífero en m.

La sección transversal del acuífero entre las secuencias de los depósitos de lahares y el acuífero de la cuenca del Río Peje se encuentra entre las cotas 260 y 240 m.s.n.m y tiene una longitud 4,200 m. El gradiente hidráulico en ese punto es i= 4,0 E^{-02} m/m y la transmisividad del acuífero en ese tramo es 25 m^2/d (ver Figura 6.4). Por lo tanto el caudal que pasa por esa sección del acuífero es:

Q = T * i * L
Q = 25 * 4,0 E^{-02} * 4200
Q = 4200 m^3/d
Q = 48,6 l/s

El aporte por infiltración de lluvia de acuerdo al balance hídrico de suelos se muestra en el Cuadro 5.33

Cuadro 6.12: Aporte al acuífero por infiltración de lluvia en la cuenca del Río Peje

Uso de suelo	Pendiente 2 - 7%	
	Área (Km^2)	Vol. Recarga (l/s)
Bosque	6,99	311
Cultivos	4,12	301
Pasto	10,64	526
Urbano	2,40	175
Subtotal:	**24,15**	**1313**

Los tramos influentes de los ríos, quebradas y canales en la cuenca del río Destierro se muestran en el Cuadro 6.13:

Cuadro 6.13: Recarga al acuífero en los tramos influentes de ríos, quebradas y canales en la cuenca del Río Peje

Curso de agua	Caudales totales (l/s)
Río Peje	2818
Quebrada Muralla	----
Quebrada El Cairo	----
Quebrada Once	223
Río Herediana	440
TOTAL	**3481**

Cuadro 6.14: Balance hídrico anual en el acuífero de la cuenca del Río Destierro

ENTRADAS (l/s)			SALIDAS (l/s)				DIFERENCIA (l/s)
Recarga por lluvia	Tramos influentes	Flujo subterráneo	Pozos	Manantiales	Tramos efluentes	Flujo subterráneo	Entradas - Salidas
567	3583	29,2	19,8	9,5	13145	14,7	9010
4179			13189				68,3%

Cuadro 6.15: Balance hídrico anual en el acuífero de la cuenca del Río Peje

ENTRADAS (l/s)			SALIDAS (l/s)				DIFERENCIA (l/s)
Recarga por lluvia	Tramos influentes	Flujo subterráneo	Pozos	Manantiales	Tramos efluentes	Flujo subterráneo	Entradas - Salidas
1313	3481	48,6	16,3	23,6	5985	27	1309
4843			6152				21,3%

De acuerdo con los resultados mostrados en el Cuadro 6.14 y el Cuadro 6.15, se observa que en la cuenca del Río Destierro existe una diferencia sustancial entre las entradas y salidas del acuífero, de un 68,3% en el tanto en la cuenca del Río Peje la diferencia es del 21,3%.

Hay que destacar que en este balance las variables que se refieren a recarga y descarga por tramos influentes y efluentes, son muy sensibles a los resultados finales del balance.

La explicación de las diferencias pueden ser atribuidas a que las fechas en que se realizaron los aforos, los cauces estaban cargados con escorrentía superficial, puesto que esas fechas corresponden a una semana posterior a las inundaciones que azotaran la zona atlántica en el mes de noviembre del año 2008.

Lo anterior se evidencia en el Registro Histórico de aforos suministrado por el AyA en Quebrada Honda (ver anexo 7), en el cual se tienen 69 datos de aforo de un registro desde el año 1996; entre los cuales figura el caudal mayor medido en agosto de 1998 de 1349 l/s y un caudal menor de 93 l/s medido en marzo del 2008. Los aforos realizados en diciembre del año 2008 en un sitio cercano a los que realizó el AyA reportó un caudal de 959 l/s; lo que demuestra que se está en presencia de flujo con escorrentía superficial.

El acuífero tanto en la cuenca del Río Destierro como en la cuenca del Río Peje recarga un 45% de la precipitación por lluvia; éste valor es relativamente alto comparado con otras zonas del país.

6.7 Modelo conceptual del acuífero

Una vez realizada la caracterización del acuífero, se procede a elaborar el modelo conceptual del mismo. De acuerdo con las características hidrogeológicas, en el área de estudio se tiene un acuífero poroso sedimentario, de tipo libre, albergado en materiales aluviales que contienen gravas y arenas, depositadas por los ríos Peje y Destierro.

El nivel freático oscila entre unos pocos centímetros hasta aproximadamente los 8 m de profundidad. Se ubica en materiales con características heterogéneas, debido a la presencia de lentes arenosos y arcillosos que generalmente producen variaciones es su conductividad hidráulica y por lo tanto en el comportamiento del flujo. El espesor del mismo varía entre 40 a 70 m en la cuenca del río Peje y entre 20 a 60 m en la cuenca del río Destierro.

Hacia la parte alta de ambas cuencas, los materiales predominantes son de origen volcánico. En el caso del río Destierro, principalmente se trata de coladas de lavas provenientes de los volcanes Turrialba, Dos Novillos y Alto Botella. En el río Peje, se tratan de lahares con clastos de andesitas englobados en una matriz arcillosa. Estos lahares subyacen a los aluviones descritos anteriormente.

La producción de los pozos construidos en estos materiales es variable, donde los caudales de prueba oscilan entre 0,5 hasta 30 l/s y sus profundidades varían de 9 – 115 m, para una profundidad promedio de 40 m.

Para la cuenca del Río Peje el gradiente hidráulico se calculó en el tramo inferior de la cuenca, cuyo resultado es 0,0246. En la cuenca del Río Destierro, el gradiente del acuífero superior es de 0,0300.

La dirección del flujo muestra una tendencia general del suroeste hacia el noreste; tal como se aprecia en la Figura 6.2: Líneas isofreáticas en las cuencas Río Destierro y Río Peje. En las Figuras 6.5 a 6.8 se muestran a continuación los esquemas con el modelo conceptual del acuífero en cada uno de los perfiles hidrogeológicos estudiados.

6.8 Vulnerabilidad a la contaminación.

Para evaluar la posibilidad de contaminación en una zona determinada se deben considerar los principios del transporte de contaminantes en los sistemas acuíferos subterráneos. Para ello es indispensable contar con los siguientes parámetros claves para determinar la vulnerabilidad a la contaminación microbiológica:

a) El espesor de la zona permanentemente no saturada. Este parámetro tiene un comportamiento asimétrico en el área de estudio, por lo que fue necesario para su cálculo, el uso de un sistema de información geográfico con el que se subdividió las cuencas en estudio en pequeñas áreas de 25 m x 25 m.

b) El material sobreyaciente al acuífero, el cual es definido por el mapa geológico del área de estudio.

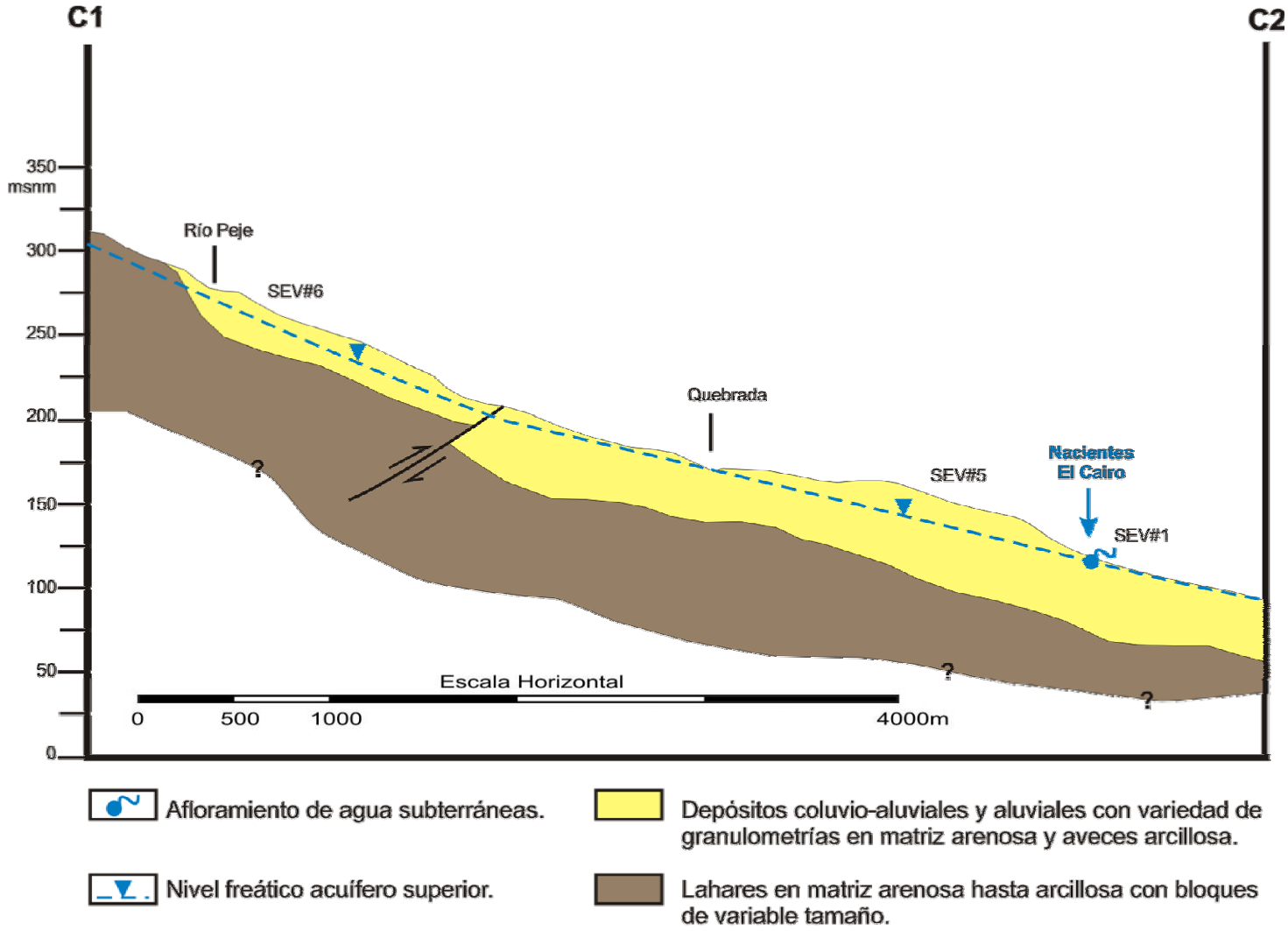


Figura 6.5: Perfil hidrogeológico longitudinal C1 – C2. Cuenca del río Peje.

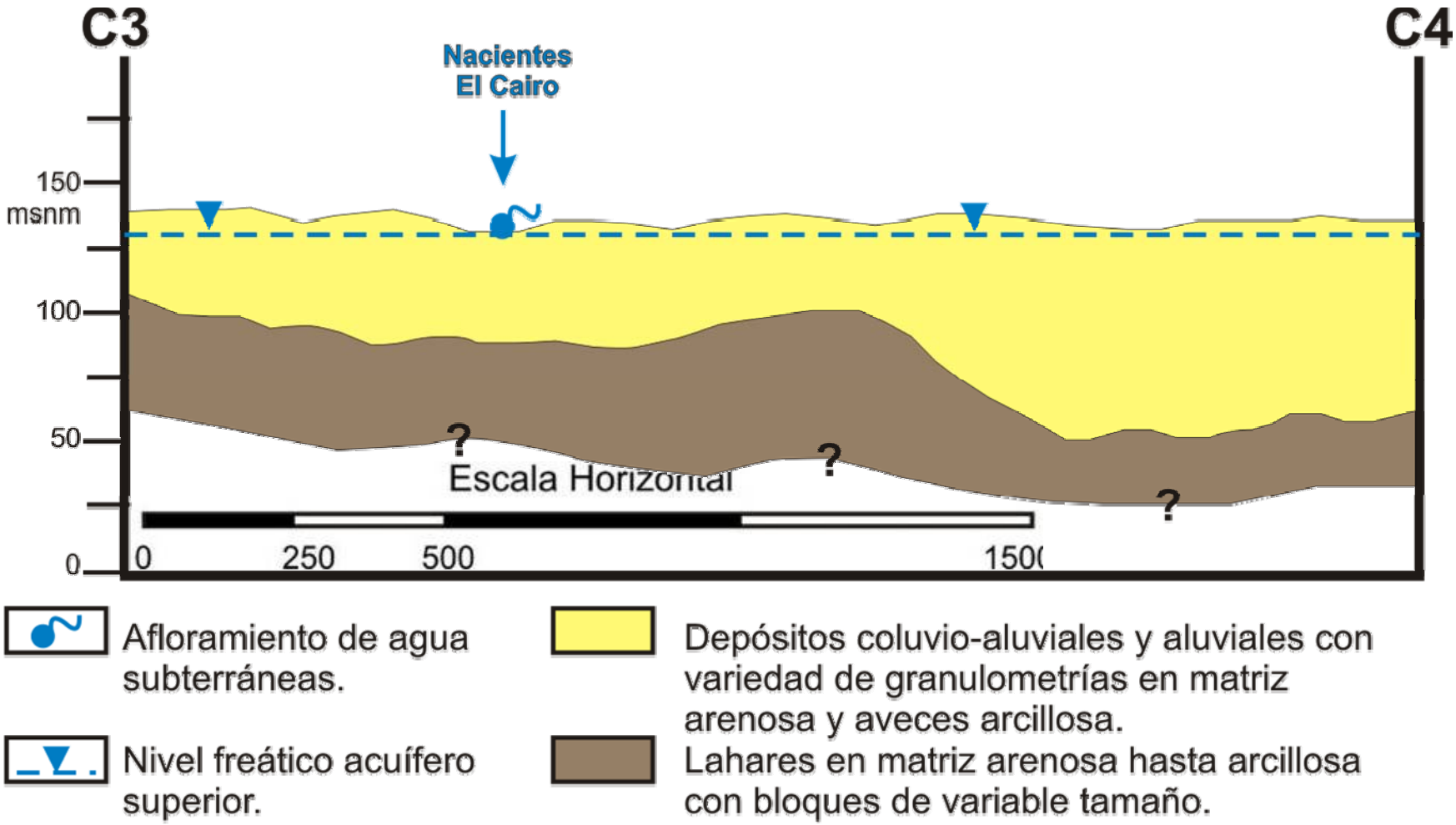


Figura 6.6: perfil hidrogeológico transversal C3 – C4. Cuenca del río Peje.

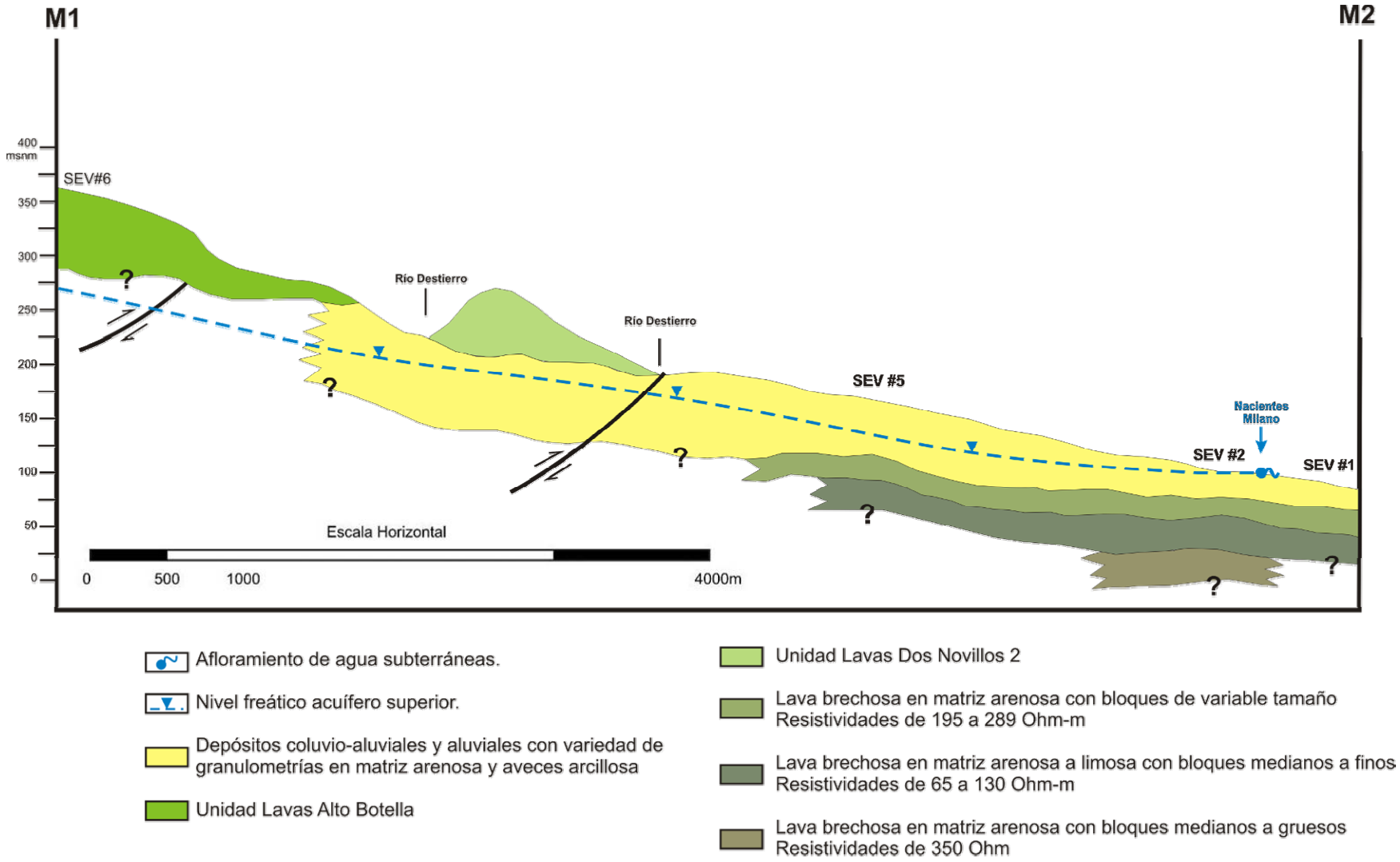


Figura 6.7: perfil hidrogeológico longitudinal M1 – M2. Cuenca del río Destierro.

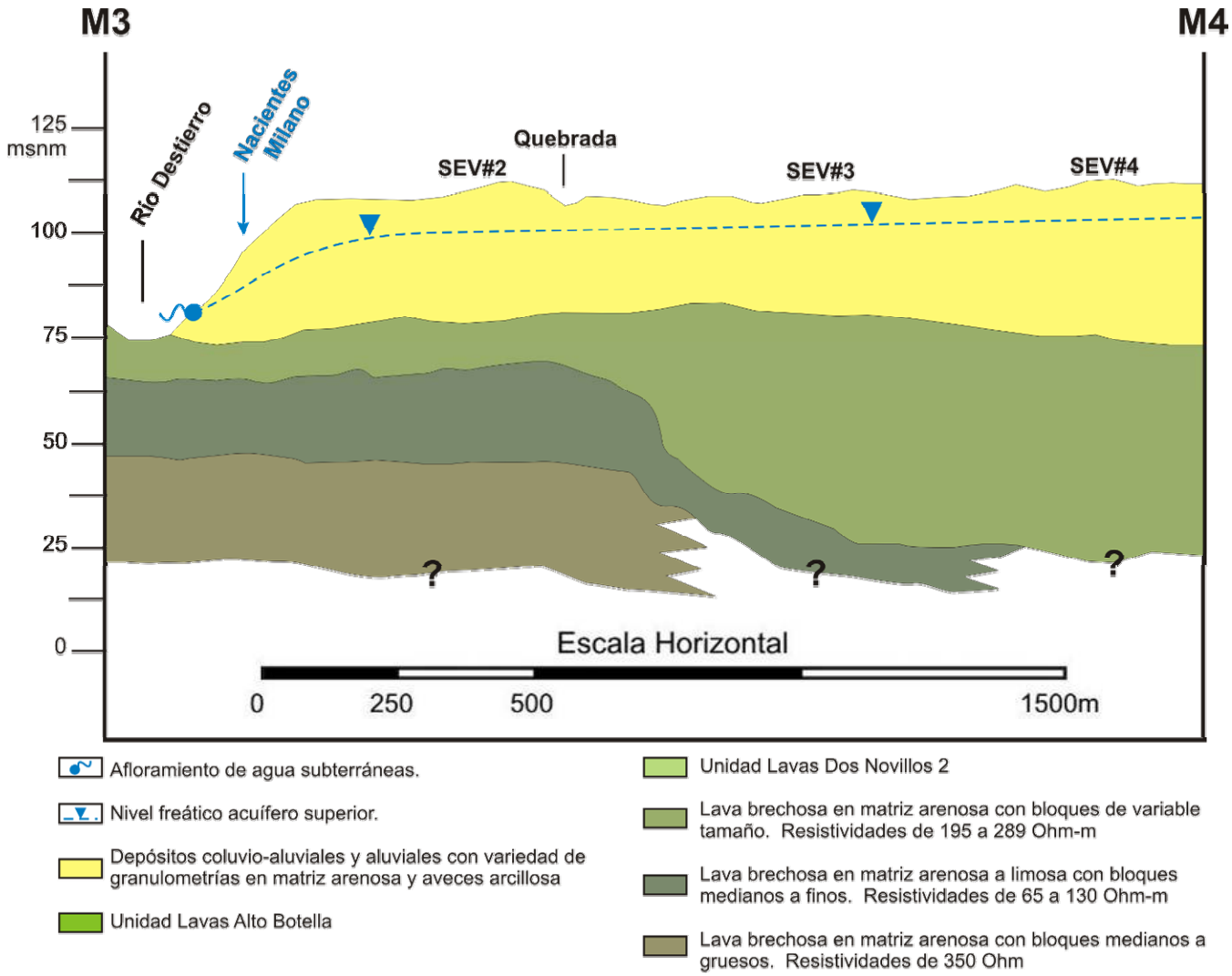


Figura 6.8: perfil hidrogeológico transversal M3 – M4. Cuenca del río Destierro.

c) El grado de confinamiento y el carácter de los acuíferos de donde se obtiene el agua subterránea. Este parámetro es definido por el modelo hidrogeológico correspondiente al área de estudio.

Tomando en cuenta los parámetros mencionados, es posible establecer un criterio de vulnerabilidad para el caso en estudio; éste se refiere al sistema GOD para la evaluación del índice de vulnerabilidad del acuífero (Foster et. al, 2003), donde "G" se refiere al grado de confinamiento del acuífero, "O" al material sobreyaciente y "D" al espesor de la zona no saturada. Cada uno de estos parámetros tendrá un valor entre 0 y 1 según las especificaciones de la Figura 6.9. El índice de vulnerabilidad se obtiene del producto de los valores asignados a cada parámetro, y su magnitud determinará si la vulnerabilidad es: ninguna, baja, moderada, alta o extrema.

Aplicando las condiciones mencionadas a la escala de clasificación del sistema GOD se tiene para este caso:

- Grado de confinamiento (Figura 6.10): se ha definido que el acuífero es libre no cubierto por lo que el valor asignado a este parámetro es igual a 1.
- Ocurrencia del estrato sobreyaciente (Figura 6.11): para el área de estudio, se definieron tres valores según el mapa geológico del área de estudio, donde los aluviones tiene un valor de 0,8, lavas recientes 0,7 y los lahares 0,6.
- Distancia al nivel del agua subterránea o espesor de la zona no saturada (Figura 6.12): como se mencionó anteriormente, este parámetro tiene un comportamiento asimétrico en el área de estudio, por lo que los valores asignados a este parámetro oscilan entre 0 y 1.

La multiplicación de estos factores genera valores que oscilan entre 0,4 y 0,8, lo que implica que el acuífero tendría una vulnerabilidad de moderada a extrema, sin embargo, al observar el mapa de vulnerabilidad de la Figura 6.13, se puede afirmar que el área de estudio presenta una vulnerabilidad alta a extrema, siendo más vulnerable la zona correspondiente a los depósitos aluviales ubicados en la parte baja de ambas cuencas.

El esquema original del método GOD no incluye una consideración explícita acerca de los suelos en un sentido agrícola. Sin embargo, la mayoría de los procesos que causan la atenuación de contaminantes y/o su eliminación en el subsuelo ocurre más rápidamente en la zona biológicamente activa del suelo como resultado de su mayor contenido de materia orgánica, arcilla y mucho más numerosas poblaciones de bacterias (Foster et. al, 2003).

En el caso de suelos que hayan sido removidos, como es el caso de las plantaciones piñeras en donde según las muestras de laboratorio, los suelos presentan bajo contenido de materia orgánica; la zona del suelo se debería considerar ausente y no debería utilizarse la reducción en el índice de vulnerabilidad por la consideración del suelo (Foster et. al, 2003), como efectivamente se hizo en este caso.

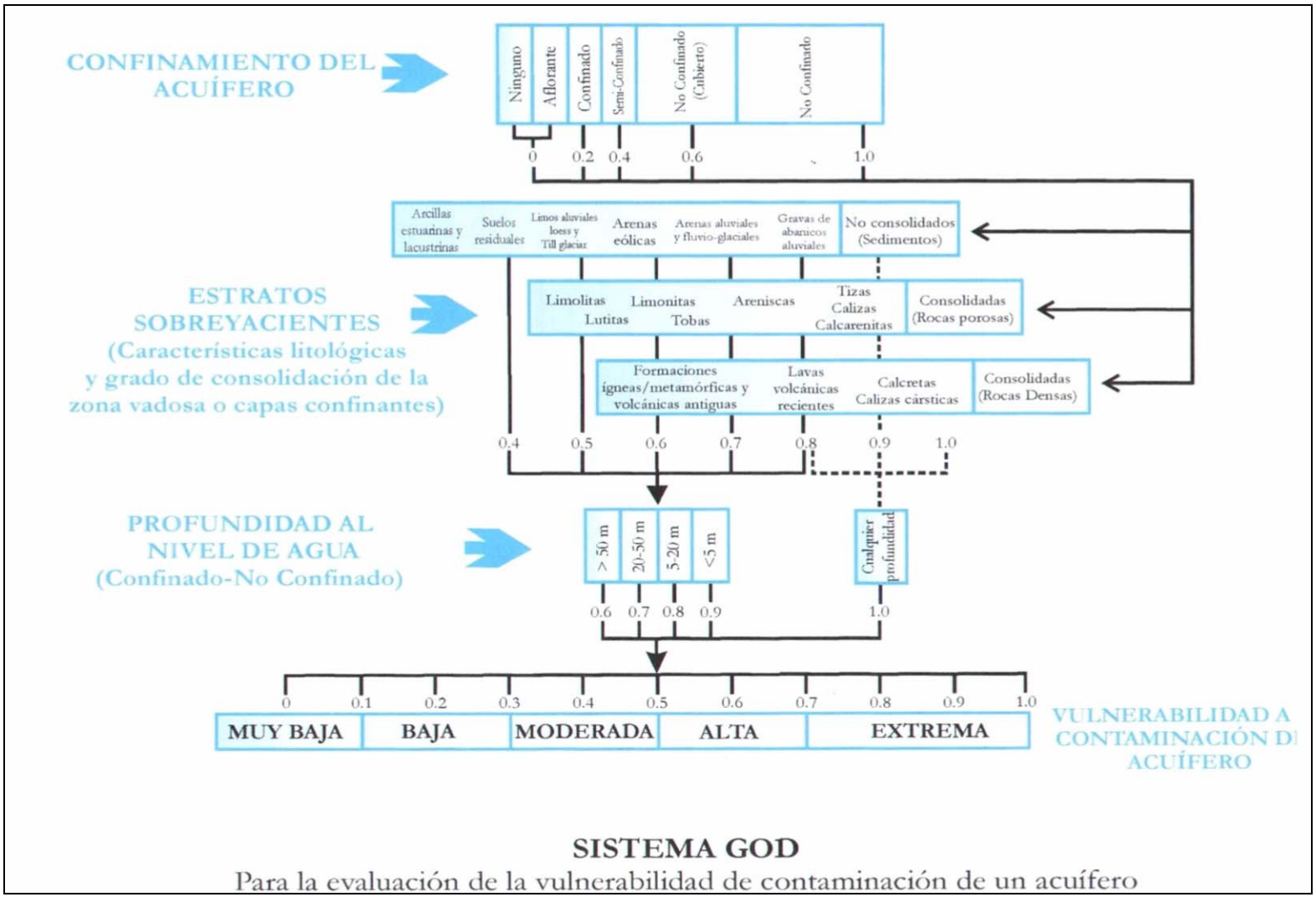


Figura 6.9: Esquema del Sistema GOD. Tomado de Foster et. al (2003).

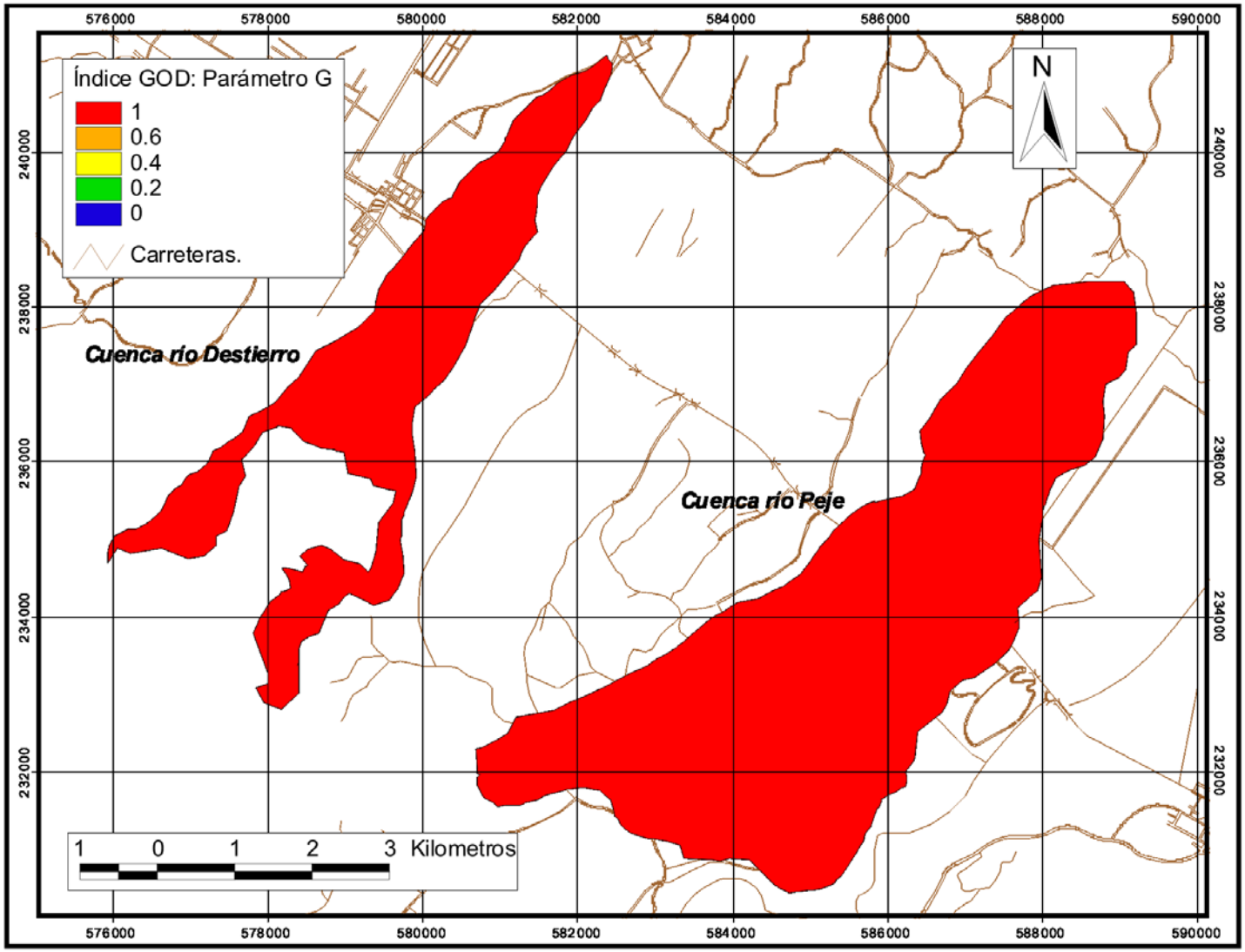


Figura 6.10: Índice GOD según el grado de confinamiento del acuífero.

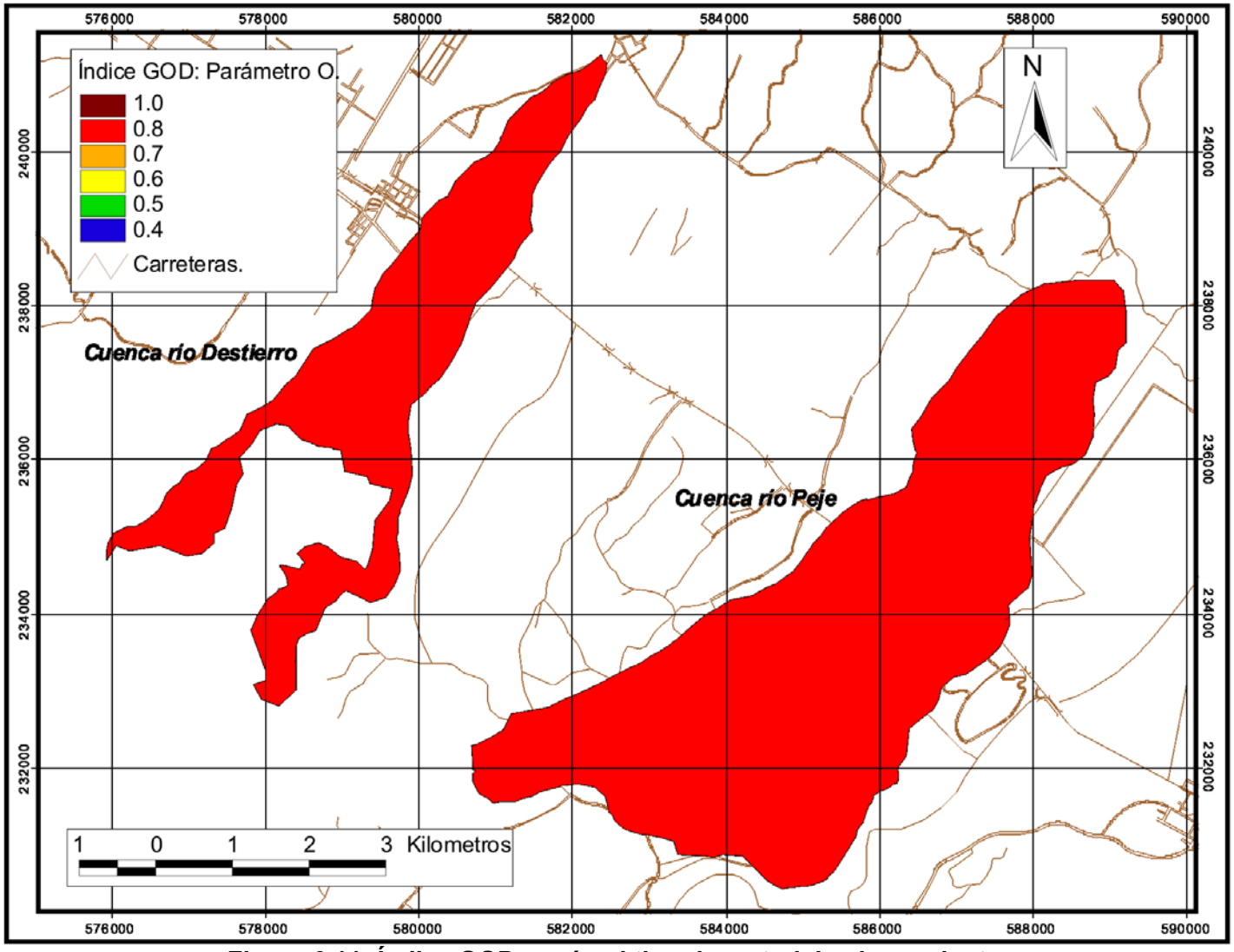


Figura 6.11: Índice GOD según el tipo de material sobreyaciente.

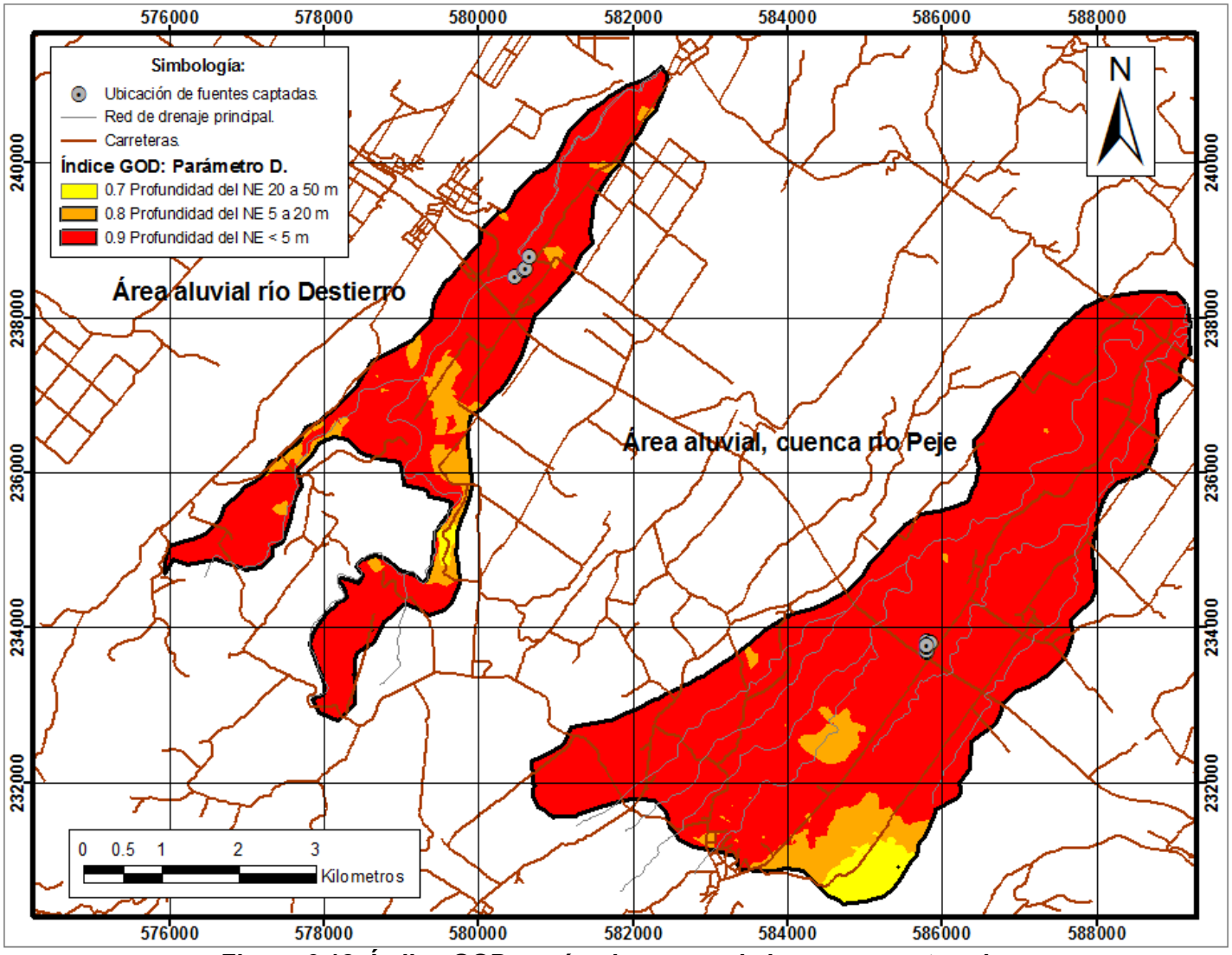


Figura 6.12: Índice GOD según el espesor de la zona no saturada.

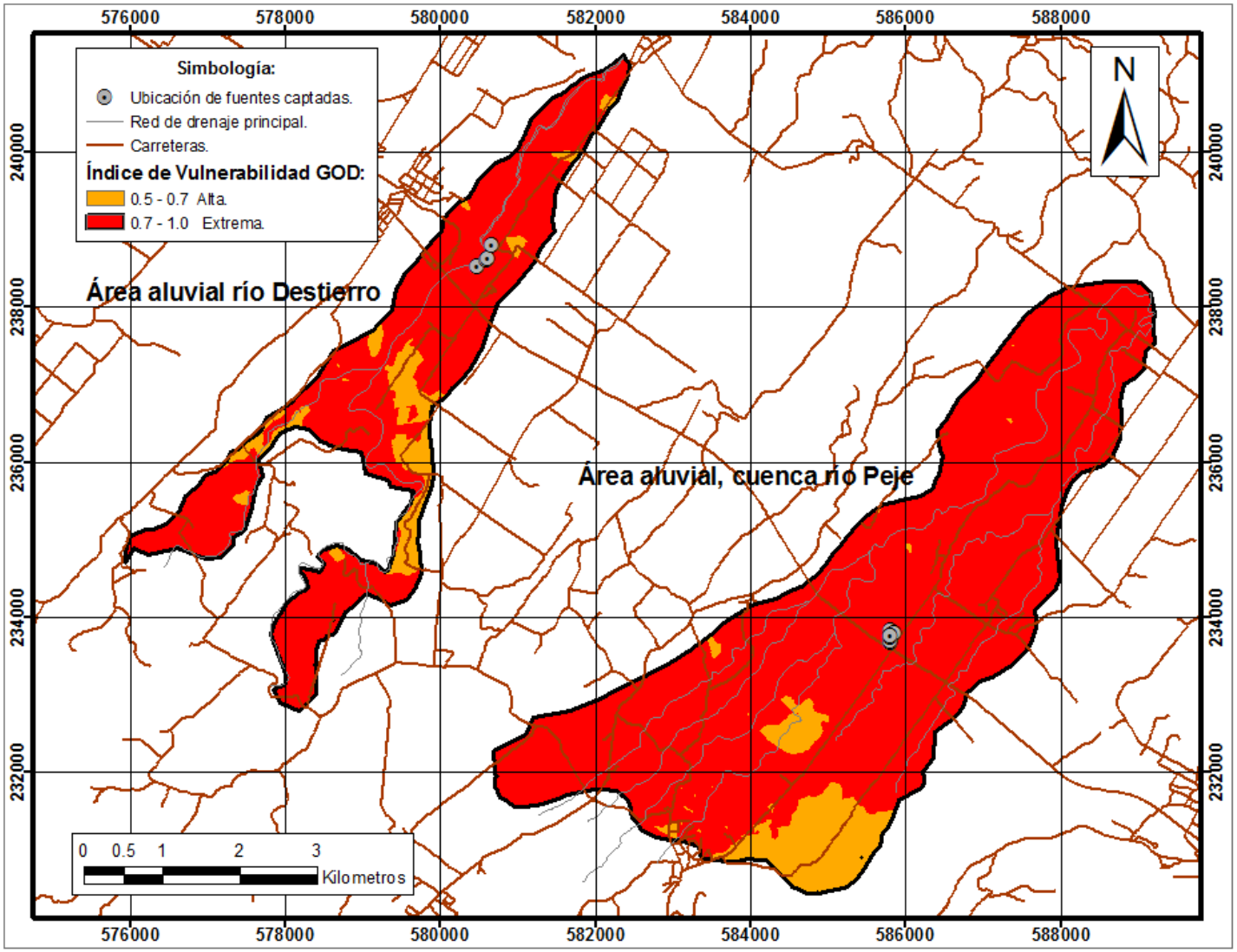


Figura 6.13: Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación según el Sistema GOD.

7 HIDROGEOQUÍMICA

Para evaluar el riesgo de contaminación de las fuentes, Foster & Hirata (1991) indican que debe considerarse:

- Las características de la carga contaminante:
    - Tipo
    - Intensidad de uso
    - Forma de aplicación
    - Duración
- La vulnerabilidad del acuífero:
    - Características del suelo en la zona no saturada
    - Condiciones de confinamiento
    - Litología global

Como resultado de la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero se puede llegar a determinar el riesgo de contaminación y el posible impacto en los abastecimientos de aguas subterráneas.

En condiciones normales, para que un contaminante alcance una fuente de agua debe infiltrar y lixiviar a través de la zona no saturada hasta alcanzar el acuífero. Posteriormente debe ser transportado por las aguas subterráneas hasta llegar al sitio de captación. En este camino el contaminante se ve expuesto a mecanismos que pueden afectar su movilidad o su masa.

En este capítulo se analizarán las características hidrogeoquímicas del bromacil y del suelo en la zona de estudio para determinar los mecanismos que lo afectan desde el punto de aplicación hasta las tomas de agua. Esto permitirá establecer la vulnerabilidad del acuífero en la zona y delimitar las zonas de protección de las fuentes conforme a los objetivos del estudio.

7.1 Mecanismos que afectan la movilidad

7.1.1 Zona no saturada

Antes de llegar al acuífero el contaminante debe atravesar la zona no saturada, donde rige la ecuación de Darcy que define el movimiento del agua en medios porosos de la siguiente manera:

$$V = K(dh/dt)$$

donde:
V = velocidad

K = coeficiente de permeabilidad del medio
dh/dt = gradiente hidráulico

7.1.2 Zona saturada

Una vez que alcanza el acuífero, el soluto se moviliza debido a dos procesos bien definidos:

1) *Mecanismo de advección*: mediante el cual el soluto es arrastrado a la misma velocidad del agua. Se rige por la ya mencionada ley de Darcy: $V = K(dh/dt)$, considerando la porosidad del medio (n), la ecuación de velocidad cambia a:

   $V = Q/nA$

   Y la masa de flujo en una dirección (F_x) debido a la advección es igual al producto de la velocidad y la concentración del soluto (C):

   $F_x = V_x nC$

   En un diferencial de área (dA), el total de soluto transportado es: $V_x nCdA$

2) *Mecanismo de dispersión hidrodinámica:* ocurre por dos procesos:

   a) *Difusión molecular*: obedece al principio de que un líquido con concentraciones diferentes de un determinado soluto tenderán a buscar el equilibrio, pasando de una zona de alta concentración a una de baja concentración. El transporte por difusión puede ocurrir aún si el líquido se encuentra en reposo.

      Está definido por la ecuación de Fick de difusión:

      $f_x = -D_d(dC/dx)$, donde:

      f_x = tasa de flujo másico ($M/L^2/L$)
      D_d = coeficiente de difusión, medido en laboratorio (L^2/T). Este valor normalmente oscila entre $1x10^{-9}$ y $2x10^{-9}$ m^2/s
      dC/dx = gradiente de concentración ($M/L^3/L$)

      El proceso de difusión es relativamente lento. Por ejemplo, para valores normales de D_d y un gradiente de concentración del 10%, el soluto tardaría 500 años para viajar 10 metros.

   b) *Dispersión mecánica:* ocurre por la mezcla mecánica que se da durante el proceso de advección, causada por las variaciones de velocidad entre canales de flujo, poros de diferente tamaño, fricción con los poros, etc. Puede darse dispersión longitudinal, en la dirección del flujo y dispersión transversal en la dirección perpendicular al flujo. El

coeficiente de dispersividad se denomina α, y tiene el subíndice L cuando es longitudinal y T cuando es transversal.

Sumando ambos procesos, la dispersión hidrodinámica se representa por la ecuación:

Longitudinal: $D_L = \alpha_L V_L + D_d$

Transversal: $D_T = \alpha_T V_T + D_d$, donde V es la velocidad promedio del flujo, y tiene el subíndice L cuando es longitudinal y T cuando es transversal.

A escala regional, como es el caso de este estudio, la dispersión se da como efecto de las variaciones espaciales (heterogeneidad) en el valor de K. Bethune (comunicación oral, 1995) indica que se puede tener diferencias de más de un orden de magnitud en el valor de K en medios porosos aparentemente homogéneos.

Para considerar el efecto de la dispersión hidrodinámica y tener un factor de seguridad, se hará el cálculo de las zonas de protección de manantiales utilizando la fórmula de advección con el valor más alto de permeabilidad determinado en la zona de estudio.

Otros mecanismos o características que pueden afectar el avance de un contaminante o su concentración en un acuífero son:

7.2 Mecanismos de transformación, reducción de masa o de retardación.

7.2.1 Biodegradación

Según Branco (1984), la biodegradación es el resultado de los procesos de digestión, asimilación y metabolización de un compuesto orgánico llevado a cabo por bacterias, hongos, protozoos y otros organismos. La biodegradación es un proceso natural, ventajoso no sólo por permitir la eliminación de compuestos nocivos impidiendo su concentración, sino que además es indispensable para el reciclaje de los elementos en la biosfera, permitiendo la restitución de elementos esenciales en la formación y crecimiento de los organismos (carbohidratos, lípidos, proteínas). La descomposición puede llevarse a cabo en presencia de oxigeno (aeróbica) o en su ausencia (anaeróbica). La primera es más completa y libera energía, dióxido de carbono y agua, es la de mayor rendimiento energético. Los procesos anaeróbicos son oxidaciones incompletas y liberan menor energía.

INE (2009) indica que el bromacil “puede sufrir una biodegradación lenta, tanto en condiciones aerobias como anaerobias. En general la volatilización, hidrólisis y fotólisis no son destinos ambientales importantes para este plaguicida, sin embargo en aguas alcalinas puede ser degradado por la luz. En los cuerpos de agua no se une a los sólidos suspendidos o sedimentos y su vida media es de 2 meses”.

UNEP et al. (1999) indica que se requiere la presencia de “sensibilizadores”, que son poco comunes, para que ocurra la biodegradación de este contaminante. Por lo tanto en este

estudio se considerará que la concentración original de bromacil no se verá afectada por biodegradación.

7.2.2 Volatilidad

Este mecanismo provoca el paso de una parte del soluto a la atmósfera en forma gaseosa. Está descrito por la Ley de Henry:

$P = HC_w$, donde:

P = presión parcial del contaminante en la fase gaseosa
H = constante de Henry
C_w = concentración del soluto

Según IRET (sin fecha), para el bromacil la constante de Henry es muy baja: H = 6,47 x 10^{-9} (adimensional), por lo que se considera despreciable el efecto de la volatilidad en la concentración del contaminante.

7.2.3 Coeficiente de partición de carbono orgánico K_{oc}

Se relaciona con la polaridad del compuesto y los enlaces de hidrógeno que se pueden formar entre el soluto y el agua. K_{oc} es bajo para compuestos hidrofóbicos y alto para compuestos hidrófilos.

Según Bethune (1995), puede expresarse como: $K_{oc} = K_d/f_{oc}$, donde
K_d = coeficiente de distribución
f_{oc} = fracción de carbono orgánico (por masa)

Para el bromacil el valor reportado de K_{oc} es de entre 32 y 72 g/ml (Russell MH, comunicación oral, 1989). Se utilizará para efectos de cálculo el primer valor que es el crítico.

7.2.4 Coeficiente de distribución (K_d)

Cuando un soluto se encuentra presente en un líquido que está en contacto con materiales sólidos, una parte del soluto permanece diluida en el líquido y otra parte puede ser adsorbida o absorbida por los sólidos. En el primer caso el soluto se adhiere a la pared externa del sólido y en el segundo el soluto penetra en el sólido. Para considerar el efecto de ambos fenómenos se denominará a la masa que es adsorbida y absorbida únicamente como masa sorbida. El coeficiente de distribución de un soluto (K_d) define la relación entre la masa sorbida por el sólido y la concentración en la solución.

En términos prácticos puede representarse por:

K_d = masa del contaminante sorbida por masa unitaria de sólido (mg/g)
concentración del contaminante en solución (mg/l)

La ecuación que define este parámetro es:

$K_d = q/C_w$, donde:

q = masa del contaminante sorbido en el sólido, en miligramos del compuesto por gramos de sólido (mg/g)
C_w = concentración del soluto en miligramos del compuesto por litro de solución (mg/l).

Cuanta mayor sea la afinidad del soluto con el suelo, el soluto será mayormente adsorbido y el valor de K_d será mayor. Por el contrario, el valor de K_d será pequeño en solutos que tengan más afinidad por el agua (solutos hidrófilos).

El otro factor que determina el valor de Kd es la presencia de materia orgánica en el suelo. Entre mayor sea el contenido de materia orgánica, mayor masa de soluto podrá ser sorbida por el mismo.

La Figura 7.1 muestra el efecto del valor de K_d en la movilidad de un contaminante dentro de un acuífero.

7.2.5 Fracción orgánica sólida en el suelo f_{oc}

Indica el porcentaje de materia orgánica dentro del suelo. En el área de estudio se realizaron análisis de suelos en diferentes puntos de las cuencas. Para el cálculo del factor K_d se usará el valor promedio de f_{oc} determinado en laboratorio para aquellas muestras más cercanas a las nacientes de agua.

En la cuenca del río Destierro el promedio obtenido fue de: f_{oc} = 0,995%, mientras que en la cuenca del río Peje fue de: f_{oc} = 1,515%.

El valor de Kd es función de f_{oc} y de K_{oc}, y puede obtenerse de la siguiente manera:

$K_d = f_{oc} \times K_{oc}$

Sustituyendo los datos obtenidos previamente, se obtienen los siguientes valores:

- K_d (cuenca río Destierro) = 0,995 x 32 / 100 = 0,32
- K_d (cuenca río Peje) = 1,515 x 32 / 100 = 0,48

Puede notarse que cuando K_d = 0, el contaminante se desplaza a la misma velocidad del agua. Conforme el valor de K_d aumenta el desplazamiento del contaminante disminuye. Para valores de K_d mayores a 100 se considera que es soluto permanece casi estático.

7.2.6 Factor de retardo (R)

Este parámetro determina el retraso de la migración del soluto, causado por la adsorción/absorción, respecto a la velocidad del agua subterránea. Depende principalmente del coeficiente de distribución. Está definido por la siguiente ecuación:

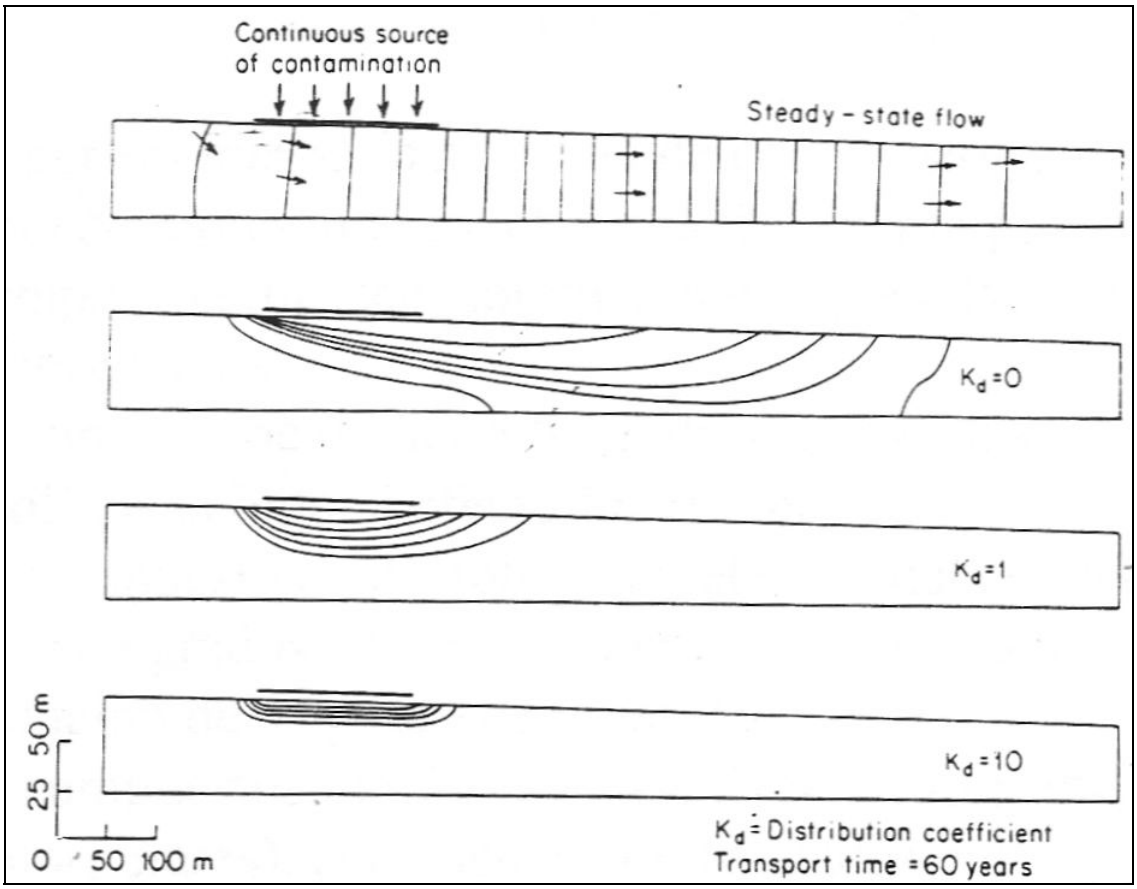


Figura 7.1: Efecto del valor de Kd en la movilidad de un contaminante

$R = V/V_c = 1 + K_d\rho_b/n$, donde:

V = velocidad promedio del agua subterránea
V_c = velocidad de la masa del contaminante retardado
K_d = coeficiente de distribución
ρ_b = densidad aparente del suelo. En este caso, el promedio de las pruebas de campo arroja un valor de ρ_b = 1,4 gr/cm^3
n = porosidad. Para el tipo de suelo limoso característico de la zona la porosidad real es del 40%, pero muchos de esos poros no están comunicados entre sí, por lo que se debe utilizar el valor de porosidad efectiva que, según Custodio & Llamas (1983), es del orden de n = 10%.

Sustituyendo valores se obtiene para este caso:

R (cuenca río Destierro) = 1 + (0,32 x 1,4/0,1) = 5,48

R (cuenca río Peje) = 1 + (0,48 x 1,4/0,1) = 7,72

Esto indica que la velocidad del bromacil será aproximadamente 5,48 veces menor que la velocidad del agua en el acuífero del río Destierro, y 7,72 veces menor en el acuífero del río Peje.

7.2.7 Densidad

Es la relación masa/volumen de una determinada sustancia. Algunos compuestos que no se disuelven en el agua y tienen una densidad menor flotan sobre ella y se denominan LNAPLs, mientras que los que tienen una densidad mayor se van al fondo del acuífero y son llamados DNAPLs.

El bromacil es más pesado que el agua, tiene una densidad relativa de 1,55 a 25°C (Ahrens, 1994), por lo que tenderá a penetrar en la masa líquida del acuífero.

7.2.8 Coeficiente de partición octanol/agua K_{ow}

Al diluir un soluto en cantidades iguales de agua y octanol, una parte tiende a asociarse al líquido orgánico (octanol) y una parte tiende a quedarse en el agua. Entre más orgánico sea un soluto, mayor cantidad pasará al octanol y viceversa.

Según Bethune (comunicación oral, 1995), empíricamente se desarrolló una ecuación que relaciona los valores de K_{oc} y K_{ow}, de la siguiente manera:

$$\log K_{oc} = 0{,}72 \log K_{ow} + 0{,}49$$ (Schwarzenback y Westall, 1981)

Haciendo los cálculos respectivos, el valor de Kow para bromacil resulta:

$$\log K_{ow} = (\log K_{oc} - 0{,}49)/0{,}72 = (\log 32 - 0{,}49)/0{,}72 = 1{,}41$$

$K_{ow} = 10^{1,41} = 25{,}7$

7.2.9 Resumen de Propiedades del Bromacil (INE, 2009):

Clasificación: Herbicida selectivo de pre y post emergencia

Acción: Contacto, preventivo

Modo de acción: Inhibe la fotosíntesis.

Grupo químico: Uracilo

Características físicas: Sólido cristalino color blanco e inoloro.

Fórmula química: $C_9H_{13}BrN_2O_2Li$

Peso molecular: 267

Solubilidad (Rusell MH, comunicación oral, 2009)*:* 700 mg/l a 25°C

Punto de fusión: 158°C

Coeficiente de adsorción: K_d = entre 0,32 y 0,48

Presión de vapor: $3,07x10^{-7}$ mm HG a 25°C = $4,4 \times 10^{-10}$atm

Coeficiente de partición de carbono orgánico: K_{oc} = 32 g/ml

Coeficiente de partición octanol/agua: log K_{ow} = 1,41 (Hansh et al., 1995)

Vida media: DT_{50} = 60 días, aunque ha habido Jury et al. (1987) reporta hasta 360 días. En el presente estudio se usará este último dato que es el crítico.

Tasa de decaimiento: $\lambda = \ln(2)/t_{1/2} = 0,0116$ día^{-1}

Constante de disociación: pKa = 9,1 a 25°C

Constante de Henry: $H = 6,47 \times 10^{-9}$ (adimensional)

Aplicación: 2-7 Kg/Ha (Infoagro, 2009)

Peligrosidad: Una exposición intensa o continua (pero no crónica) podría causar incapacidad temporal o posibles lesiones residuales, a menos de que se proporcione un rápido tratamiento médico.

Persistencia: Su vida media en suelos es generalmente de 60 días, pero en ciertos casos puede llegar a ser mayor. Se une ligeramente a las partículas de suelo, por ello presenta una movilidad de moderada a muy alta en este medio. En suelos de zonas lluviosas o bajo riego intenso, se lixivia rápidamente y puede contaminar las aguas subterráneas.

El contenido de materia orgánica, nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico y concentración soluble de sal son propiedades que se correlacionan significativamente con la persistencia del Bromacil en suelo. Puede sufrir una biodegradación lenta, tanto en condiciones aerobias como anaerobias. En general la volatilización, hidrólisis y fotólisis no son destinos ambientales importantes para este plaguicida, sin embargo en aguas alcalinas puede ser degradado por la luz.

El bromacil sólo se adsorbe ligeramente a las partículas del suelo (Koc = 32 g/ml), es soluble en agua y su vida media en el suelo es relativamente prolongada. Por estas razones, se prevé que el bromacil se desplace (lixivie) con bastante rapidez a través del suelo y pueda contaminar el agua subterránea (VanDriesche, 1985).

7.3 Área de captura de las nacientes

El área de captura de un manantial se define como la zona geográfica donde toda el agua que infiltra llega al punto de descarga. Definiendo esta zona de captura se puede llegar a delimitar el área de protección.

Para reducir el riesgo de contaminación, toda actividad potencialmente contaminante debe ser controlada o limitada dentro de esa zona de protección. Para establecer la zona de protección con respecto al bromacil se debe tomar en cuenta el tiempo de flujo del contaminante desde la fuente de aplicación hasta el manantial, considerando el tiempo que tarda en atravesar la zona no saturada y el tiempo de viaje en el acuífero, en comparación con el tiempo de vida media del contaminante.

El ancho máximo de la zona de captura está dado por la fórmula:

$$y_{max} = \pm Q \times L/[K \times (h_1^2 - h_2^2)]$$, donde:

y_{max} = ancho máximo de la zona de captura
Q = caudal extraído (m^3/día)
L = distancia entre dos puntos de observación del nivel freático (m)
h_1 y h_2 = elevación mayor y menor del nivel freático

Por otro lado, el punto de no retorno, aguas abajo del manantial, se calcula con la fórmula:

$$x_o = Q \times L /[\pi \times K \times (h_1^2 - h_2^2)],$$ donde

x_o = distancia al punto de no retorno

En la siguiente Figura 7.2 se muestra un esquema que indica mejor estos conceptos.

Con base en los perfiles hidrogeológicos realizados se tienen los datos básicos para calcular estos parámetros, por medio de la siguiente tabla:

AREA DE CAPTURA DEL MANANTIAL

	Fuentes de Milano	Fuentes de El Cairo
Datos básicos:	**Cuenca del río Destierro**	**Cuenca del río Peje**
Perm en acuífero Ks (m/día)	1,52	1,16
Caudal extraído Q (m3/día)	1209,6	2039,4
Longitud entre puntos de observ. L (m)	50	40
Elevación mayor del nivel freático h1 (m)	25	30

Elevación menor del nivel freático h2 (m)	5	12

Cálculos:		
Ancho máximo de zona de captura *y* (m)	132,6	186,0

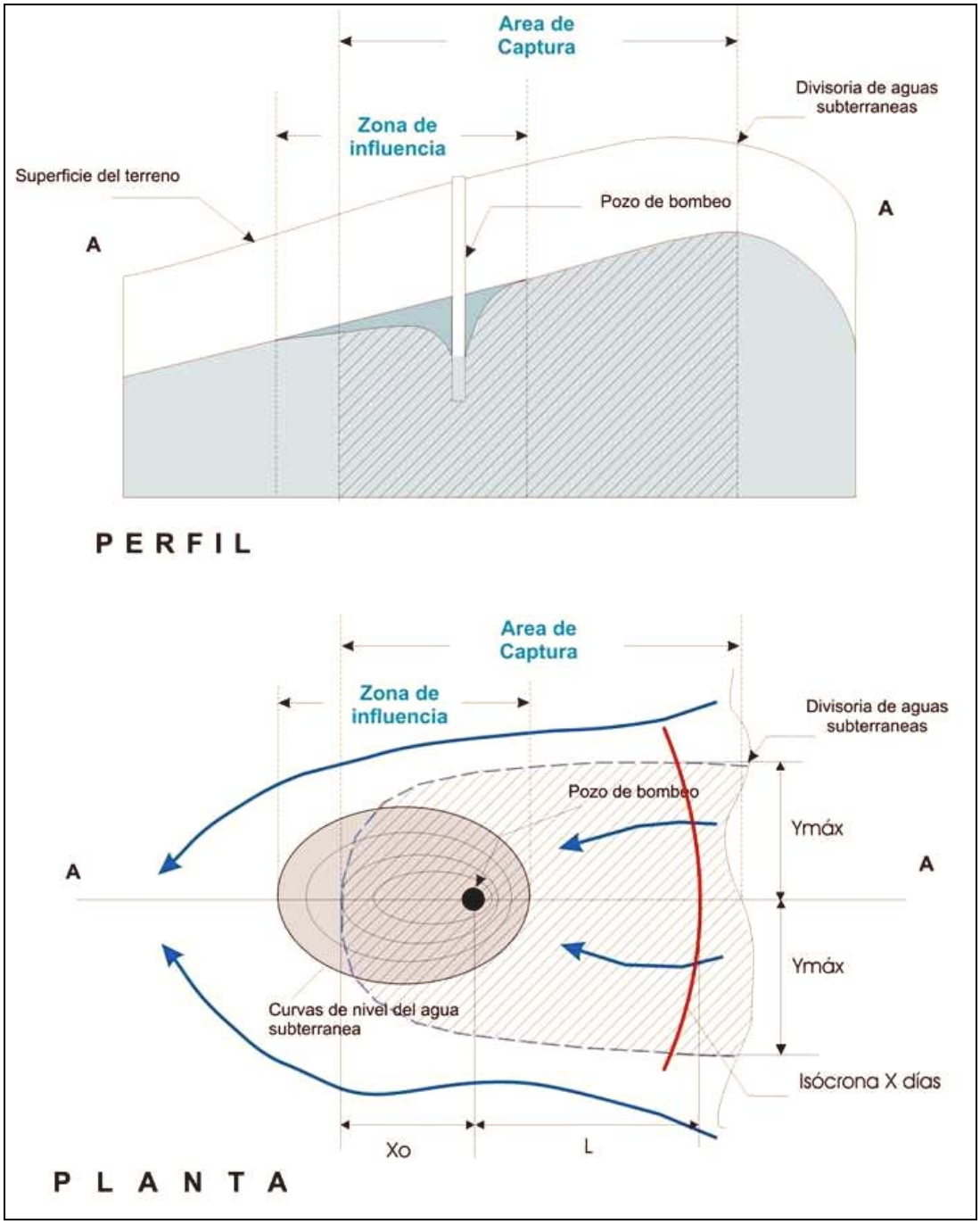


Figura 7.2: Esquema de zonas de captura para manantiales y pozos.

AREA DE CAPTURA DE LOS POZOS

Datos básicos:	Pozo GM88	Pozo BO24
Perm en acuífero Ks (m/día)	2,73	3,64
Caudal extraído Q (m3/día)	578,88	691,2
Longitud entre puntos de observ. L (m)	100	100
Elevación mayor del nivel freático h1 (m)	23,53	23,53
Elevación menor del nivel freático h2 (m)	20,47	20,47

Cálculos:	Pozo GM88	Pozo BO24
Ancho máximo de zona de captura y (m)	315,0	282,1
Dist al punto de no retorno xo (m)	50,1	44,9

7.4 TIEMPO/DISTANCIA DE TRÁNSITO

El objetivo es delimitar las zonas de protección de modo que todo el bromacil haya sido eliminado del acuífero antes de llegar a las fuentes. Por lo tanto se comparará el tiempo de tránsito del contaminante con la vida media del mismo. Se calculará la distancia que debe recorrer para que se degrade totalmente antes de alcanzar la fuente.

La vida media promedio reportada del bromacil en suelos es de 60 días, pero ha habido reportes de hasta 360 días. Para contar con un factor de seguridad en este estudio se harán los cálculos para el doble de la máxima vida media reportada, es decir 720 días, de modo que se garantice que no llegará ninguna traza del contaminante a la fuente.

El tiempo de tránsito está compuesto por el tiempo que tarda el contaminante en atravesar la zona no saturada (t_1) y el tiempo que tarda desplazándose dentro del acuífero hasta alcanzar la naciente (t_2). En este caso, la suma de ambos no podrá ser inferior a 720 días.

7.4.1 En zona no saturada:

La fórmula a utilizar es:

$t_1 = H \times n \times R / K_{ns}$, donde:

t_1 = tiempo que tarda el soluto en atravesar la zona no saturada
H = espesor de la zona no saturada
n = porosidad
R = factor de retardo
K_{ns} = coeficiente de permeabilidad en la zona no saturada

El procesamiento de la información de campo indica que el espesor de la zona no saturada (en la zona de plantaciones de piña) es entre 4 - 6 metros en la cuenca del río Peje, y entre 6 - 9 metros en la cuenca del río Destierro.

Sin embargo en ambas cuencas se detectó la existencia de canales de drenaje que tienen una profundidad de 2 metros, lo que indica que en época de lluvia el nivel freático puede subir hasta ese nivel. Por lo tanto, para tener una mayor seguridad se utilizará este dato como espesor de la zona no saturada.

7.4.2 En el acuífero:

El tiempo de tránsito en el acuífero está dado por la ecuación:

$t_2 = (d \times K_s \times i \times R)/n$, donde

t_2 = tiempo de tránsito en el acuífero
d = distancia recorrida
K_s = coeficiente de permeabilidad en el acuífero
i = gradiente hidráulico (m/m)
R = coeficiente de retardo
n = porosidad efectiva.

Aplicando los valores obtenidos de los estudios de campo y la investigación bibliográfica, se puede generar la siguiente tabla:

CÁLCULO DEL TIEMPO DE TRÁNSITO DEL BROMACIL

Datos básicos:	Fuentes de Milano	Fuentes de El Cairo
	Cuenca del río Destierro	Cuenca del río Peje
Vida media del contaminante (días)	360	360
Tiempo a considerar (días)	720	720
Espesor de zona no saturada H (m)	2	2
Porosidad efectiva n	10%	10%
Factor de retardo R	5,48	7,72
Perm en zona no saturada Kns (m/día)	0,24	0,12
Perm en acuífero Ks (m/día)	1,52	1,16
Gradiente hidráulico i (m/m)	0,0349	0,0306

Cálculos:	Cuenca del río Destierro	Cuenca del río Peje
Tiempo en zona no saturada t1 (días)	4,6	12,9
Tiempo en acuífero t2 (días)	715,4	707,1
d (m)	246,1	258,1

Esta tabla, elaborada considerando los valores críticos de todos los parámetros y el doble de la máxima vida media reportada del contaminante, indica que con una distancia de protección de entre 250 y 260 metros es posible evitar la llegada del contaminante Bromacil a las fuentes en estudio. En las siguientes Figuras se muestra esquemáticamente el área de

captura de las nacientes de El Cairo, Milano y los pozos GM88 y BO24, con base en los resultados obtenidos.

7.4.3 Ante la existencia de canales

Los canales representan una especie de "atajo" entre los sitios de aplicación del bromacil y la toma o pozos de agua. Por un lado, el AyA reportó concentraciones muy altas de bromacil en el agua de canales en la zona (Bermúdez, comunicación oral, 2009). Por otro, los canales pueden descargar agua directamente al acuífero, por lo que el contaminante se evita el paso por la zona no saturada.

Los cálculos previos se hicieron nuevamente considerando el contacto directo del bromacil con el acuífero por medio de un canal. En estos casos el espesor de la zona no saturada es de cero y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

RESUMEN DE RESULTADOS EN CONDICIÓN NORMAL

	Fuentes Milano	Fuentes El Cairo	Pozo GM88	Pozo BO24
Distancia antes de degradarse d (m)	246,1	258,1	90,3	72,7
Ancho máximo de zona de captura *y* (m)	132,6	186,0	315,0	282,1
Distancia al punto de no retorno *Xo* (m)	NA	NA	50,1	44,9

RESUMEN DE RESULTADOS EN CONDICIÓN CON CANALES

	Fuentes Milano	Fuentes El Cairo	Pozo GM88	Pozo BO24
Distancia antes de degradarse d (m)	247,7	262,7	104,1	78,1
Ancho máximo de zona de captura *y* (m)	132,6	186,0	315,0	282,1
Distancia al punto de no retorno *Xo* (m)	NA	NA	50,1	44,9

La siguiente figura muestra a continuación las zonas de protección y de captura de los manantiales y pozos en estudio. El área marcada en rojo muestra la zona donde cualquier aplicación superficial de bromacil podría llegar a las fuentes. El área marcada en amarillo representa la zona de captura de cada fuente o pozo, la cual se extiende hasta el límite superior del acuífero.

Debe aclararse que en realidad la forma del área de protección está definida por una parábola, pero para facilitar el traslado de las medidas al campo se representa aquí como un círculo. Teóricamente, estas líneas de captura son perpendiculares a las curvas isofreáticas y se extienden hasta la divisoria de aguas del acuífero.

Cabe agregar que estas zonas consideran que el bromacil viajará únicamente a través del flujo subterráneo, no obstante podrían modificarse sustancialmente si el mismo viajara a través de flujo superficial por medio de canales o cursos de agua que faciliten su transporte y aumenten su movilidad.

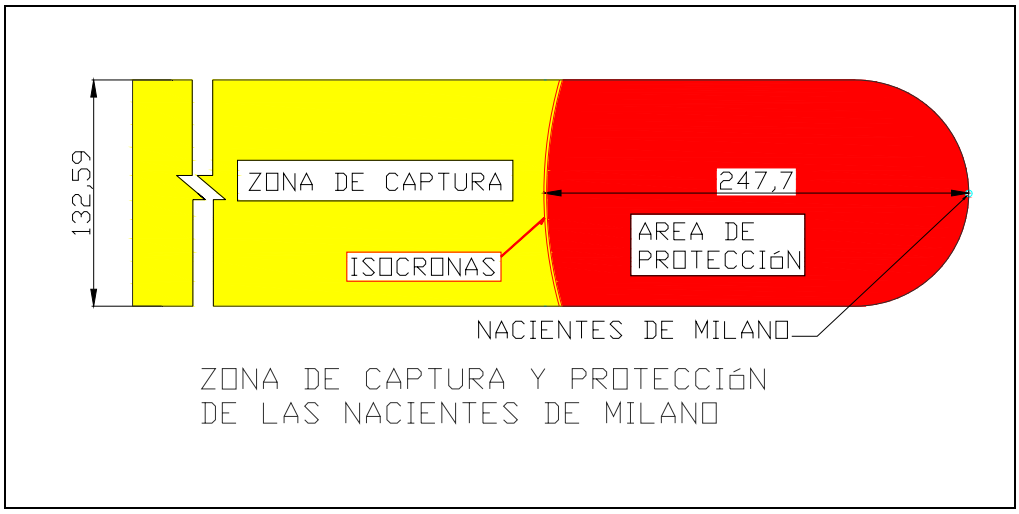


Figura 7.3: zona de captura y protección de las nacientes de Milano.

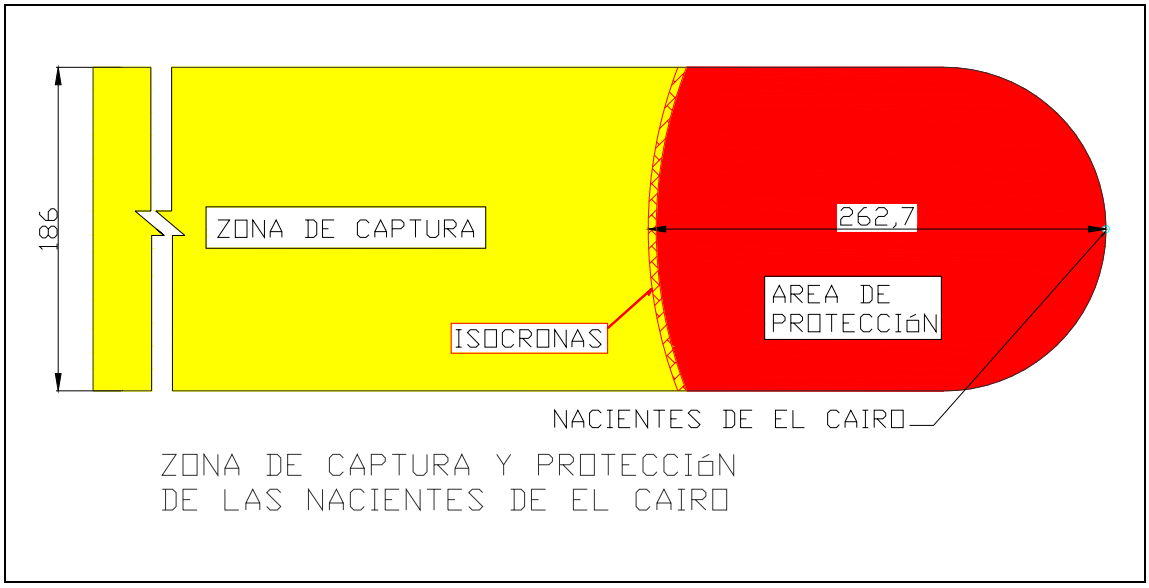


Figura 7.4: zona de captura y protección de las nacientes de El Cairo.

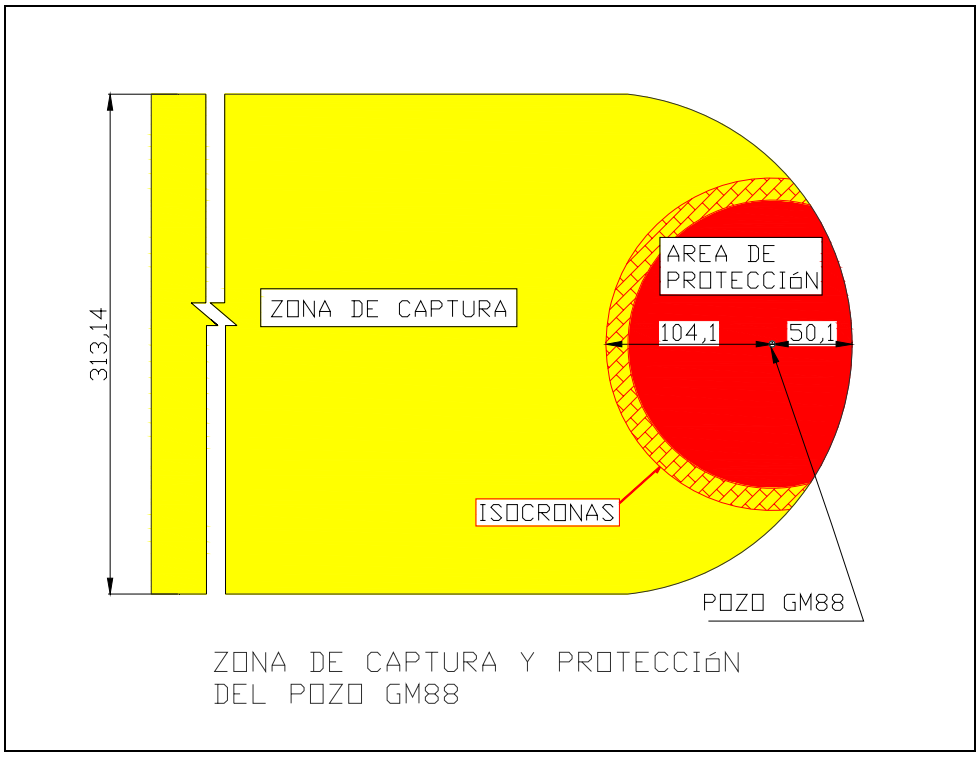


Figura 7.5: zona de captura y protección del pozo GM – 88.

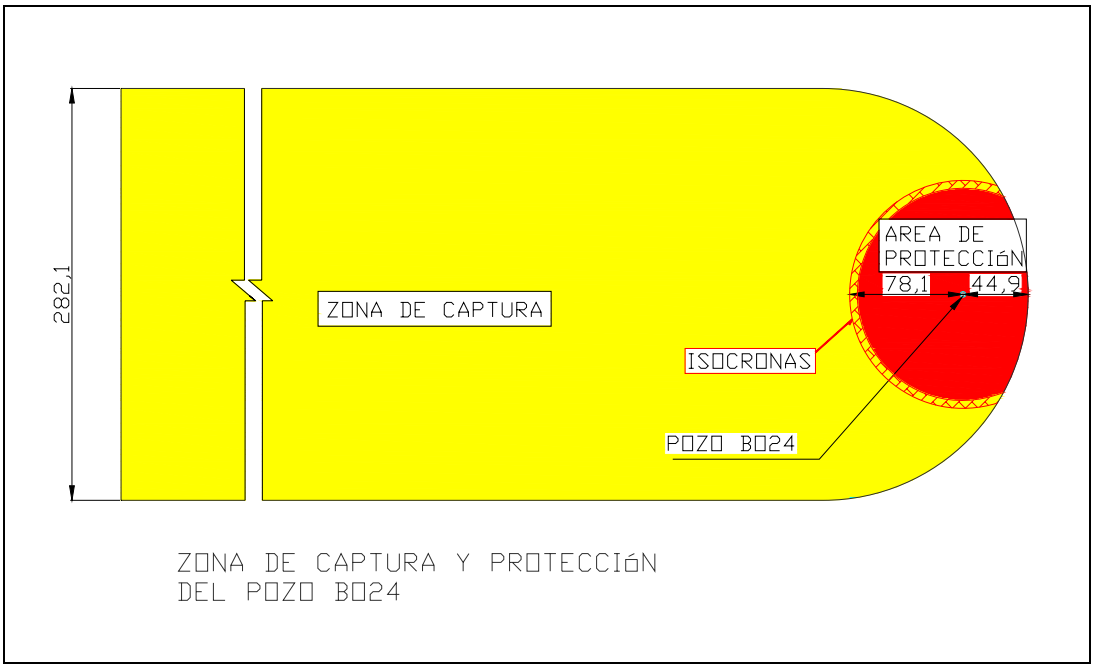


Figura 7.6: zona de captura y protección del pozo BO – 24.

En las siguientes figuras se muestran las zonas de protección y de captura de los pozos y las nacientes.

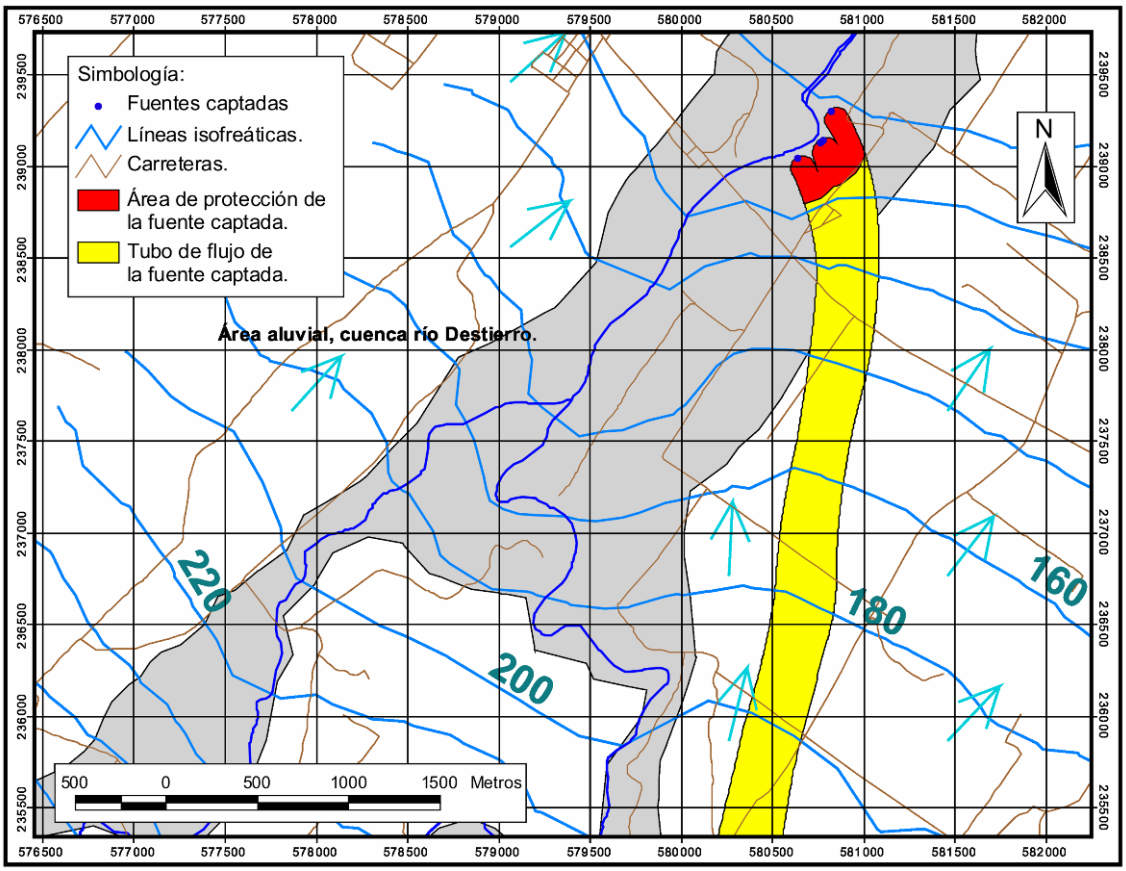


Figura 7.7: Zona de protección y captura de las nacientes Milano

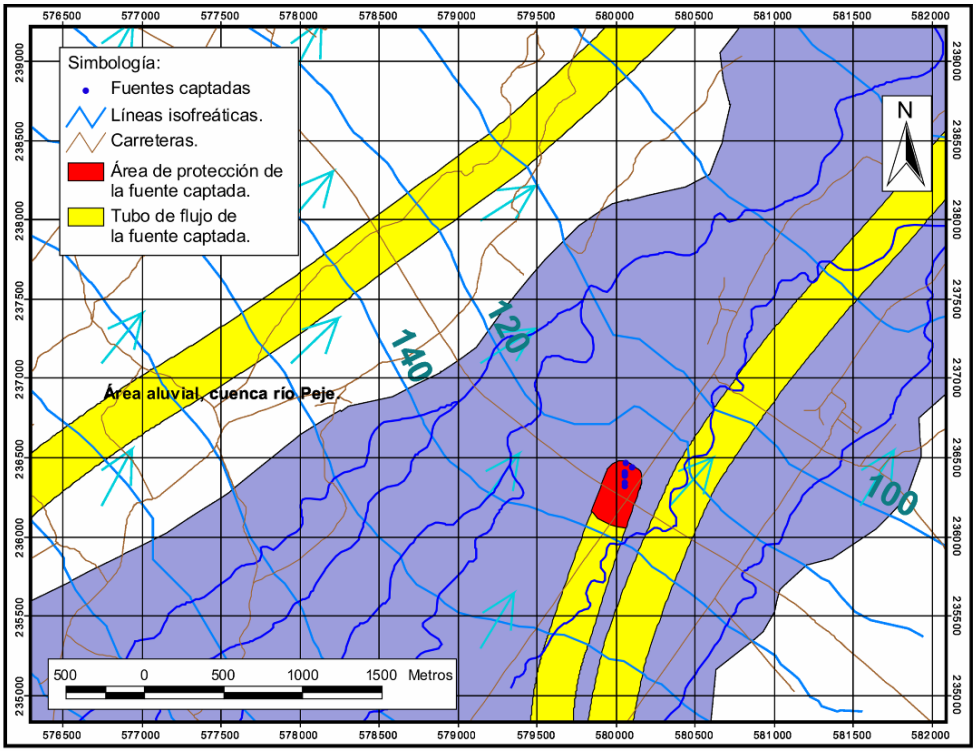


Figura 7.8: Zona de protección y captura de las nacientes El Cairo y Luisiana

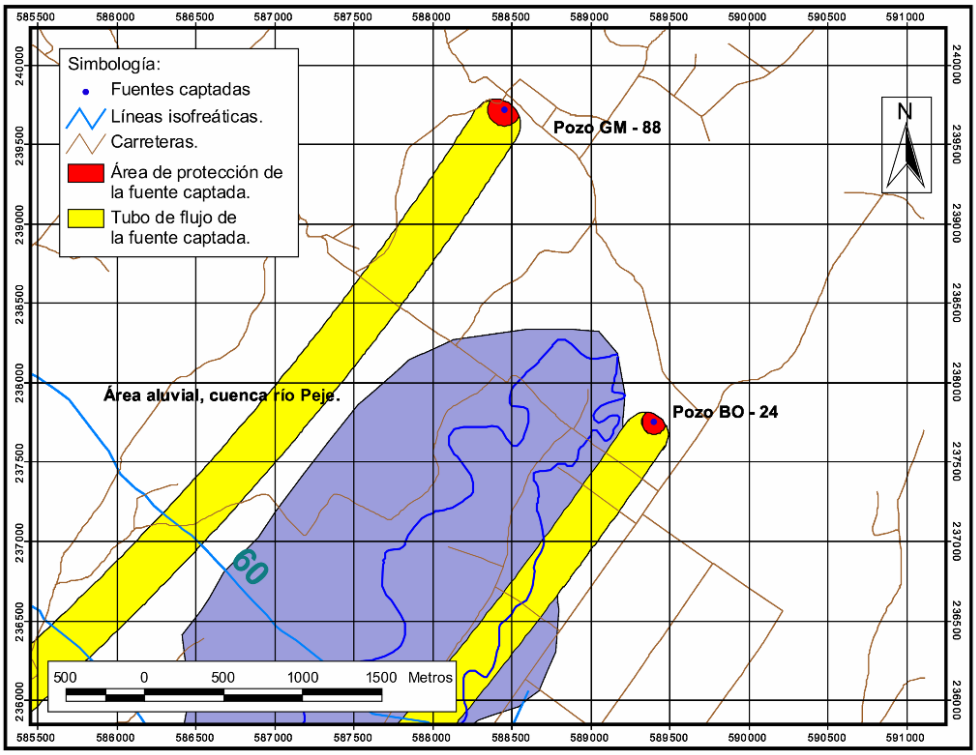


Figura 7.9: Zonas de protección y captura de los pozos BO-24 y GM-88

En la siguiente Figura 7.10 se muestra la totalidad del área de captura para cada una de las fuentes consideradas, asumiendo que el tubo de captura se extiende linealmente siguiendo el contorno de las líneas de flujo hasta el final de la cuenca.

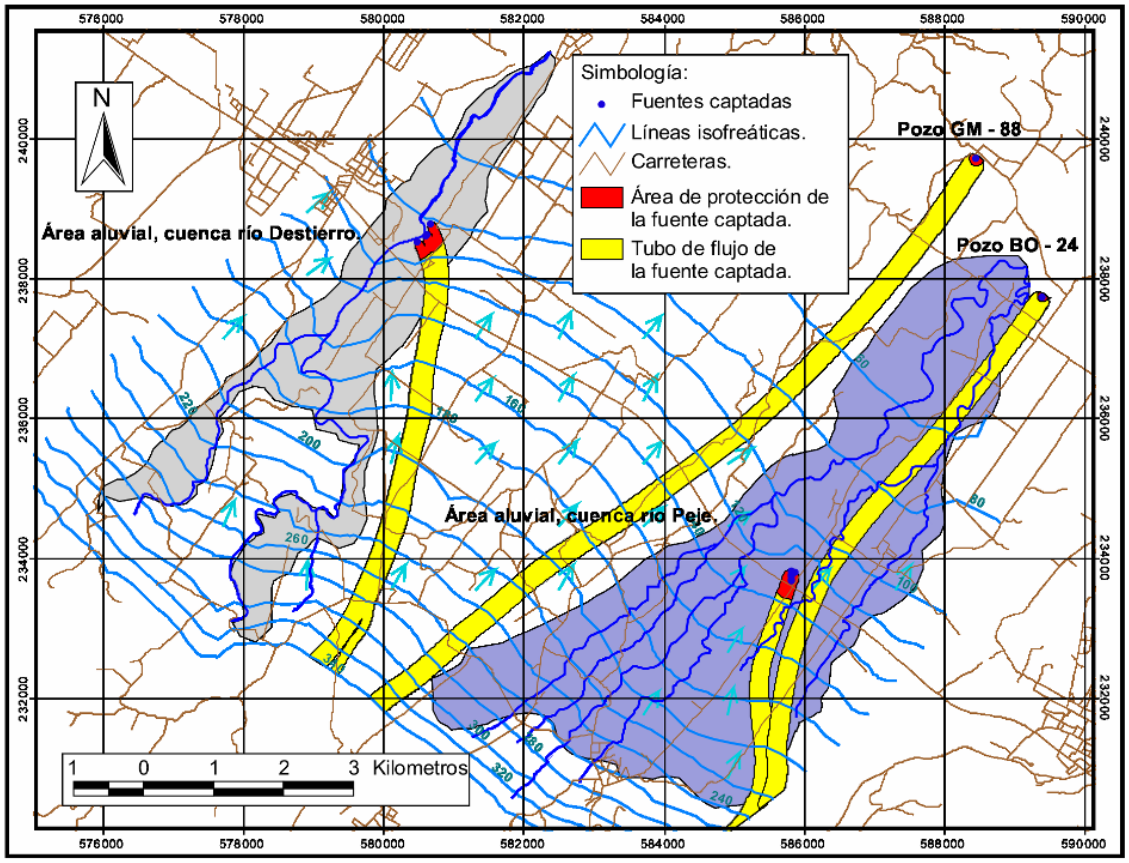


Figura 7.10: Áreas de captura de cada una de las fuentes

7.5 USO DIVERGENTE DEL SUELO

Foster e Hirata (1991)[1], indican que:

- El riesgo de contaminación de un acuífero se da como la interacción entre:
  - La carga contaminante que es, será, o pudiera ser aplicada al subsuelo como resultado de la actividad humana
  - La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, debido a las características naturales de los substratos que lo cubren y lo separan de la superficie.
- La carga contaminante puede ser controlada o modificada, pero no la vulnerabilidad del acuífero.

[1] Foster, S. e Hirata, R. "Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas". CEPIS. Lima, Perú. 1991.

- El término vulnerabilidad del acuífero a la contaminación representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta.
- El término riesgo de contaminación se define como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la OMS para la calidad de agua de consumo humano.
- El hecho de que este riesgo pueda convertirse en una seria amenaza a la calidad de abastecimiento de aguas subterráneas ya desarrollado o por desarrollar, dependerá de la movilidad de los contaminantes dentro del acuífero mismo.

Para este caso particular, en el apartado 6.8 Vulnerabilidad a la Contaminación se determinó que el acuífero en la zona de estudio tiene zonas de extrema y alta vulnerabilidad principalmente. Por otro parte, en el capítulo 7 Hidrogeoquímica se demostró la persistencia y movilidad de los agroquímicos utilizados en el cultivo de piña. Estas dos condiciones sumadas hacen que el riesgo de contaminación sea muy alto, como ha quedado demostrado en la realidad con la contaminación del agua de las nacientes de El Cairo y Milano.

La Matriz de Criterios de Uso del Suelo según la Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos para la Protección del Recurso Hídrico, aprobada por la Junta Directiva del SENARA por acuerdo 3303, en sesión extraordinaria N. 239-06 del 26 de setiembre de 2006, indica que para condiciones de vulnerabilidad extrema del acuífero no se debe permitir actividades de desarrollo urbanístico, ganaderas, agrícolas u otras (comercio, industria, depósitos, etc.).

Para condiciones de alta vulnerabilidad la misma matriz establece, en relación a las actividades agrícolas lo siguiente: *Se puede permitir siempre y cuando se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe contar con un plan de manejo de suelos de acuerdo al decreto 23214-MAG-MIRENEM. Se debe dar un manejo y tratamiento de los efluentes. La actividad debe contar con una certificación de buenas prácticas agrícolas.* Y en relación con las actividades de desarrollo urbanístico: *Se puede permitir sujeto a diseño apropiado de sistema de eliminación de excretas y aguas servidas. La densidad de población debe ser inferior a 25 hab/ha o lotes de 2000 metros cuadrados. El área de impermeabilización por hectárea no debe sobrepasar el 20%.*

Para analizar las zonas de uso divergente del suelo se combinó la información de vulnerabilidad del acuífero con la de uso actual del suelo, obteniéndose la siguiente Figura 7.11.

De esta figura puede observarse que:

Uso agrícola del suelo

- En la cuenca del río Peje la gran mayoría de las zonas de cultivo de piña están ubicadas en áreas de vulnerabilidad extrema, por lo que se da un uso divergente del suelo.

- Unas pequeñas zonas de cultivo de piña están ubicadas en zona de alta vulnerabilidad, por lo que si es de interés mantener esos cultivos deberían cambiarse las prácticas agrícolas actuales para que coincidan con lo expuesto en el apartado anterior, además de eliminarse los canales para que no se establezca una comunicación directa del ambiente con el acuífero.

- En la cuenca del río Destierro hay algunas zonas de cultivo ubicadas en zonas de extrema vulnerabilidad, por lo que también se da un uso divergente del suelo.

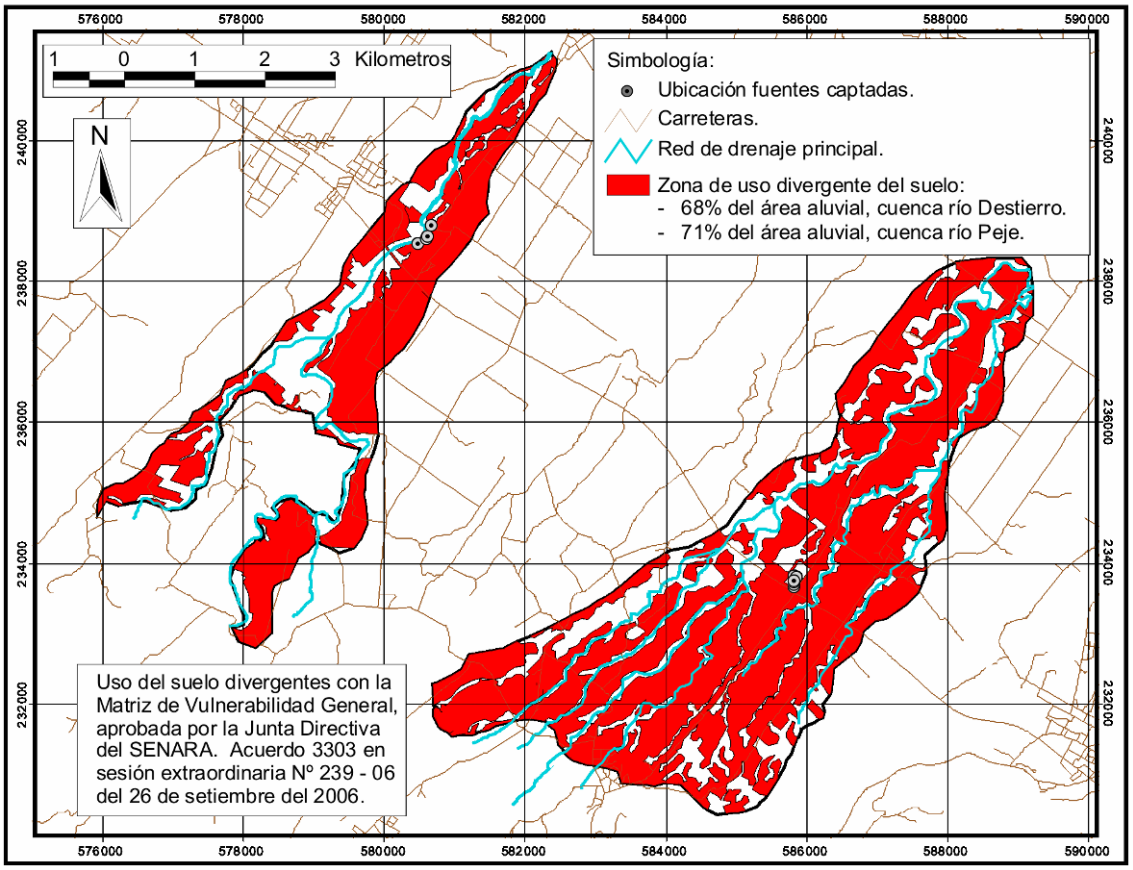


Figura 7.11: Mapa de usos divergentes del suelo.

- Otras zonas de cultivo están ubicadas en zonas de alta vulnerabilidad, en las que podría autorizarse el cultivo siempre y cuando las prácticas agrícolas se ajusten a lo indicado en el apartado anterior.

Uso urbano del suelo

- En ambas cuencas se da uso urbano del suelo sobre zonas de vulnerabilidad extrema y alta. A fin de proteger el acuífero se debería como mínimo seguir las indicaciones del SENARA respecto a la eliminación de excretas y aguas servidas y a la densidad poblacional que se mencionan en el apartado anterior. Estas zonas están marcadas como zonas de uso divergente del suelo.

- Otro aspecto a considerar es, en relación con las zonas de pastos, lo que indica la matriz del SENARA respecto a la actividad ganadera en zonas de alta vulnerabilidad: *Se puede permitir siempre que se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe de contar con potreros mejorados, protección de nacientes, pozos y cursos de agua de acuerdo a la legislación vigente y contar con prácticas de conservación de*

suelos. En la Figura 7.11 se incluyen las zonas de pastos como zonas de uso divergente del suelo, de acuerdo a la normativa del SENARA.

7.6 USO PERMITIDO DEL SUELO

En las zonas de vulnerabilidad extrema, la matriz del SENARA indica que no se deben permitir desarrollos urbanísticos, actividades agrícolas, ganaderas ni de otro tipo como comercio, industria, depósitos, etc. Estos sectores deberían destinarse únicamente a bosque y protección del acuífero.

En las zonas de alta vulnerabilidad, la matriz del SENARA permite algunos usos del suelo con diversas limitaciones:

1. Desarrollo urbanístico:

Vivienda unifamiliar (sin alcantarillado): Se puede permitir sujeto a diseño apropiado de sistema de eliminación de excretas y aguas servidas. La densidad de población debe ser inferior a 25 hab/ha o lotes de 2000 metros cuadrados. El área de impermeabilización por hectárea no debe sobrepasar el 20%.

Sistemas urbanísticos y condominales sin alcantarillado y sin planta de tratamiento: Se puede permitir sujeto a diseño apropiado de sistema de eliminación de excretas y aguas servidas. La densidad de población debe ser inferior a 25 hab/ha o lotes de 2000 metros cuadrados. El área de impermeabilización por hectárea no debe sobrepasar el 20%. En todos los casos, la SETENA solicitara el estudio hidrogeológico detallado, vulnerabilidad y riesgo y análisis de SENARA.

Sistemas urbanísticos y condominales con alcantarillado y planta tratamiento: Se puede permitir con densidades inferiores a 50 hab/ha o lotes de 1000 metros cuadrados. El área de impermeabilización por hectárea no debe sobrepasar el 20%.

Hoteles y similares para hospedaje: Se puede permitir sujeto a manejo de efluentes con planta de tratamiento. El área de impermeabilización por hectárea no debe sobrepasar el 20%. El número de habitaciones no debe exceder una carga equivalente a 50 personas por hectárea.

2. Actividades ganaderas:

Ganadería Extensiva (Carga animal según clasificación del MAG): Se puede permitir siempre que se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe de contar con potreros mejorados, protección de nacientes, pozos y cursos de agua de acuerdo a la legislación vigente y contar con practicas de conservación de suelos.

Sistemas semi intensivos de producción de ganado (carga de animales según clasificación del MAG): Se puede permitir siempre que se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe de contar con plan de manejo de los remanentes y aguas. Las fincas pueden ser orgánicas o conservacionistas. Uso de biodigestores, lombricultura y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Reforestación y protección de

nacientes de acuerdo con la legislación, recuperación de áreas degradadas, diseño y mantenimiento de caminos y evacuación de aguas y diseño y protección de taludes.

Sistemas intensivos de producción de ganado, granjas porcinas, avícolas, lecherías y otros: Se puede permitir pero debe de contar con plan de manejo de los remanentes y aguas que asegure descargas con una calidad de aguas de acuerdo con el reglamento de vertidos. Uso de biodigestores, lombricultura y lagunas de oxidación u otros sistemas. La SETENA solicitara estudio hidrogeológico detallado, vulnerabilidad y riesgo y el análisis por parte del SENARA.

3. Actividades agrícolas:

Sistemas convencionales de producción agrícola (Café, caña azúcar, tomate, fresas, etc.): Se puede permitir siempre y cuando se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe contar con un plan de manejo de suelos de acuerdo al decreto 23214-MAG-MIRENEM. Se debe dar un manejo y tratamiento de los efluentes. La actividad debe contar con una certificación de buenas prácticas agrícolas.

Sistemas conservacionistas de producción: Se puede permitir siempre y cuando se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe contar con la certificación de B.P.A. Planes de manejo de suelos. Uso de registros. Aplicación de la metodología para la determinación de la capacidad de uso de los suelos de acuerdo a decreto Nº 23214 – MAG – MIRENEM y la Ley 7779

Sistemas de producción orgánica: Se puede permitir pero con la certificación de B.P.A, planes de manejo de suelos y uso de registros.

4. Otras actividades (comercio, industria, depósitos, etc)

De acuerdo al reglamento del Ministerio de Salud. Decreto 30465 S y el reglamento de vertidos y rehúso de aguas residuales. N. 26041-S MINAE: No se permiten las actividades industriales de clase A por el alto riesgo a la contaminación. Se permiten otras actividades sujeto al tratamiento de efluentes y al almacenaje adecuado de sustancias peligrosas, con la impermeabilización de las áreas de almacenamiento y de manipulación de las sustancias.

En la Figura 7.12 se muestra el mapa de uso de suelo de acuerdo a los criterios establecidos en la matriz del SENARA, el cual difiere del uso recomendado en este estudio el cual se muestra en la Figura 7.13.

Dadas las condiciones existentes en la zona, el uso recomendado del suelo sería:

- **En zonas de vulnerabilidad extrema:** Recuperación o mantenimiento del bosque.

- **En zonas de vulnerabilidad alta:** A pesar de que la matriz del SENARA indica que se pueden permitir actividades ganaderas o agrícolas, se recomienda no permitir ninguna actividad de índole agroindustrial y destinar esta zona a protección del recurso hídrico tanto superficial como subterráneo. Lo anterior dado que en la metodología para el cálculo de vulnerabilidad el parámetro (D), que considera la profundidad del agua subterránea, fue

medido en campo en época de estiaje (enero 2009). Se considera que en época lluviosa los niveles aumentarán y con ello la vulnerabilidad del acuífero. Además la existencia de canales en las zonas de cultivo hace más vulnerable el acuífero, puesto que lo pone en contacto casi directo con cualquier agroquímico que se aplique a nivel superficial.

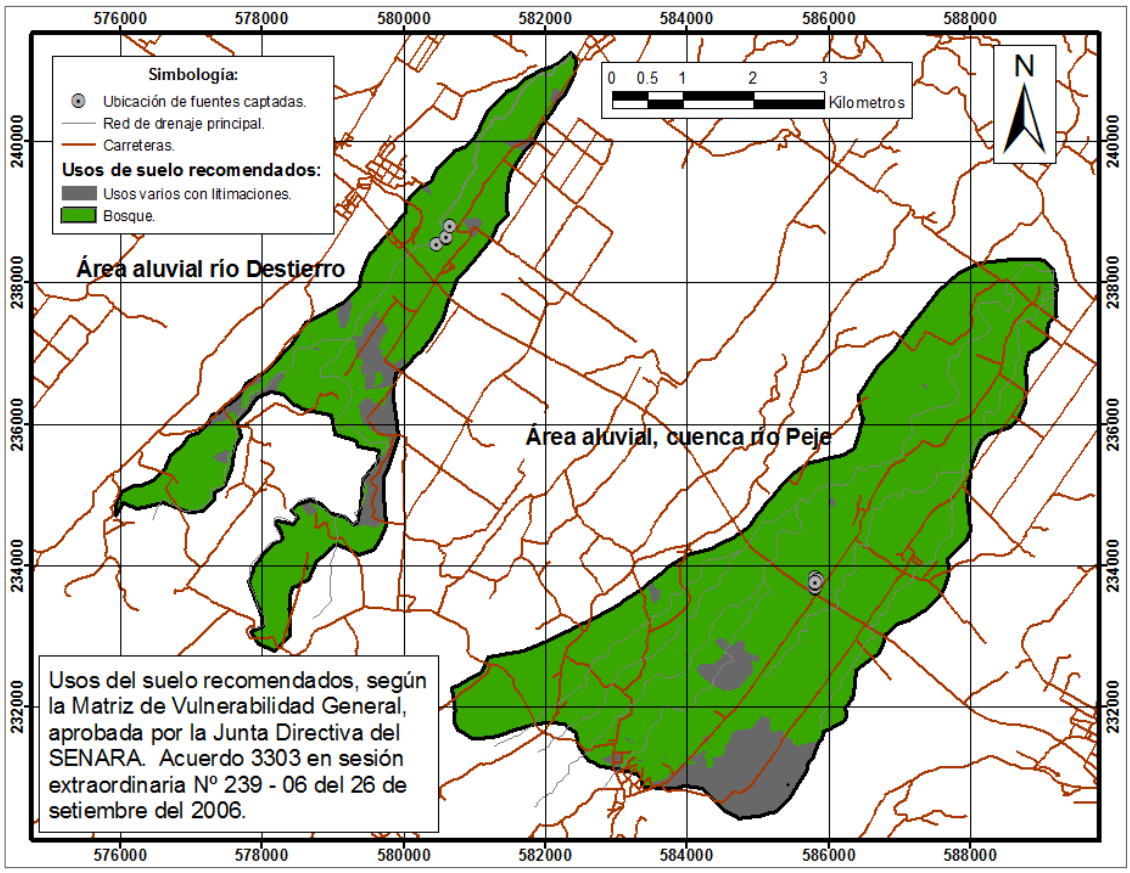


Figura 7.12: Mapa de criterios de uso del suelo según matriz del SENARA.

- **En zonas urbanas ya desarrolladas** sobre zonas de vulnerabilidad alta o extrema se recomienda minimizar el riesgo de contaminación mediante la construcción de sistemas de alcantarillado sanitario y plantas de tratamiento de aguas residuales. El efluente de estas plantas deberá ser descargado de manera que no ponga en peligro los acuíferos, respetando las distancias mínimas de protección de las fuentes de agua.

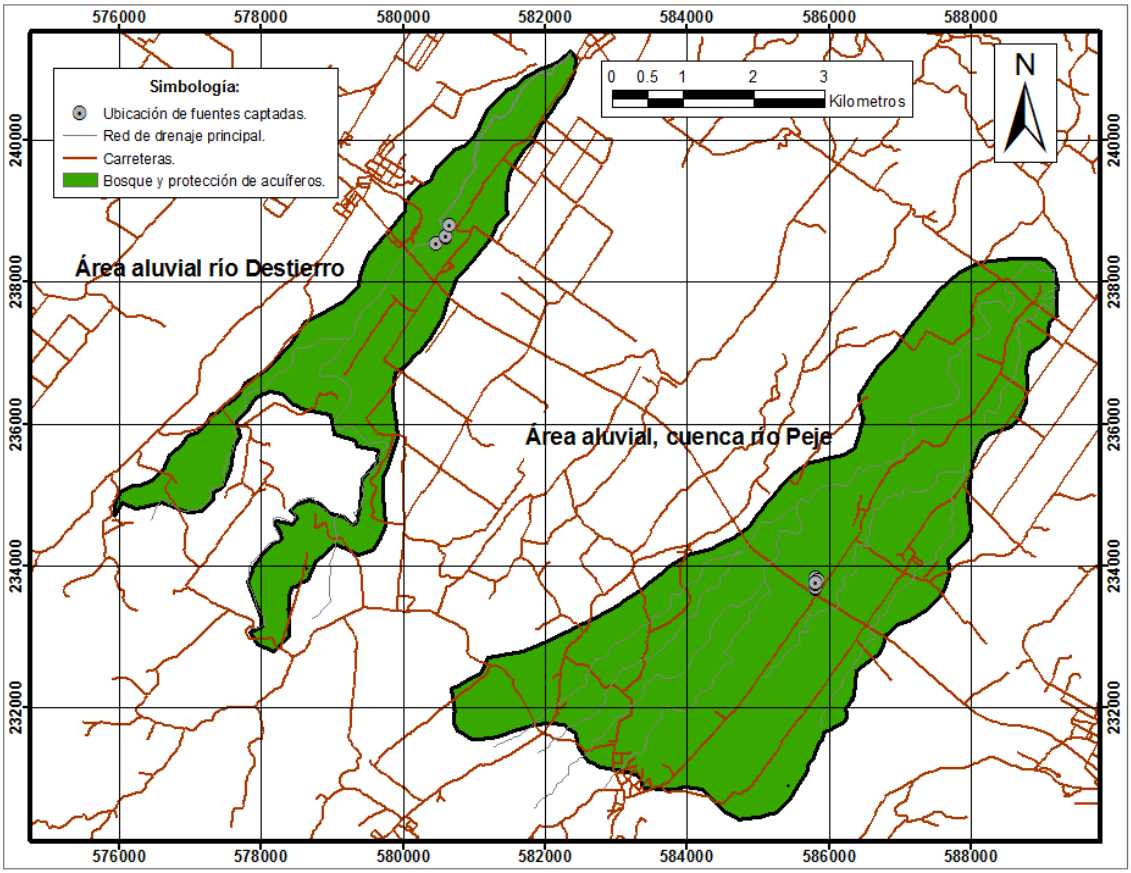


Figura 7.13: Mapa de uso de suelo recomendado

8 CONCLUSIONES

a) La zona de estudio posee un acuífero aluvial de tipo libre, con valores de transmisividad entre 30 y 50 m^2/d en el área de estudio en la cuenca del río Destierro, y entre 25 y 80 m^2/d en el área de estudio en la cuenca del río Peje; en general para las dos cuencas la transmisividad aumenta hacia la parte baja. Los caudales de explotación actuales varían entre 1 y 20 l/s; la profundidad de los pozos perforados varía entre 20 y 80 m. El espesor del acuífero aluvial varía entre 40 a 70 m en el área de estudio en la cuenca del río Peje y entre 20 a 60 m en el área de estudio en la cuenca del río Destierro.

b) Existe evidencia de un acuífero inferior, dado que en algunas perforaciones se ha reportado un nivel confinado; no obstante el mismo no fue caracterizado en este estudio dado que no existe suficiente información para ello y además porque los objetivos planteados se enfocan en el acuífero superior.

c) Con base en este estudio se ha definido un solo sistema acuífero el cual corresponde a los aluviones de la parte baja de ambas cuencas. En la parte baja de la cuenca del río Destierro se presentan los depósitos aluviales que corresponden a los materiales erosionados de los edificios volcánicos transportados principalmente por los cauces de los ríos. Para la cuenca

del río Peje en la parte baja hay presencia de depósitos aluviales, los cuales corresponden al igual que la cuenca del río Destierro, a materiales erosionados de los edificios volcánicos los cuales han sido transportados por los cauces de los ríos y constituyen el principal acuífero de esta cuenca. Hacia la parte alta de la cuenca del río Destierro los materiales predominantes son de origen volcánico, principalmente se trata de coladas de lavas; en tanto que para la cuenca del río Peje los materiales de la parte media alta de la cuenca se tratan de lahares con clastos de andesitas englobados en una matriz arcillosa. Estos lahares subyacen a los aluviones descritos anteriormente.

d) La recarga al acuífero se da principalmente por precipitación. Como puede apreciarse en los mapas de isofreáticas, la dirección de flujo para el acuífero sigue predominantemente el patrón de flujo superficial, es decir de suroeste hacia el noreste. La descarga ocurre en la mayoría de los tramos de los ríos y quebradas; sin embargo existen algunos tramos en los cuales los ríos son influentes (aporte de los ríos y / o canales hacia el acuífero). El gradiente hidráulico es del orden de 0,0300 en el área de estudio dentro de la cuenca del Río Destierro. En el área de estudio dentro de la cuenca del río Peje, el gradiente hidráulico es de 0,0246. De acuerdo con esto, el régimen de flujo subterráneo es muy similar en ambas zonas de estudio.

e) La recarga por infiltración ocurre en toda la zona aluvional, y constituye un 45% de la precipitación total anual en ambas áreas de estudio.

f) En el área de estudio en la cuenca del río Destierro, la zona de cultivos aporta el 34% de la recarga total al acuífero; en tanto para el área de estudio en la cuenca del río Peje, la zona de cultivos aporta el 23% de la recarga total al acuífero.

g) En las áreas de estudio dentro de las cuencas del río Peje y Destierro se realizan actividades agrícolas, principalmente el cultivo de piña. De acuerdo a los Cuadros 3.2 y 3.3 del Anexo 9, en la zona acuífera en estudio en la cuenca del río Destierro, el área de cultivo es de 2,57 Km^2 y corresponde a 25,0% del área, en tanto que en el área de estudio en la cuenca del río Peje el área de cultivo es de 4,12 Km^2 y corresponde a un 17,0 % del área.

h) La zona de cultivo es el área en donde se da la mayor recarga potencial; esta evidencia señala que los terrenos sometidos a este tipo de prácticas agrícolas para la siembra de piña sufrieron un aumento en su capacidad de infiltración y en la velocidad de tránsito de los posibles contaminantes hacia el acuífero.

i) Las nacientes de El Cairo y Milano son fuentes actualmente captadas para el aprovechamiento de sus aguas para consumo humano, y actualmente se encuentran contaminadas con bromacil.

j) De acuerdo con los resultados obtenidos en el cálculo de las áreas de protección para las nacientes de El Cairo y Milano, y considerando las existencia de canales y dirección de flujo preferencial, la presencia de bromacil en las muestras de agua tomadas en estas fuentes se debe a la aplicación de este producto en las zonas de captura de las nacientes, siendo conducido hacia ellas ya sea por transporte superficial, sub – superficial o una mezcla de ambos.

k) El acuífero en el área de estudio en las cuencas de los ríos Peje y Destierro, tiene una vulnerabilidad calculada entre extrema y alta según el método GOD. En el primer caso (El Peje), el 91% del área está ubicada en zonas de vulnerabilidad extrema y el 9% en zonas de vulnerabilidad alta, mientras que en el segundo caso (Destierro) el 88% del área se ubica en zonas de vulnerabilidad extrema y el 12% en zonas de vulnerabilidad alta.

l) Aplicando los criterios de la matriz del SENARA[2], existen usos divergentes del suelo en ambas áreas de estudio. En el área de estudio en la cuenca del río El Peje solo el 29% del suelo tiene un uso conforme, mientras que en el área de estudio en la cuenca del río Destierro, el 32% del suelo presenta esa condición.

m) La agrotecnia aplicada al cultivo de la piña en la zona de estudio altera la dinámica natural del flujo de las aguas subterráneas y superficiales, provocando un aumento en el riesgo de contaminación tanto del acuífero como de las nacientes que se encuentra dentro de la zona. Además, la existencia de canales en las zonas de cultivo hace más vulnerable el acuífero ya que lo pone en contacto directo con la superficie y con cualquier agroquímico que se aplique en ella.

9 RECOMENDACIONES

9.1 USOS PERMITIDOS Y NO PERMITIDOS DEL SUELO

Las limitaciones en el uso del suelo que se establezcan deben considerar diferentes niveles de protección del acuífero. Se recomienda establecer un área de máxima protección cerca de las nacientes o pozos donde sólo se permitan actividades relacionadas con la extracción y aprovechamiento del agua; y una segunda área de alta protección acorde con lo establecido en el mapa de uso recomendado del suelo.

Con base en los resultados obtenidos se proponen las siguientes recomendaciones:

- **Área de máxima protección:** es un área cercada y de acceso restringido, donde se permitirán únicamente actividades relacionadas con la extracción y aprovechamiento del agua. En caso de equipos de bombeo que sean alimentados por generadores de combustión interna, se deberá colocar el motor y el recipiente de combustible sobre una estructura impermeable y segura. No se permitirá el ingreso de vehículos que presenten alguna fuga de aceites o combustibles. Tampoco se permitirá la construcción de ningún tipo de letrina o tanque séptico.

A partir de Foster et al. (2003), se propone extender esta zona por un radio de 50 metros alrededor de los pozos, y de 30 metros alrededor de las nacientes.

- **Área de alta protección:** Se propone no autorizar ningún cultivo, la utilización ni almacenamiento de combustibles o químicos o el ingreso o estacionamiento de vehículos

[2] Matriz de Vulnerabilidad General, aprobada por la Junta Directiva del SENARA. Acuerdo 3303, en sesión extraordinaria Nº 239 – 06 del 26 de setiembre del 2006.

con fugas de aceites o combustibles. Tampoco se permitirá la construcción de letrinas o tanques sépticos.

En esta zona no deberá haber canales de drenaje que puedan facilitar el transporte de agroquímicos hacia las tomas o pozos.

Se propone extender esta área desde la zona de máxima protección hasta el límite exterior de la zona de protección que se muestra en las Figura 7.3 a Figura 7.6. Para uniformar resultados, este límite se extendería hasta 105 metros aguas arriba de los pozos BO24 y GM88, y 265 metros aguas arriba de las nacientes de Milano y El Cairo. En todos los casos siguiendo las dimensiones laterales que se muestran en las figuras mencionadas.

Se recomienda en esta zona regenerar y generalizar las áreas de bosque.

- **Otras medidas de protección para el resto de la cuenca:** El análisis de vulnerabilidad del acuífero (Figura 6.13) determinó que éste es extremadamente vulnerables en algunas zonas y altamente vulnerables en otras. Las recomendaciones de protección en cada caso son las siguientes:

- En zonas de vulnerabilidad extrema: Recuperación o mantenimiento del bosque.
- En zonas de vulnerabilidad alta: A pesar de que la matriz del SENARA indica que se pueden permitir actividades ganaderas o agrícolas, se recomienda no permitir ninguna actividad de índole agroindustrial y destinar esta zona a protección del recurso hídrico tanto superficial como subterráneo
- En aquellas zonas urbanas ya desarrolladas sobre zonas de vulnerabilidad alta o extrema se recomienda minimizar el riesgo de contaminación mediante la construcción de sistemas de alcantarillado sanitario y plantas de tratamiento de aguas residuales. El efluente de estas plantas deberá ser descargado de manera que no ponga en peligro los acuíferos, respetando las distancias mínimas de protección de las fuentes de agua.

Se debe evitar la instalación de estaciones gasolineras, almacenes de químicos o cualquier otro establecimiento que pueda generar peligrosos derrames involuntarios.

En la zona de la carretera que está cerca de las nacientes de El Cairo se debe reducir la velocidad permitida, no permitir el adelantamiento y tomar todas las medidas del caso para evitar el posible choque o vuelco de camiones que transporten combustible o agroquímicos, para evitar derrames accidentales. Medidas similares deberán tomarse para prevenir accidentes ferroviarios en la zona donde la línea del tren se encuentre a menos de 500 metros de las fuentes de agua.

Las recomendaciones sobre uso del suelo emitidas en este apartado consideran únicamente los resultados del estudio hidrogeológico objeto de este estudio. Sin embargo para llegar a establecer recomendaciones de uso del suelo de manera integral deberán tomarse en consideración otros importantes aspectos físicos y socio-económicos de la zona.

9.2 PUNTOS DE MONITOREO

Se recomienda establecer un programa de monitoreo de las nacientes y de algunos cursos de agua. Este programa debe incluir no solamente el análisis de los agroquímicos que regularmente se vienen haciendo, sino también realizar los aforos correspondientes a las nacientes. Además del análisis de agroquímicos, se recomienda incluir en los análisis los parámetros físico – químicos y bacteriológicos que dicta el reglamento de agua potable. Se propone que se incluya dentro de esta campaña a los pozos GM-88 y BO-24. Se recomienda que este programa se realice por lo menos una vez al mes.

Conviene realizar una campaña de aforos a los ríos Destierro, Peje, Herediana, Perla; a las quebradas Once, Honda, El Cairo y Muralla en la época seca; en los puntos de aforo que se indican. Además sería conveniente obtener el hidrograma del río Destierro y del río Peje en la parte baja de ambas cuencas, con el propósito de establecer el flujo base del mismo; con lo cual podría obtenerse el caudal de aporte del acuífero hacia esos ríos.

Deberán realizarse una o más pruebas de bombeo a pozos que se encuentren cercanos a la cuenca del río Destierro, para ello deberá solicitarse la autorización de la empresa Fructa para poder realizar el ensayo. El objetivo es determinar la transmisividad del acuífero en esta zona, el cual como se anotó anteriormente, el dato se obtuvo extrapolando los datos de los pozos emplazados en la cuenca del río Peje.

Los pozos BO-14, BO-15, BO-16 y BO-17 propiedad de la empresa Fructa se encuentran cercanos a la naciente El Cairo y probablemente estos pozos presenten contaminación con agroquímicos, por lo que es recomendable practicarles un análisis y en caso de dar positivo, proceder a alertar a la empresa ya que según información proporcionada por ellos, uno de los pozos es para suministro de agua potable.

En el Cuadro 9.1 se incluyen los puntos de muestreo con las respectivas coordenadas y el tipo de monitoreo sugerido.

Cuadro 9.1: Puntos de monitoreo

Puntos de muestreo	Coordenadas		Tipo de monitoreo	
	Norte	Este	Análisis de laboratorio	Aforo
BO-24	589400	237750	✓	
GM-88	588450	239720	✓	
BO-14	585600	234000	✓	
BO-15	585480	234100	✓	
BO-16	585800	234200	✓	
BO-17	586000	234100	✓	
Naciente El Cairo	233820	585819	✓	✓
Naciente Luisiana No.1	233675	585812	✓	✓
Naciente Luisiana No.2	233696	585809	✓	✓
Naciente Luisiana No.3	233743	585809	✓	✓
Naciente Luisiana No.4	233796	585858	✓	✓
Naciente Luisiana No.5	233761	585815	✓	✓
Naciente Luisiana No.6	233755	585813	✓	✓
Milano No.1	238530	580479	✓	✓

Puntos de muestreo	Coordenadas		Tipo de monitoreo	
	Norte	Este	Análisis de laboratorio	Aforo
Milano No.2	238614	580605	√	√
Milano No.3	238633	580616	√	√
Milano No.4	238791	580662	√	√

9.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

El área de estudio establecida comprende únicamente los territorios indicados en los términos de referencia dentro de las cuencas de los ríos Destierro y Peje, sin embargo las condiciones hidrogeológicas indican que la unidad acuífera estudiada se extiende fuera de las fronteras de estos territorios. Se presume que las condiciones hidrogeológicas en las zonas vecinas de ambas cuencas son similares, sin embargo se recomienda extender el estudio a estas áreas, máxime que amplias zonas de captura de las fuentes en aprovechamiento se extienden fuera del área de estudio.

En la parte alta de la cuenca existe escasa información de pozos existentes por lo que la correlación litológica no pudo establecerse en detalle, así como el parámetro de transmisividad del acuífero; a pesar de ello los resultados obtenidos en la parte baja de la cuenca no son afectados por esta limitación.

El enfoque predominante en este estudio es desde el punto de vista hidrogeológico, sin embargo las regulaciones del uso del suelo que se pretende establecer en el marco de un proceso de ordenamiento territorial, deben ser abordadas de manera integral, considerando otras ramas científicas y socio – económicas.

9.4 OTRAS RECOMENDACIONES

La literatura indica que algunos agroquímicos, incluido el bromacil, tienen una muy alta probabilidad de ser retenidos mediante filtros de carbón activado, por lo que se recomienda instalar este tipo de filtros a la salida de las fuentes actualmente contaminadas.

10 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Aguilar, A., 1984: “Formación Uscari”. En: Sprechmann, P., (ed.): “Manual de Geología de Costa Rica: Estratigrafía”. Editorial Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San José, Costa. 320 pp.

Ahrens, W.H., 1994: “Herbicide Handbook of the Weed Science Society of America”. 7th ed. Champaign, IL: Weed Science Society of America, 1994., p. 37 http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/f?./temp/~gpuC8J:1

Alvarado, F., 1984: “Formación Suretka”. En: Sprechmann, P., (ed.): “Manual de Geología de Costa Rica: Estratigrafía”. Editorial Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San José, Costa Rica. 320 pp.

Alvarado, F., 1984: "Vulcanismo del Plio – Pleistoceno en la Cuenca Limón". En: Sprechmann, P., (ed.): "Manual de Geología de Costa Rica: Estratigrafía". Editorial Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San José, Costa Rica. 320 pp.

Arias, M., 1998: "Estudio geológico de Fila Guácimo y alrededores, Coto Brus". –202 Págs. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 202 pp. [Campaña de Bachillerato]

Badillo, E. & Rico, A., 1992: "Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos". Tomo 1. Tercera Edición. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores. Balderas 95, C.P. 06040, México D.F. 642 pp.

Base de datos SENARA, 2008.

Bethune, D., 1995: "Hidrogeoquímica". Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San Pedro, Costa Rica. [Apuntes curso de Hidrogeoquímica del Programa de Maestría en Geología con Énfasis en Manejo de Recursos Hídricos e Hidrogeología]

BRANCO, S.M., 1984: "Limnología sanitaria, estudio de la polución de aguas continentales". Monografía científica Número 28, serie Biología, OEA, 119 págs. http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Biodegrada.htm

Campos, L., 1987: "Geología de la Fila Asunción y zonas aledañas, Atlántico Central de Costa Rica". Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 40 pp. [Tesis de Licenciatura]

Castillo L y C Ruepert. 2004. Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas. Estudio piloto zona Atlántica. Resultados parciales. Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET), Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

Custodio, E. & Llamas, M., 1983: "Hidrología Subterránea". Tomo I. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 1161 pp.

Doorendbos, J. & Pruitt, W, 1986: La necesidad de riego de los cultivos. Colección FAO: Estudio de FAO Riego y Drenaje Nº 24. Roma.

EARTH (2009): "Información general de la universidad: Consejos Universitarios". http://www.earth.ac.cr/info_consejos.php

Estado de la Nación. 2004. Décimo Informe sobre el Estado de la Nación

Feoli, H y Sequeira, M. 2005.Informe sobre la situación de las nacientes de El Cairo, Luisiana y Milano de Siquirres. Informe interno. 12p. Laboratorio Nacional de Aguas. Costa Rica.

Fernández, J.A., 1984: "Formación Senosri". En: Sprechmann, P., (ed.): "Manual de Geología de Costa Rica: Estratigrafía". Editorial Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San José, Costa Rica. 320 pp.

Foster, S. & Hirata, R., 1991: "Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas". CEPIS. Lima, Perú.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. & Paris, M., 2003: Protección de la calidad de agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. – 115 págs. Groundwater Management Advisory Team. Banco Mundial, Washington, D. C.

Gaceta No. 7 del 10 de enero del 2007. Reglamento sobre Registro, Uso y Control de Plaguicidas Sintéticos Formulados, Ingrediente Activo Grado Técnico, Coadyuvantes y Sustancias Afines de Uso Agrícola. Decreto Nº 33495-MAG-S-MINAE-MEIC..

González de Vallejo, L., Ferrer, L., Ortuño, L., & Oteo, L., 2002: "Ingeniería Geológica". Pearson Educación, S. A. Núñez de Balboa, 120. Madrid, España. 744 pp.

Hansch, C., Leo, A., & Hoekman, D., 1995: "Exploring QSAR - Hydrophobic, Electronic, and Steric Constants". American Chemical Society. Washington, DC. p. 61

INE (2009): "Los plaguicidas y su transporte en el ambiente". Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. http://www.ine.gob.mx/dgicurg/plaguicidas/pdf/bromacil.pdf

Infoagro, 2009: "Infoservicios: fitoconsulta". http://www.infoagro.com/agrovademecum/fito_m.asp?nreg=15162

IRET (sin fecha): "*Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica"*. Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET), Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS). Escuela de Ciencias Ambientales (EDECA). Universidad Nacional de Costa Rica. Heredia, Costa Rica. [Material en disco compacto]

IRET – UNA De la Cruz, E, Ruepert, C, Wesseling, C, Monge, P, Chavarri, F, Castillo, L y Bravo; V., 2004: "Los plaguicidas de uso agropecuario en Costa Rica: impacto en la salud y el ambiente". Área de Servicio Agropecuario y Medio Ambiente de la Contraloría General de la República. San José, Costa Rica. 61pp. [Informe de consultoría]

Instituto Meteorológico Nacional. 1988. Catastro de las series de precipitaciones medidas en Costa Rica. Estación No. 73009 El Cairo, Siquirres. Serie 1938 – 1968.

Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas de la Universidad Nacional (IRET). 1999. Manual de Plaguicidas. Guía para América Central. Segunda Edición. 395 pág.

Jury WA, Focht DC, Farmer WJ (1987): "Evaluation of pesticide groundwater pollution potential from standard indices of soil chemical adsorption and degradation". J Environ Qual 16:422-428.

Rodríguez, A. 1997: "Comportamiento de agroquímicos en un acuífero somero bajo una plantación bananera en la zona Atlántica de Costa Rica". Programa de Estudios de

Posgrado en Geología con énfasis en Manejo de Recursos Hídricos e Hidrogeología. Universidad de Costa Rica. San Pedro, Costa Rica. [Tesis para optar al grado de Magíster Scientiae]

Salazar, L. G., 1996: "Análisis geológico y geomorfológico aplicado al Plan regulador de parte del cantón de Guácimo, Costa Rica". Págs. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 93 pp. [Tesis de Licenciatura]

Schosinsky, G. & Losilla, M., 2000: "Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual". – Revista Geológica de América Central, 23: 43 – 55.

Schosinsky, G., 2006: "Cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante balance hídrico de suelos". – Revista Geológica de América Central, 34 – 35: 13 – 30.

Sequeira, M. 2007. Informe sobre la Calidad del agua en las Fuentes de Abastecimiento de los acueductos de El Cairo, Luisiana y Milano de Siquirres. Informe interno. 8p Laboratorio Nacional de Aguas. Costa Rica.

Soto, G., 1988: "Estructuras volcano tectónicas del Volcán Turrialba, Costa Rica, América Central". Actas V Congreso Geológico Chileno, 8 – 12 agosto 1988 Santiago, Tomo III: 163-177.

Soto, J., 1989: "Diseño de sistema de riego para finca de uso agrícola múltiple". Escuela de Ingeniería Agrícola. Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica [Tesis de Licenciatura]

UNEP, FAO, PIC & INC (1999): "Aplicación del procedimiento provisional de consentimiento fundamentado previo: aprobación de documentos de orientación para la adopción de decisiones en relación con productos químicos previamente identificados". Organización de Naciones Unidas. http://www.pic.int/incs/INC6/6b)/Spanish/6-A2S.PDF

VANDRIESCHE, R. G. (1985). Pesticide profiles: Bromacil. Cooperative Extensión Service. Pp 10 - 77. Department of Entomology, University of Massachusetts. Cooperative Extension Service (Amherst, MA).

Villón, M.2004: "Hidrología". Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 474 pág.