

62715

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS GEOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS GEOLÓGICAS**



**CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA DE LAS
AGUAS SUBTERRÁNEAS DE ISLA DE PASCUA
(RAPA NUI), CHILE.
(27°09'30'' latitud sur ; 109°26'14'' longitud oeste)**

**Memoria para optar al
título de geólogo**

MANUEL ALEJANDRO PINCHEIRA ARGANDOÑA
Antofagasta, diciembre de 2003

**Realizado con el apoyo científico y de laboratorio del
Instituto Geológico y Minero de España**

Profesor Guía: Dr. Christian Herrera Lameli

Este trabajo se ha realizado en la Universidad Católica del Norte (Antofagasta, Chile) dentro de un acuerdo entre dicha entidad y el Instituto Geológico y Minero de España en cuanto a apoyo químico y analítico, y el apoyo especializado tanto del Dr. Christian Herrera Lameli (UCA) como del Dr. Emilio Custodio Gimena (IGME).

*... a Dios,
mis padres
y mi familia...*

Resumen

Isla de Pascua se ubica en el Océano Pacífico en los 27°09'30" de latitud sur y los 109°26'14" de longitud oeste, a 3.700 km de la costa de Chile continental, frente al puerto de Caldera.

Pascua es una isla oceánica de edad Plioceno-Pleistoceno a Holoceno. Y que se formó producto de la erupción de tres centros volcánicos principales: el volcán Poike, un estrato volcán de 3 m.a; la caldera de Rano Kau; y el complejo volcánico Terevaka, de 517 metros de altura, y sus conos asociados. Las lavas presentan un rango composicional bastante amplio que varía de toleitas y toleitas de olivino a hawaiitas, mugaritas, benmoritas, traquitas y riolitas. Las hawaiitas son las rocas más abundantes, mientras que las traquitas y las riolitas son escasas, presentándose principalmente al suroeste de la Isla en los alrededores de Rano Kau.

Posee un clima marítimo templado cálido, influenciado por el anticiclón del pacífico, con precipitaciones que alcanzan un promedio anual de 1126 mm, con máximos en abril y mayo. Las temperaturas son más o menos homogéneas durante todo el año, con una media mínima en agosto de 17,77 °C y una media máxima en febrero de 23,57 °C.

El acuífero principal lo componen los cuerpos de los conos volcánicos, que presentan una alta permeabilidad producida por la porosidad y las fracturas presentes en las lavas. La superficie piezométrica de la isla, se encuentra a muy pocos metros por sobre el nivel del mar, no superando los 3 metros de espesor en los sondeos centrales. La recarga del acuífero es producida principalmente por las precipitaciones, que alcanza un promedio anual del 74% de volumen caído.

Los análisis químicos e isotópicos, se realizaron a partir de 18 puntos de control distribuidos en toda la isla y que involucran aguas de tubos volcánicos, sondeos, pozos y lagunas, además de 2 puntos adicionales para las agua lluvia de Hanga Roa y Vaitea.

La composición química de las aguas presenta una clara evolución en su recorrido por el ciclo hidrológico, desde las precipitaciones con un carácter iónico clorurado-sódico a bicarbonatado-cálcico; pasando por las aguas de los tubos volcánicos y los sondeos, con un aumento paulatino en la concentración de sales disueltas hasta las aguas de los pozos en la costa con una composición fuertemente clorurado-sódico.

Los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD en las aguas subterráneas, establecen una zona de recarga situada entre un mínimo de 30 y 100 metros a un máximo de 225 a 300 metros. Los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD en las aguas de lluvia por su parte, permiten establecer una línea meteórica local de $\delta\text{D} = 7,6 * \delta^{18}\text{O} + 9,2$.

Según los contenidos de tritio, el tiempo medio de residencia de las aguas comprende rangos de edades que van de 2 a 3 años para los tubos volcánicos a 30 años para el sondeo central de Vaitea.

Se entregan algunas recomendaciones para el cuidado y protección del acuífero que incluyen, la instalación del vertedero de la isla en un lugar cercano a la costa, habilitación de sondeos de monitoreo para posibles aguas percoladas, precauciones de bombeo en captaciones cercanas al mar, entre otras.

CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN

1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS.....	12
3. GENERALIDADES DE ISLA DE PASCUA	12
3.1. Ubicación y acceso	12
3.2. Antecedentes históricos-culturales de Isla de Pascua	13
3.3. Flora y fauna	14
4. TRABAJOS ANTERIORES.....	15
5. MÉTODO DE TRABAJO.....	17
Etapa 1: Investigación bibliográfica y preparación de terreno.	17
Etapa 2: Campaña de terreno	17
Etapa 3: Trabajo de gabinete	19
AGRADECIMIENTOS.....	20

CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA

1. INTRODUCCIÓN	21
2. MARCO TECTÓNICO	21
3. MARCO GEOLÓGICO GENERAL.....	22
3.1. Volcán Poike	22
3.2. Volcán Rano Kau	22
3.3. Volcán Terevaka	23
4. GEOMORFOLOGÍA.....	25
4.1. Generalidades	25
4.2. Sistema de drenaje	28

CAPÍTULO 3. CLIMA E HIDROGEOLOGÍA

1. INTRODUCCIÓN	28
2. CLIMA.....	28
2.1. Características Climatológicas Generales.....	29
2.1.1. Presión atmosférica	29
2.1.2. Vientos.....	29
2.1.3. Insolación.....	30
2.1.4. Humedad relativa.....	30
2.1.5. Nubosidad.....	30
2.2. Precipitaciones	31
2.2.1. Variación mensual y anual.....	31
2.2.2. Intensidad	32
2.2.3. Distribución de la lluvia en la Isla.....	32
2.3. Temperaturas	33
2.3.1. Variación mensual	33
2.3.2. Distribución y variaciones de la temperatura en la isla	34
2.4. Evapotranspiración.....	34
2.4.1. Método empírico de Thornthwaite.	35
3. HIDROGEOLOGÍA	36
3.1. Inventario de puntos de aguas	36
3.1.1. Sondeos.....	37
3.1.2. Pozos.....	40
3.1.3. Lagunas	41
3.1.4. Tubos volcánicos	41
3.1.5. Aguas lluvia	42
3.1.6. Agua de mar	42
3.1.7. Otras manifestaciones de aguas	42
3.2. Características hidrogeológicas de las formaciones volcánicas.....	42
3.2.1. Parámetros hidráulicos	44
3.2.2. Geometría del acuífero	45

3.3. Superficies piezométricas.....	45
3.4. Caracterización de la recarga.....	49
3.4.1. Estimación de la infiltración por balance de cloruros	49

CAPÍTULO 4. HIDROGEOQUÍMICA

1. INTRODUCCIÓN	51
2. ASPECTOS HIDROQUÍMICOS DE LAS FORMACIONES VOLCÁNICAS.	51
3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE ISLA DE PASCUA	52
3.1. Datos disponibles y resultados	52
3.2. Características de parámetros físico- químicos de las aguas	56
3.2.1. Conductividad eléctrica y contenido de cloruros	56
3.2.2. pH	58
3.2.3. Temperatura	59
3.3. Características químicas de las aguas	59
3.3.1. Características químicas del agua de lluvia	59
3.3.2. Características químicas de las aguas subterráneas.	62
3.4. Relaciones Iónicas	68
3.4.1. Relación r_{Cl}/r_{CO_3H}	69
3.4.2. Relación r_{Mg}/r_{Cl}	70
3.4.3. Relación r_{SO_4}/r_{Cl}	71
3.4.4. Relación r_{Cl}/r_{Br}	72
3.4.5. Relación r_{Na}/r_{Cl}	74
3.4.6. Relación r_{Mg}/r_{Ca}	77
3.5. Mezcla de aguas	78

CAPÍTULO 5. ISÓTOPOS AMBIENTALES

1. INTRODUCCIÓN.....	80
2. ISÓTOPOS ESTABLES. ^{18}O y D.....	80
2.1. Características generales del ^{18}O y D	80

2.2. Contenido de ^{18}O y D en la precipitación	81
2.3. Contenido de ^{18}O y D en las aguas subterráneas	82
2.4. Estudio de los contenidos de ^{18}O y D en la precipitación	83
2.5. Relación con la altitud	89
2.6. Estudio de la relación $^{18}\text{O}/\text{D}$ en la precipitación	91
2.7. Estudio de la relación del $^{18}\text{O}/\text{D}$ en las aguas subterráneas	93
3. ISÓTOPOS RADIOACTIVOS. TRITIO	94
3.1. Características generales del tritio	94
3.2. Contenido de tritio en la precipitación	95
3.3. Contenido de tritio en las aguas subterráneas	97
3.4. Tiempo de residencia de las aguas	98
3.4.1. Código MULTIS	98
3.4.2. Función de entrada	99
3.4.3. Modelos (matemáticos) de Flujo	101
3.4.4. Resultados	104

CAPÍTULO 6. CALIDAD Y CONSERVACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

1. INTRODUCCIÓN	108
2. CALIDAD DE LAS AGUAS	108
2.1. Potabilidad del agua	108
2.2. Usos agrícolas y ganaderos	112
3. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	115
3.1. Tipos y fuentes de contaminación en las aguas	115
3.2. Contaminación asociada a los vertederos de basura	116
4. PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS	118

CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1. INTRODUCCIÓN	119
2. DISCUSIÓN GENERAL	119

2.1. Aspectos Generales	119
2.2. Ciclo hidrológico	120
2.2.1. Precipitaciones	120
2.2.2. Recarga	122
2.2.3. Aguas subterráneas.....	123
2.2.4. Lagunas	125
3. CONCLUSIONES	126
4. RECOMENDACIONES.....	128
 BIBLIOGRAFÍA	 130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación y acceso de Isla de Pascua	13
Figura 2. Mapa geológico de Isla de Pascua (Modificado de Baker y otros, 1974).....	24
Figura 3. Diagrama tridimensional de la morfología de isla de Pascua.	27
Figura 4. Fotografía panorámica del la caldera de Rano Kau.....	27
Figura 5. Gráfico de barras de la precipitación media mensual (mm) en Isla de Pascua	31
Figura 6. Diagrama de caja para las temperaturas medias mensuales (°C) de Isla de pascua.....	33
Figura 7. Mapa de ubicación de puntos de agua	38
Figura 8. Mapa de curvas piezométricas de Isla de Pascua	47
Figura 9. Relación entre la conductividad eléctrica y contenido de cloruros.....	57
Figura 10. Mapa de curvas de isoconcentración de Cl y Na (mg/l).....	60
Figura 11. Diagramas de Schoeller-Berkaloff para las precipitaciones.....	61
Figura 12. Diagrama Schoeller-Berkaloff para las aguas subterráneas de Isla de Pascua.....	64
Figura 13. Diagrama de triangular de Piper para las aguas de Isla de Pascua	65
Figura 14. Diagramas de Stiff para las muestras de agua de Isla de Pascua.....	67
Figura 15. Relación iónica rCl/rCO_3H+CO_3 v/s rCl	70

Figura 16. Gráfico relación iónica rMg/rCl v/s rCl.....	72
Figura 17. Gráfico relación rSO ₄ /rCl v/s rCl.....	73
Figura 18. Gráfico relación rCl/rBr v/s rCl	74
Figura 19. Gráfico relación rNa/rCl v/s rCl	75
Figura 20. Mapa de curvas de relaciones iónicas.....	76
Figura 21. Gráfico relación rMg/rCa v/s rCl.....	77
Figura 22. Relación entre el contenido de δ ¹⁸ O y las precipitaciones mensuales de Isla de Pascua.	84
Figura 23. Relación entre el contenido de δD y las precipitaciones mensuales de Isla de Pascua.....	84
Figura 24. Diagrama de caja para los contenidos mensuales de δ ¹⁸ O en el agua de lluvia.....	86
Figura 25. Diagrama de caja para los contenidos mensuales de δD en el agua de lluvia.....	87
Figura 26. Rectas altitudinales locales obtenidas para el δ ¹⁸ O a partir de las muestras de agua lluvia, tubos volcánicos y el conjunto sondeos.	90
Figura 27. Relación δ ¹⁸ O/ δD (‰) SMOW para las precipitaciones de Isla de Pascua	92
Figura 28. Relación δ ¹⁸ O/ δD (‰) SMOW para las muestras de aguas subterráneas de Isla de Pascua.....	94
Figura 29. Contenidos de tritio en la lluvia para las estaciones de Isla de Pascua e Islas Cook (Nueva Zelanda).....	97
Figura 30. Funciones de entrada para los contenidos de tritio de las lluvias de Isla de Pascua	100
Figura 31. Diagrama de bloque para el modelo de flujo exponencial (EM).....	101
Figura 32. Diagrama de bloque para el modelo de flujo lineal (LM).....	102
Figura 33. Diagrama de bloque para el modelo de flujo pistón (PM)	102
Figura 34. a) Conexión en serie de un EM con un PM (EPMs) y b) Conexión en serie de un LM con un PM (LPMs).....	103
Figura 35. Relación curvas función de entrada- función de salida para los modelos de flujo utilizados.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Promedios mensuales de presión atmosférica (mb) para Isla de Pascua.....	29
Tabla 2. Velocidad máxima en nudos y dirección preferencial del viento en Isla de Pascua.	29
Tabla 3. Totales mensuales (promedios) de horas de sol en Isla de Pascua.	30
Tabla 4. Humedad relativa (%) mensual promedio para Isla da Pascua.	30
Tabla 5. Distribución porcentual mensual del número de días con nubosidad de 6/8 de cielo cubierto en Isla de Pascua.	30
Tabla 6. Precipitaciones mensuales en mm y coeficiente de variación (%) en Isla de Pascua.	31
Tabla 7. Intensidad máxima de precipitaciones (mm) en 24 horas en Isla de Pascua.....	32
Tabla 8. Estadísticos para las temperaturas medias mensuales en Isla de Pascua.....	33
Tabla 9. Índice de calor mensual (<i>i</i>) e índice de calor anual (<i>I</i>) para Isla de Pascua.....	35
Tabla 10. Evapotranspiración potencial media en mm/mes.....	35
Tabla 11 Número máximo de horas de sol y días del mes.	35
Tabla 12. Valor de la constante <i>K</i> para cada mes.	35
Tabla 13. Evapotranspiración potencial en mm/mes y mm/día (Método de Thornthwaite).....	36
Tabla 14. Evapotranspiración potencial en mm/mes según Hajek y Espinoza (1987).	36
Tabla 15. Características generales de los sondeos en Isla de Pascua	40
Tabla 16. Valores de la Infiltración según el balance de cloruros para cada muestra.....	50
Tabla 17. Porcentaje de error analítico admisible de una muestra según su conductividad.....	54

Tabla 18. Procedimientos técnicos realizados para los distintos parámetros determinados en los análisis químicos.	53
Tabla 19. Resultado análisis químico de las muestras de los sondeos en Isla de Pascua.....	54
Tabla 20. Resultado del análisis químico de las muestras de tubos volcánicos, cavernas, pozos y agua de mar en Isla de Pascua.	55
Tabla 21. Resultado del análisis químico para las muestras de precipitación del sector de Hanga Roa.	56
Tabla 22. Resultado del análisis químico para las muestras de precipitación del sector de Vaitea	56
Tabla 23. Relaciones iónicas de las muestras.....	69
Tabla 24. Resultados de cálculos de mezcla de agua para el sector de Hanga Roa.	78
Tabla 25. Resultados de cálculos de mezcla de agua para el sector sureste.....	79
Tabla 26. Resultados de cálculos de mezcla de agua para el sector noreste.	79
Tabla 27. Determinaciones de ^{18}O y D para las precipitaciones de Hanga Roa y Vaitea.....	81
Tabla 28. Concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ y δD en las aguas subterráneas de Isla de Pascua.....	82
Tabla 29. Estadísticos para las concentraciones mensuales de $\delta^{18}\text{O}$ en las precipitaciones.....	85
Tabla 30. Estadísticos para las concentraciones mensuales de δD en las precipitaciones.....	87
Tabla 31. Estimadores robustos centrales para los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD	88
Tabla 32. Contenido de Tritio (UT) para distintas muestras de aguas subterráneas de Isla de Pascua	98
Tabla 33. Resultados aplicación código MULTIS para La función de entrada sin ponderar.....	104
Tabla 34. Resultados aplicación código MULTIS para la función de entrada ponderada.....	105

Tabla 35. Resultados para EPMs y LPMs, para sondeos, según función de entrada ponderada.	106
Tabla 36. Normas de potabilidad del agua según la O. M. S. (1963), la Comunidad Europea y el Ministerio de Salud Pública de Chile.	109
Tabla 37. Categorías de las aguas según índice SAR y conductividades.	113

ANEXOS

1. Tabla resultados análisis AIEA estación Isla de Pascua
(Período del 15/01/1964 al 15/12/2000)
2. Programa AIEA/OMM Sobre la composición isotópica de la precipitación:
Global Network Of Isotopes In Precipitation (GNIP)
3. Tabla resultados análisis AIEA estación Islas Cook (Nueva Zelanda)
(Período del 15/01/1957 al 15/12/1994)
4. Funciones de entrada código MULTIS
 - a) Función de entrada sin ponderar
 - b) Función de entrada ponderada según la precipitación.
5. Mapa geológico (1:50.000) de Isla de Pascua (Rapa Nui). (27°09'30" latitud sur; 109°26'14" longitud oeste)
6. Superficie piezométrica (1:75.000), diagramas de Stiff y contenido de oxígeno 18, deuterio y tritio de las aguas subterráneas de Isla de Pascua (Rapa Nui). (27°09'30" latitud sur; 109°26'14" longitud oeste)

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Isla de Pascua o Rapa Nui en lengua nativa, es uno de los patrimonios turísticos chilenos más importantes debido a la gran riqueza arqueológica e histórica del lugar, que transforma a este territorio en un rincón único en el planeta con sus monumentales esculturas de piedra conocidas como los Moais, y su enigmática cultura que aún no ha sido descifrada en su totalidad por los investigadores. Este extraordinario capital cultural, sumado a lo exótico y aislado de su territorio, ha transformado a Isla de Pascua en un importante punto de atracción internacional con un número cada vez mayor de visitantes lo que a su vez implica un aumento importante en la demanda de agua, aspecto que tiene un impacto cada vez mayor en la zona.

En este contexto, la necesidad de cuantificar y preservar los recursos hídricos de la Isla se transforma en un tema fundamental para el desarrollo futuro de su población, ya que un mal uso o contaminación de éste valioso capital puede generar problemas que afecten inclusive la supervivencia de la comunidad.

En la actualidad el abastecimiento doméstico de agua potable se apoya exclusivamente en la extracción de aguas subterráneas a partir de pozos excavados por CORFO en la década de los '60 y que son administrados por parte de la empresa SASIPA (empresa mixta de origen público y privado encargada de la administración de los recursos hídricos de Isla de Pascua). Sin embargo, el escaso conocimiento que existe acerca del funcionamiento del sistema hidrológico de la Isla ha dificultado a la administración resolver una serie de inconvenientes en la gestión de los recursos de agua, entre los que se pueden mencionar la escasez de información para plantear la exploración de nuevos recursos de aguas subterráneas, insuficiencia de datos de recarga al acuífero para conocer la cantidad máxima de agua que se puede extraer del sistema y la imposibilidad de ubicar de modo seguro un vertedero a fin de no contaminar el acuífero.

Esta memoria espera contribuir al conocimiento general de la hidrogeología de Isla de Pascua y a la necesidad de cuantificar y preservar los recursos hídricos de ella, a fin de aportar a la gestión y administración que se hace de los mismos.

Por último, cabe señalar que la presente investigación se enmarca dentro de las actividades curriculares para la obtención del título de geólogo que otorga la Universidad Católica del Norte.

2. OBJETIVOS

Esta memoria intenta evaluar, a través de un estudio hidrogeológico, el potencial y calidad de los recursos hídricos de Isla de Pascua.

Los objetivos principales a desarrollar corresponden a:

1. Realizar una caracterización química e isotópica de las aguas subterráneas de la Isla.
2. Efectuar una estimación de la recarga a partir de técnicas hidrológicas e hidroquímicas.
3. Caracterizar la piezometría de la Isla junto con las direcciones preferenciales de flujo de las aguas subterráneas.
4. Evaluar el tiempo de residencia y la zona de recarga de las aguas subterráneas en el acuífero mediante técnicas isotópicas
5. Establecer la ubicación de las zonas más propicias para posibles vertederos en la Isla, con el objeto de prevenir y/o minimizar la contaminación del agua subterránea.

3. GENERALIDADES DE ISLA DE PASCUA

3.1. Ubicación y acceso

La Isla de Pascua se ubica en el Océano Pacífico en los 27°09'30" de latitud sur y los 109°26'14" de longitud oeste, a 3.700 km de la costa de Chile continental, frente al puerto de Caldera. Al oeste, a 2.200 Km de Pascua, se encuentra Isla Pitcairn y a 4.050 Km se localiza Tahití, en la Polinesia. (Figura 1).

El acceso más habitual a la isla es por la vía aérea mediante vuelos que se realizan desde la ciudad de Santiago de Chile con una frecuencia de 2 a 3 veces

por semana, dependiendo de la época del año. Este viaje dura alrededor de 4 a 5 horas según el tipo de avión y las condiciones de vuelo reinantes.

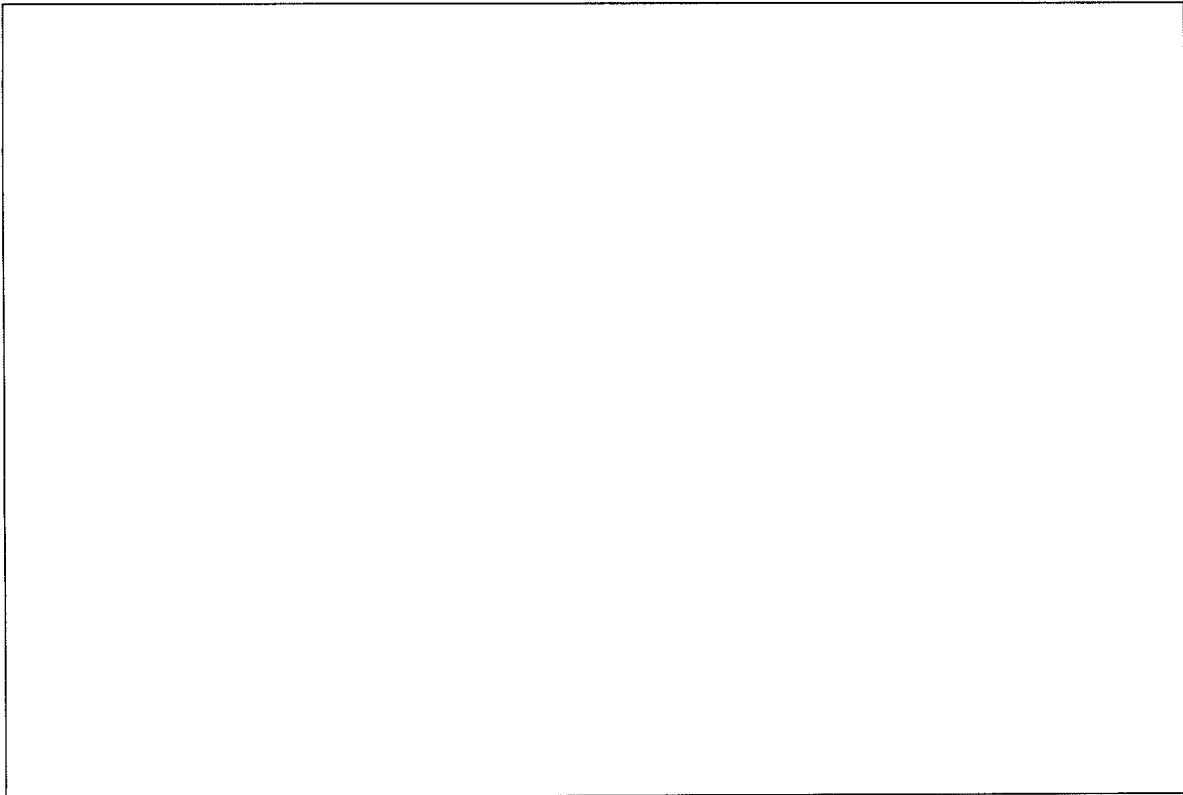


Figura 1. Mapa de ubicación y acceso de Isla de Pascua

Los círculos rojos indican la posición de las islas que conforman la denominada "línea caliente de Pascua" (Bonatti y otros, 1977). Se indican además, algunos rasgos tectónicos importantes.

3.2. Antecedentes históricos-culturales de Isla de Pascua

La historia de Isla de Pascua, denominada por sus habitantes prehistóricos como "Rapa Nui" (Isla Grande) o "Te pito o Te Henua" (ombligo del mundo), según algunos estudios se remonta al año 690 de nuestra era. El primer visitante "occidental" fue el corsario inglés Edward Davis en el año 1688, sin embargo, su descubrimiento es atribuido al holandés Jacob Roggeveen el día de Pascua de Resurrección de 1772 (5 de abril), de allí el nombre de Isla de Pascua (Castilla y Oliva, 1987). Posteriormente, durante el siglo XIX la isla fue objeto de múltiples misiones y expediciones, siendo colonizada por europeos quienes llegaron a utilizar a sus habitantes como esclavos (llegando a dejar tan solo 111 habitantes rapa-nui originales) y a la isla en la crianza de ganado ovino; actividad que sería la

base de la economía de la isla hasta principios del siglo XX. En 1888 el capitán de corbeta, Policarpo Toro toma posesión de ella el 9 de septiembre en nombre del gobierno chileno. El 16 de enero de 1935 se declara Parque Nacional y el 23 de julio del mismo año, es declarada monumento histórico, debido a su gran particularidad y relevancia arqueológica y etnográfica.

Con la inauguración del aeropuerto de Mataverí se inicia la visita continua de turistas de todo el mundo y la salida de isleños a conocer otros lugares. Poco a poco comienzan a abandonarse las labores productivas tradicionales de la isla a cambio de actividades relacionadas con el turismo, desde la fabricación y venta de artesanías, hasta el desarrollo de grandes y activas empresas.

En diciembre de 1995, en la reunión de Berlín, la UNESCO declaró al Parque Nacional Rapa Nui (que ocupa un 40% de la isla) Sitio de Patrimonio Mundial, de acuerdo a la Convención del Patrimonio Mundial Cultural y Natural del año 1972.

Actualmente la población de Isla de Pascua alcanza los 3.791 habitantes (1.985 hombres y 1.806 mujeres) de acuerdo al censo del año 2002. Su gente es mestiza, compuesta por personas de origen rapa-nui, chilenos continentales y una pequeña proporción de extranjeros.

3.3. Flora y fauna

En Isla de Pascua la fauna terrestre está representada principalmente por insectos, pequeños reptiles, y algunas aves migratorias, así como de algunos mamíferos marinos que visitan la isla. Animales terrestres fueron introducidos posteriormente por los colonizadores. Los exponentes de la fauna marina corresponden a tortugas y peces de los cuales el atún es uno de los más importantes en la dieta local. Hasta el momento se han descrito 167 especies, de las que casi un tercio de ellas son exclusivas de Rapa Nui (28%). Este alto porcentaje de endemismo la ubica en una situación de especial interés científico y turístico. Cabe destacar que la fauna de Rapa Nui fue importante no sólo como alimento, sino también como fuente de materia prima e inspiración religiosa: peces, aves y reptiles aparecen representados en el arte rupestre, figuras talladas, historias, mitos y leyendas.

La vegetación de la Isla ha sufrido numerosas modificaciones en el transcurso del tiempo producto de la sobre explotación de algunas especies por parte de los antiguos habitantes y por la introducción, voluntaria o accidentalmente, de otras por los primeros colonizadores. En la actualidad, la vegetación de Isla de Pascua es bastante monótona, en parte debido a lo rocoso y a la mala calidad de sus suelos. En general un solo tipo de vegetación cubre la mayor parte de los lomajes: una formación de champas de *Sporobulus Oblongatus*. Las especies arbóreas se desarrollan principalmente en los cráteres como el Rano Kau. Se han encontrado en la isla 135 especies, de las cuales se considera que 55 (40%) son indígenas o naturalizadas. La mayoría son especies cuyos frutos o semillas son transportados por el viento: Filicinas, Compuestas, Gramíneas y Ciperáceas. Entre las plantas cultivadas prevalecen las Leguminosas como Pináceas, Convulvuláceas, Cucurbitáceas, Mirtáceas, Malváceas, Moráceas, Musáceas y Liláceas (Hoffmann y Marticoreta, 1987)

4. TRABAJOS ANTERIORES

Las investigaciones hidrogeológicas previas realizadas en Isla de Pascua son muy escasas y se remiten sólo a informes inéditos que abordan aspectos generales. Sin embargo, existe un número mayor de publicaciones relacionadas con aspectos más bien petrológicos y/o tectónicos. Los documentos consultados en la elaboración de esta memoria son:

Alcayaga y Narbona (1970): Informe inédito preparado por CORFO donde se describen algunas características generales de los suelos de Isla de Pascua como distribución, espesores, composición, características químicas, fertilidad, capacidad de retención de las aguas y erosión.

Baker y otros (1974): Realizan un estudio petrológico y geoquímico de Isla de Pascua. Describe la distribución, abundancia y química de los distintos tipos de lavas presentes en las unidades volcánicas de la isla.

Mammerickx y otros (1975): Estudian la morfología y la evolución tectónica del Pacífico este. Realizan un levantamiento batimétrico del Pacífico sur oriental y determinan la ubicación y características de distintas estructuras del fondo oceánico.

Clark y Dymond (1977): Elaboran un estudio geocronológico y petroquímico de las rocas de las islas Pascua, Sala y Gómez. Establecen que la actividad de ellas es relativamente contemporánea. Proponen que la formación del Ridge de Sala y Gómez se debe a la existencia de una zona de fractura más que a un tipo de volcanismo hot spot.

Bonatti y otros (1977): Realizan un estudio petrológico a la cadena de volcanes y estructuras volcánicas submarinas que conforman la llamada "Línea de Pascua", para establecer su origen. Los autores concluyen que esta cadena volcánica es el producto de la actividad de plumas del manto, en varios puntos a lo largo de ella. Y la denominan la "Línea caliente de Pascua".

Álamos (1979): Informe inédito para SASIPA en el que se realiza un estudio para el mejoramiento y ampliación de la red de agua potable, de los pozos de captación y de los estanques acumuladores.

González-Ferrán (1987): Realiza una descripción de la evolución geológica volcánica y de las características petrológicas y geomorfológicos de las islas chilenas en el Océano Pacífico.

Hajek y Espinoza (1987): Elaboran un estudio de la meteorología, climatología y bioclimatología de Isla de Pascua. Determinan valores medios mensuales para la presión atmosférica, direcciones e intensidades de los vientos, horas de radiación, humedad relativa del aire, nubosidad, precipitaciones, temperaturas y valores anuales de evapotranspiración, entre otros.

Hauser (1986): Propone una alternativa de abastecimiento de agua potable para Isla de Pascua, basándose en la construcción de una captación gravitacional de agua, mediante drenes radiales y elementos anexos, en la caldera del volcán Rano Kau 3 km al sur de Hanga Roa. Esta alternativa de abastecimiento tendría un caudal que alcanzaría aproximadamente a 20 l/seg.

Álamos y Peralta (1992): Corresponde a un informe inédito preparado para la Comisión Nacional de Riego (Secretaría Ejecutiva), donde se determinan la existencia y condiciones del agua subterránea en distintos puntos de la isla para su aprovechamiento en actividades de regadío en zonas seleccionadas de la Isla.

Incluye una recopilación de antecedentes como un balance hídrico, inventarios de pozos y sondeos, análisis químicos y de conductividad, etc.

Haase y otros (1997): Estudian la evolución geoquímica, petrogenética y mineralógica de las lavas de Isla de Pascua y de algunas estructuras volcánicas vecinas asociadas. De acuerdo con sus resultados clasifican las lavas en tres series y establecen un modelo petrogenético para ellas.

5. MÉTODO DE TRABAJO

La metodología utilizada en esta memoria se divide en tres etapas

Etapa 1: Investigación bibliográfica y preparación de terreno.

En primer lugar se realizó una revisión de toda la información geológica e hidrogeológica disponible de la isla. Esta etapa incluyó además la recopilación de información meteorológica y climática, junto con la consulta de datos isotópicos en las precipitaciones a partir de la base de datos de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA). Por último, se realizó la digitalización del mapa topográfico y geológico de Isla de Pascua a escala 1:25.000.

En la organización de la campaña de terreno, junto con la preparación logística pertinente, se realizó un programa de tareas a realizar en la Isla y se efectuó, además, el envío de los implementos e instrumental necesarios para la investigación como tomamuestras, pozómetros, botellas plásticas, etc.

Etapa 2: Campaña de terreno

La campaña de terreno se realizó entre el 8 y el 15 de mayo de 2002. En ella se realizaron una serie de actividades que se detallan a continuación:

En primera instancia se procedió a la recolección de información existente en la isla, que fue proporcionada principalmente por la empresa SASIPA. Esta incluyó un inventario de pozos e informes inéditos realizados por empresas consultoras para este organismo. Posteriormente, se procedió a la inspección de los pozos, los sondeos profundos y otros puntos de interés hidrogeológico como lagunas y tubos volcánicos. En cada uno de estos puntos se realizó la toma de muestras para los análisis químicos e isotópicos. Los volúmenes de agua extraídos fueron de 1 litro para el análisis químico, 1 litro para el análisis de tritio y 120 cm³ para los análisis

de oxígeno-18 y deuterio. Estas muestras fueron almacenadas en botellas plásticas con tapón de seguridad procurando de no dejar burbujas de aire en su interior.

Para cada punto de muestreo se reconocieron características como unidad volcánica en la que se encuentran, vegetación predominante, ubicación geográfica mediante GPS y otros aspectos como la medición con pozómetro de la profundidad y del nivel freático en el caso particular de los pozos y los sondeos.

Simultáneamente con la recolección de las muestras, se efectuaron distintas mediciones en terreno para parámetros fisicoquímicos más inestables como la temperatura, el pH y la conductividad (a 25 °C). Estas mediciones se realizaron con la utilización de un conductímetro digital portátil marca HANNA, que incorpora un sensor de temperatura acoplable y un pH-metro digital de la misma marca.

En total se caracterizaron 18 puntos de recolección de muestras que están distribuidos uniformemente en toda la Isla. El detalle de estos puntos y sus características se realiza en el capítulo 3.

Por otra parte, se realizó la preparación y habilitación de dos tomamuestras de agua de lluvia en los sectores de Hanga Roa y Vaitea (sectores con distinta cota topográfica) con el objeto de obtener muestras para realizar un seguimiento mensual de la composición química e isotópica de las aguas por un lapso de tiempo de un año. Estos instrumentos constan de una rejilla para evitar que entren elementos ajenos a la lluvia como insectos y en su interior es depositada una película de vaselina líquida para evitar los efectos de evaporación que pudiesen afectar la composición de las muestras.

También se procedió a la recolección de muestras de rocas para algunas de las unidades volcánicas de las que se extrajo agua subterránea, con el objetivo de realizarles un análisis mineralógico y así verificar la relación agua-roca y poder establecer la incidencia de esta relación en la composición química de las aguas. La clasificación de las rocas se efectuó sobre la base de los triángulos de clasificación de Streckeisen (1967), y en el caso de tobas se utilizó la clasificación de Schmidt (1981). Se realizaron un total de 7 cortes transparentes para este fin.

Etapa 3: Trabajo de gabinete

Las muestras recolectadas para los análisis químicos fueron enviadas a los laboratorios del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en Madrid. Por otra parte, las muestras para los análisis isotópicos fueron remitidas a los laboratorios del Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) también en Madrid, España.

Con los datos de los niveles piezométricos recolectados en terreno se procedió a la elaboración de un mapa de piezometría con el que se establecieron las direcciones preferenciales del flujo de agua subterránea. Se realizó una estimación de la recarga por medio de un balance de cloruros en estado estacionario y también relacionando distintos valores de evapotranspiración y de precipitaciones.

La caracterización hidrogeoquímica se realizó mediante la utilización de diagramas de Schoeller-Berkaloff, diagramas de Piper, diagramas de Stiff y considerando, además, algunas relaciones iónicas de interés como por ejemplo la relación r_{CL}/r_{Br} . Además, basándose en la característica de inalterabilidad del ión cloruro, se calcularon mezclas teóricas de aguas, con el objetivo de determinar y/o cuantificar posibles intrusiones marinas, que pondría existir en algunos sectores de la Isla.

En el estudio de la composición isotópica se utilizó la relación del $\delta^{18}O$ y δD en la evaluación de los procesos de fraccionamiento y la relación de estos isótopos con la altitud para establecer las zonas de recarga al acuífero. El análisis estadístico de esta información fue tratada mediante el software S.P.S.S. 8.0 para Windows™. Para determinar los tiempos de residencia en el acuífero fue utilizado el código MULTIS que utiliza los contenidos de tritio en las aguas subterráneas y los compara con la función de entrada determinada por el contenido de tritio en las aguas de lluvia, mediante distintos modelos de flujo.

Los gráficos y diagramas fueron creados utilizando el software Grapher 3.0 y la compilación de todos los mapas fue realizada utilizando Surfer 7.0 y ArcView 3.2a. Por último, se procedió a la redacción de la presente memoria con los resultados y conclusiones obtenidos en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

La presente memoria no pudo ser realizada sin la valiosa ayuda y colaboración de numerosas personas: En primer lugar, mi profesor guía Dr. Christian Herrera Lameli, por la excelente disposición para transmitir tanto sus conocimientos como su experiencia en el campo de la hidrogeología. De igual forma a todos los profesores y personal del departamento de geología, como también a mis compañeros Belfor Ordenes, Alex Zarricueta, Brian Armstrong, Juan Vesuvio, y en general a todas las personas que de una u otra forma han aportado con consejos e ideas a la presente memoria.

Igualmente quiero agradecer al Dr. Emilio Custodio y al laboratorio del IGME, en España, por la colaboración y el financiamiento otorgado para los análisis químicos e isotópicos.

En Isla de Pascua, especiales agradecimientos al señor Gerardo Velasco, Gerente General de SASIPA, por su gran hospitalidad y disposición a prestar ayuda en todos los aspectos. También al personal de SASIPA don Ricardo Pérez y su hijo Andrés por el apoyo ofrecido en el traslado en los distintos puntos del área de estudio.

Por último agradezco de forma especial a toda mi familia que constantemente me apoyo e insto a seguir adelante.

CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA

1. INTRODUCCIÓN

Las islas chilenas del Océano Pacífico y en particular Isla de Pascua, corresponden a volcanes y estructuras volcánicas que se levantan sobre la placa de Nazca y que están asociados a puntos calientes del manto superior y a zonas de fracturas que afectan a dicha placa.

El presente capítulo resume los principales antecedentes geológicos de Isla de Pascua obtenidos de la recopilación bibliográfica y de observaciones realizadas en terreno.

En primer lugar, se realiza una breve referencia del marco tectónico en el que se encuentra emplazada Isla de Pascua, luego se describe la geología de los principales centros eruptivos, junto a una breve caracterización de los suelos, y por último, se realiza una descripción de los aspectos geomorfológicos más importantes.

2. MARCO TECTÓNICO

Isla de Pascua como se mencionó se encuentra ubicada sobre la placa de Nazca en el Océano Pacífico a 3.700 km de la costa de Chile continental, a 500 km al este del eje de la Dorsal del Pacífico Oriental y a 300 al sur este de la micro placa de Rapa Nui. Conformando junto a otras islas chilenas, como Sala y Gómez (26°27' S, 105°28' W), San Félix (26°17' S, 80°05' W) y San Ambrosio (26°20' S, 79°58' W) una cadena volcánica submarina que se extiende en dirección este-oeste hasta la fosa oceánica de Chile-Perú y que está asociada a una línea de alto flujo calórico conocida como Easter Hot Line, o Línea Caliente de Pascua (Bonatti y otros, 1977) (Figura 1)

En líneas generales Pascua corresponde a una isla volcánica del tipo oceánico, que presenta una génesis de volcanismo intraplaca tipo "Hot Spot" asociado a procesos dinámicos de una tectónica de placas próxima a una zona de rift oceánico activo como lo es la Dorsal del Pacífico Oriental. (Haase y otros, 1987).

3. MARCO GEOLÓGICO GENERAL

Pascua es una isla oceánica de edad Plioceno-Pleistoceno a Holoceno. Y que se formó producto de la erupción de tres centros volcánicos principales: el volcán Poike, el Rano Kau, y el Terevaka (Figura 2), cuyas características geológicas principales están controladas por el tipo de erupción que les dieron origen.

3.1. *Volcán Poike*

Poike es el volcán más antiguo, que se irguió a partir de dos episodios efusivos principales, que presentan edades absolutas K/Ar que oscilan entre 2,5 y 0,9 millones de años. (Clark y Dymond, 1977). Otras fuentes amplían este rango a edades de 3 millones de años a menos de 300.000 años (Baker y otros, 1974). Poike corresponde a un estrato volcán constituido por la superposición de múltiples flujos de lavas, que corresponden principalmente a basaltos y hawaiitas cuyas texturas varían de afanítica en su base a porfídica en la cima. En el acantilado norte se pueden observar claramente alrededor de 50 flujos de lava, cuya potencia varía entre 1 y 5 metros. La mayor parte de estos flujos son del tipo "aa" con niveles escoriáceos, tanto en su superficie como en su base, y que alternan con flujos tipo pahoe-hoe y pahoe-hoe-toe. Este cono es afectado por una fractura hacia su ladera norte, que dio paso a la eyección de tres domos de composición traquítica conocidos como Maunga Vai a Heva, Maunga Tea-Tea y Maunga Parehe. Otra fractura paralela en la ladera sur-oeste de Poike, produjo una erupción subacuática que forma el cono de tobas hialoclásticas conocidas como el Volcán Rano Raraku. (González-Ferran, 1987).

3.2. *Volcán Rano Kau*

Situado en el extremo suroeste de la isla, el volcán Rano Kau es relativamente contemporáneo a Poike, pero algo más joven con edades que oscilan entre 2,56 millones de años y 180.000 años. Al igual que el Poike, está formado por una sucesión de flujos de lavas basálticas que gradan de hawaiitas a benmoritas. Estas últimas, representan una fase final caracterizada por erupciones más félsicas que se distribuyen principalmente en el costado este de la gran caldera central, que se formó luego de las últimas erupciones. Una fractura, con dirección

noreste-suroeste, caracteriza una serie de centros eruptivos parásitos que se distribuyen principalmente en los sectores de Maúnga Orito, donde se desarrolla un domo riolítico de unos 200 m de altura; Te Mamavai, conformado por un domo de composición traquítica a riolítica afanítica de color gris claro con obsidiana en la superficie; y en los tres pequeños islotes ubicados al suroeste de Rano Kau conocidos como los Motus de composición riolítica.

3.3. Volcán Terevaka

El más joven de los tres es el volcán Terevaka, que a diferencia de los otros dos no presenta un cráter principal, ya que es el producto de múltiples erupciones controladas por dos sistemas de fracturas que presentan rumbos aproximados NNE-SSW y WNW-ESE, y cuyas sucesiones de lavas y conos piroclásticos estructuraron el cuerpo principal de la isla, anexando a los volcanes Poike y Rano Kau que hasta entonces permanecían como "islas" independientes.

El cuerpo principal del Terevaka está estructurado por numerosos flujos laminares de lava basáltica, hawaíica y en menor proporción de algunas benmoritas. En él se distribuyen alrededor de 104 centros eruptivos en forma de cráteres, conos o domos, el 60 % de los cuales se encuentra alineado en una franja de un kilómetro de ancho por 12 kilómetros de longitud, y que constituyen la fractura principal con un rumbo NNE-SSW, desde Hanga-Oteo, pasando por la cumbre del Terevaka hacia el Maunga Tangaroa-Punapau.

Las coladas más antiguas afloran en la vertiente norte y corresponden a basaltos afaníticos. La edad absoluta obtenida para algunos flujos es de 360.000 años aunque no se descartan coladas más antiguas. Se estima que su última actividad eruptiva ocurrió entre unos 10.000 y 12.000 años atrás, y que corresponde a la colada de lava de Hiva-Hiva en el sector de Rohio. (González-Ferran, 1987).

Hacia el sur, desde Rano Aroi, fluyen lavas basálticas muy porfídicas, que escurren hacia la vertiente suroeste y sur este, sobre la cual se levantan numerosos conos de piroclastos y ceniza.

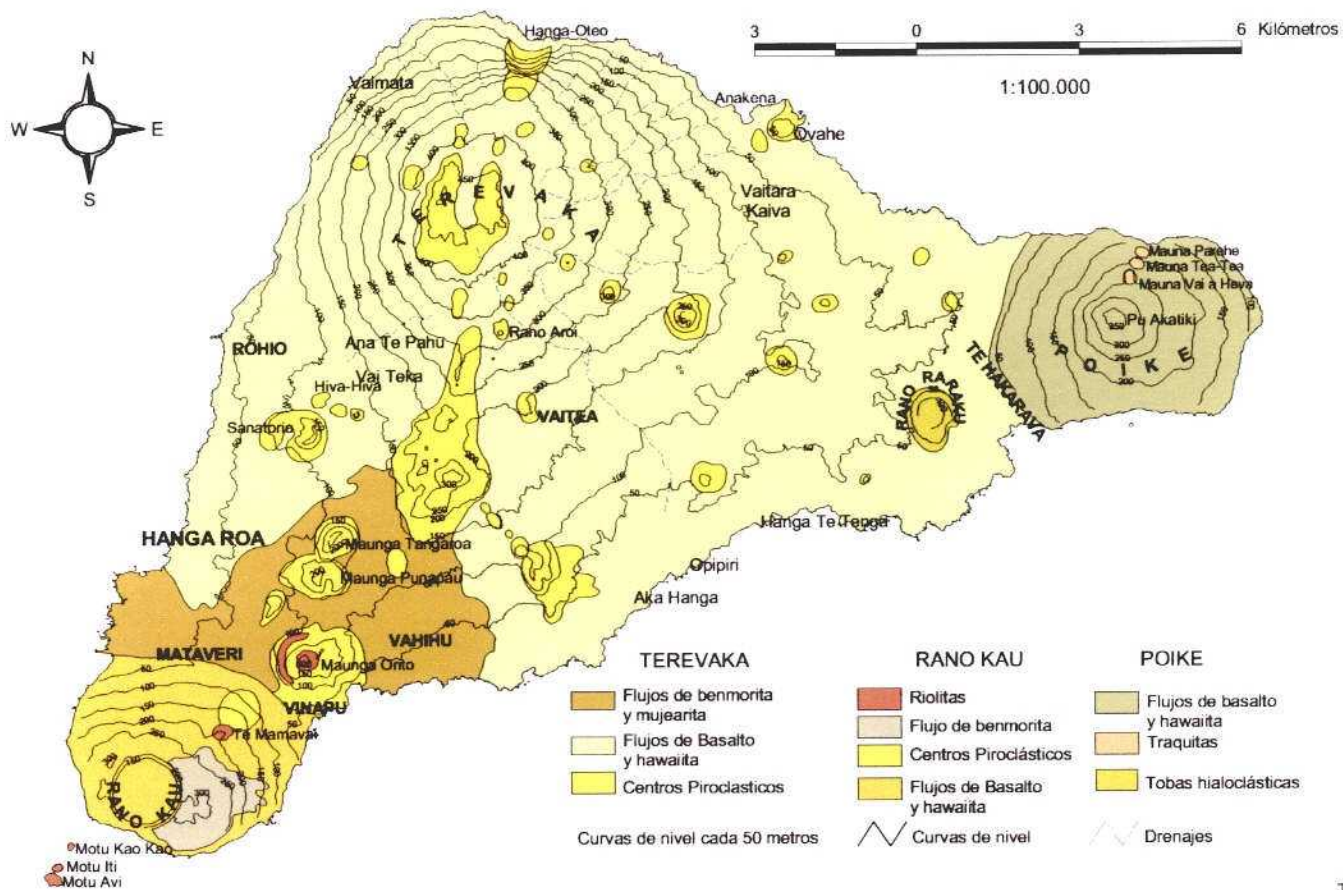


Figura 2. Mapa geológico de Isla de Pascua. (Modificado de Baker y otros, 1974)

Un rasgo característico de numerosas coladas es la formación de tubos volcánicos, que se distribuyen a lo largo de toda la isla. Estos presentan dimensiones que varían de 3 a 5 m de diámetro y longitudes de hasta centenares de metros.

El suelo, formado por cenizas volcánicas y la descomposición de las lavas, es muy delgado, no superando el metro de potencia. Éstos son predominantemente arcillosos, de tal modo, que las fracciones limo y arcilla están presentes entre un 60 % y un 95 %.

4. GEOMORFOLOGÍA

4.1. Generalidades

Isla de Pascua se levanta a unos 3.000 metros sobre el fondo oceánico. Su base oceánica presenta forma trapezoidal y alcanza dimensiones de 130 Km x 90 km x 60 km x 100 km, aproximadamente, es decir su superficie basal es casi cincuenta veces superior a la superficie de la isla y, dada su baja pendiente, su cuerpo estructura un típico escudo volcánico oceánico. (González-Ferran, 1987).

La morfología de Isla de Pascua está claramente controlada por las características petrológicas de los distintos episodios efusivos y también por los efectos de la erosión.

En general, Isla de Pascua tiene una forma triangular que posee una superficie aproximada de 160 km² y una elevación máxima en la cumbre del volcán Terevaka que alcanza los 517 metros sobre el nivel del mar. Su ancho máximo es de 13 km en el sector norte (Figura 3). Las pendientes en la Isla, varían de 4 a 15 % en los sectores mas llanos, mientras que en los conos volcánicos, estas varían de 5 a 20 % llegando incluso en algunos sectores a 40 % y mas. La topografía original está bien conservada debido a la gran permeabilidad que caracterizan a los flujos de lavas basálticas y a los conos cineríticos, lo que ha evitado la formación de corrientes de aguas superficiales permanentes que erosionen la isla. Los mayores procesos erosivos han sido causados por la acción del mar, que ha labrado importantes acantilados y que están presentes en casi toda la costa de la isla; a excepción de los sectores de Hanga Roa, sectores al sureste de la isla y en la única playa conocida como Anakena en el sector Norte.

El volcán Poike, ubicado en el extremo oriental de la isla, constituye una pequeña península de unos 5 km en dirección este-oeste por 3,5 km en dirección norte-sur. Posee una forma cónica simple, casi simétrica, que alcanza una altura de 370 metros. En su parte central existe un pequeño cráter en la cumbre, denominado Pu Akatiki, de unos 150 metros de diámetro y de 10 a 15 metros de profundidad. Este cono volcánico, como ya se mencionó, se encuentra interrumpido en su ladera norte por una línea de tres domos parásitos de unos 100 metros de diámetro, orientados en dirección norte-sur. El volcán Poike ha sido afectado fuertemente en su periferia por la erosión marina que ha generado escarpados acantilados especialmente en las laderas norte y sur que alcanzan hasta los 175 metros de altura. También se puede observar parte del acantilado hacia el costado oeste, en el sector de Te Hakarava, donde la erosión marina dejó de actuar una vez que las lavas del Terevaka alcanzaron a Poike.

Rano Kau alcanza una altura máxima de 324 metros sobre el nivel del mar. Un rasgo morfológico característico de este volcán corresponde a la gran caldera formada en su interior cuyo diámetro es de aproximadamente 1,5 km, y en donde se ha formado una laguna que se ubica a 120 metros sobre el nivel del mar (Figura 4). En el costado noreste presenta un cráter parásito de unos 300 x 500 metros conocido como Te Mamavai que se alza a 160 metros sobre el nivel del mar. Es interesante destacar la fuerte abrasión marina que ha sufrido particularmente su sector sur, donde los acantilados alcanzan una altura de casi 300 metros.

Por último el Volcán Terevaka, a diferencia de los dos anteriores, no posee un cráter central característico, sino que corresponde a un complejo de centros eruptivos controlados por un sistema de fracturas, y cuyas sucesiones de lavas y conos piroclásticos, al unirse con Poike y Rano Kau, han estructurado el cuerpo principal de la isla. En general, Terevaka hacia el sector central de la isla, presenta pendientes muy suaves que son alteradas sólo por la presencia de algunos centros piroclásticos; el sector norte en tanto presenta pendientes mucho más marcadas, producidas principalmente por la acción erosiva del mar.

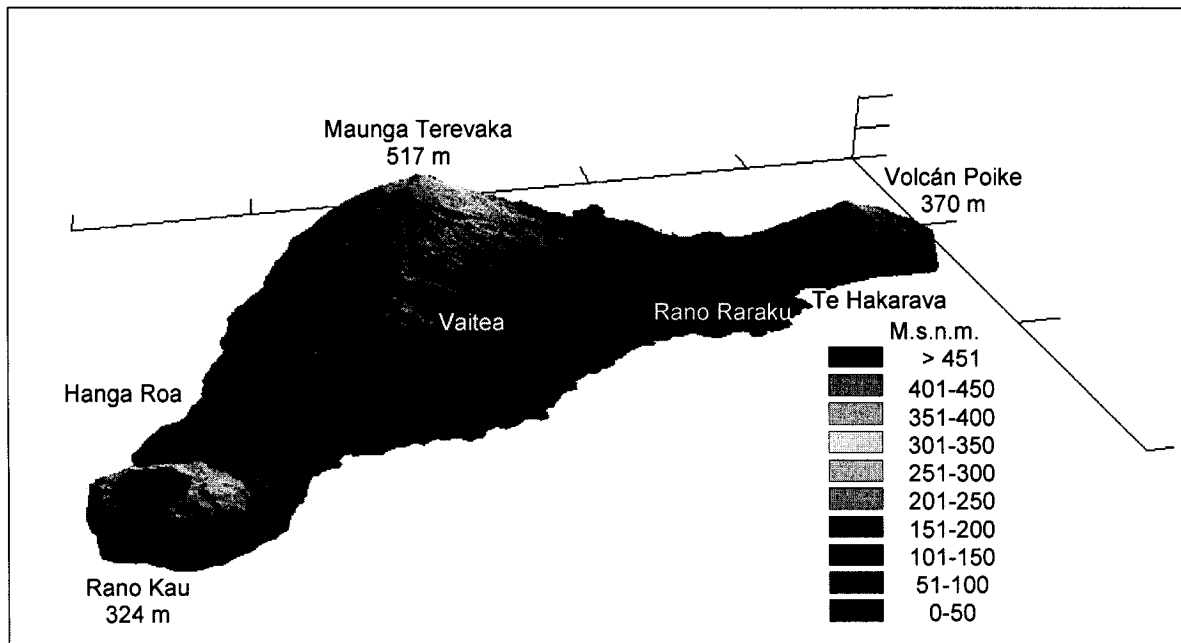


Figura 3. Diagrama tridimensional de la morfología de isla de Pascua.

La figura presenta un factor de exageración vertical de 4x. La escala de colores representa la altura sobre el nivel del mar.

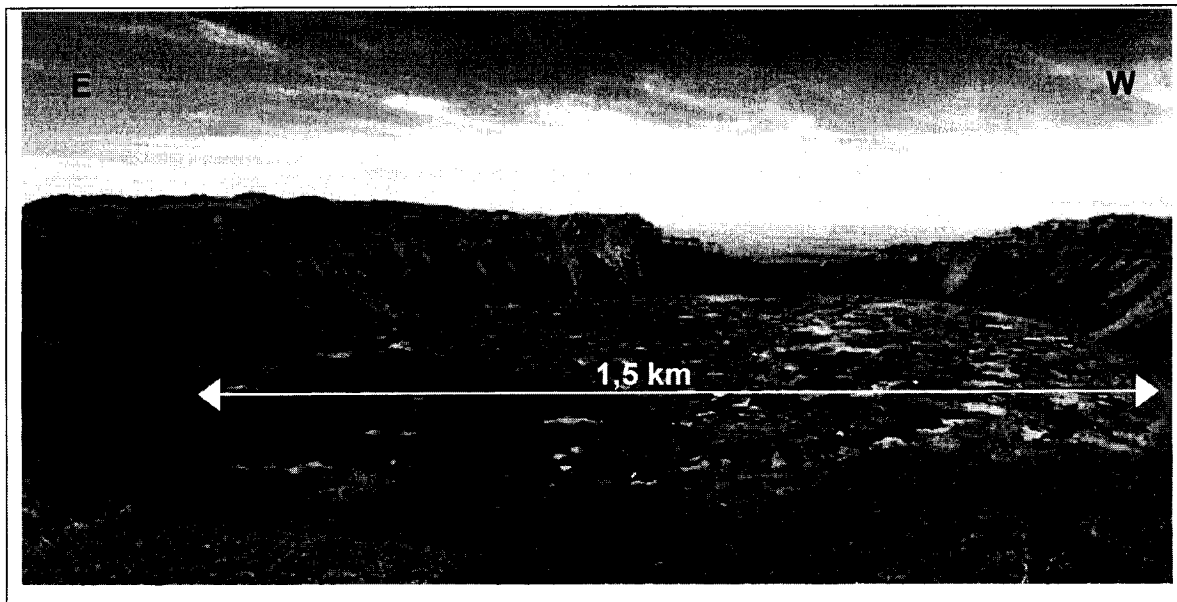


Figura 4. Fotografía panorámica de la caldera de Rano Kau.

Fotografía mirando al sur. Al fondo se aprecia como la erosión ha producido un gran desgaste de la pared sur de la caldera. De la laguna formada en el interior se extrajo una muestra de agua para análisis químico e isotópico (L-2).

4.2. Sistema de drenaje

En general, el sistema de drenaje en la isla está muy poco desarrollado en parte por la edad reciente de los depósitos (Plioceno-Pleistoceno a Holoceno) que no ha permitido su desarrollo, así como por la alta permeabilidad del terreno. Este tiene su máxima expresión en el Volcán Terevaka donde se presenta desde la cima, con un sentido de aporte de forma radial centrífugo, teniendo como destino principal las planicies centrales de la isla donde desaparecen, sin alcanzar el mar. Las quebradas dirigidas hacia el sector sur y sureste, en general no se observan profundas y se encuentran con escaso material detrítico. Hacia el sector norte y noroeste presentan una mayor profundidad. En los volcanes Rano Kau y Poike el sistema de drenaje esta prácticamente ausente o muy poco desarrollado.

CAPÍTULO 3. CLIMA E HIDROGEOLOGÍA

1. INTRODUCCIÓN

El siguiente capítulo presenta una descripción de los elementos climatológicos más importantes de Isla de Pascua, y de cómo ellos influyen en algunos aspectos hídricos como la evapotranspiración y aportación total, entre otros.

En segundo término realiza una descripción de los principales aspectos de la hidrogeología de la isla. Se presenta un inventario con las características principales de los puntos utilizados en el muestreo de aguas, se entregan antecedentes básicos sobre la geometría del acuífero y de algunos parámetros hidráulicos. También se establece la superficie piezométrica de la Isla y algunas de sus características, y finalmente se realiza una caracterización de la recarga, mediante técnicas hidroquímicas e hidrológicas.

2. CLIMA

Uno de los componentes de mayor influencia en el ciclo hidrológico de cualquier zona son los factores climáticos tales como las temperaturas, la humedad ambiental, la radiación solar, etc, pero especialmente las precipitaciones, ya que ellas pueden considerarse como la materia prima del referido ciclo.

La información climatológica procede principalmente del trabajo de Hajek y Espinoza, (1987) y del análisis estadístico de la información obtenida de la base de datos de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA).

2.1. Características Climatológicas Generales.

El clima en Isla de Pascua está fuertemente influenciado por las características de los climas oceánicos ecuatoriales. Este ha sido designado con nombre diversos por diferentes autores como: condiciones climáticas tropicales, clima marítimo templado cálido, semitropical casi sin variaciones, o clima cálido moderadamente húmedo. (Hajek y Espinoza, 1987)

2.1.1. Presión atmosférica

La presión atmosférica es generalmente alta, influenciada por el Anticiclón del Pacífico. La tabla 1 presenta los valores promedios mensuales en mb, donde se puede observar que los valores más altos se producen en los meses de primavera y verano y los mínimos durante el otoño e invierno; el promedio anual alcanza los 1016 mb.

Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
1015	1016	1014	1013	1013	1017	1016	1017	1019	1018	1018	1016	1016

Tabla 1. Promedios mensuales de presión atmosférica (mb) para Isla de Pascua.
El promedio mensual ha sido calculado en base a datos de 1965 a 1971. (Hajek y Espinoza, 1987).

2.1.2. Vientos

El viento se caracteriza por calmas o vientos débiles en las noches, aumentando la fuerza desde la salida del sol a medio día, para disminuir en la tarde. La tabla 2 presenta las velocidades máximas promedio en nudos y la dirección dominante del viento para cada mes.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Dirección	SE	SE	Var.	NW	NW	SE	NW	NW	E	SE	SE	SE
Velocidad	21	19	19	20	25	21	21	26	25	21	22	22

Tabla 2. Velocidad máxima en nudos y dirección preferencial del viento en Isla de Pascua.
Var = variable, sin dominante neta. (Hajek y Espinoza, 1987).

En verano las direcciones más comunes corresponden a las de origen este y sur oeste con alrededor de un 28 % para cada una de ellas y con un 10 % de calmas. En julio el viento sopla preferentemente del NW, W, y SW presentando un 10 % de calma. La mayor velocidad del viento se presenta asociada a la dirección SE, E y

parte del NW. Para el mes de Julio los vientos tienen prácticamente la misma fuerza en todas las direcciones, a excepción de la componente este que es menor.

2.1.3. Insolación

La tabla 3 presenta los totales mensuales de horas de sol en Isla de Pascua. Febrero es el mes que muestra una mayor proporción de horas de sol sobre el total astronómico; el más bajo es octubre, aún cuando hay una serie de otros meses que le son cercanos. El valor anual promedio máximo es de un 49 % de horas de sol sobre el máximo posible.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
Hrs.	197	209	210	269	168	148	151	154	160	170	209	237	2181
%	46	56	54	49	51	48	47	45	45	43	51	54	49

Tabla 3. Totales mensuales (promedios) de horas de sol en Isla de Pascua.

El porcentaje indica la relación entre las horas de sol reales y el máximo astronómico posible. .
(Hajek y Espinoza, 1987).

2.1.4. Humedad relativa

La humedad relativa de Isla de Pascua tiene una marcha anual bastante pareja con un 75 a 81 % en los valores medios mensuales, y un 77 % como promedio anual, reflejando el carácter oceánico allí imperante (Tabla 4). La humedad relativa a las 8 horas con valores de 80 a 85 % promedio es mayor que a las 14 horas con valores que oscilan entre 67 y 75 %.

Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
76	78	78	80	80	81	80	79	78	77	76	77	77

Tabla 4. Humedad relativa (%) mensual promedio para Isla da Pascua.

Valores para el periodo 1965-1971. (Hajek y Espinoza, 1987).

2.1.5. Nubosidad

La tabla 5 presenta la nubosidad de Isla de Pascua, como promedios porcentuales mensuales de los días que presentan 6/8 del cielo cubierto. Las condiciones de mayor nubosidad corresponden al mes de junio con un 70 % de los días, en tanto los valores mínimos se alcanzan en abril y noviembre con un 47 %.

Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
52	50	55	47	55	70	65	58	63	52	47	52

Tabla 5. Distribución porcentual mensual del número de días con nubosidad de 6/8 de cielo cubierto en Isla de Pascua.

El periodo comprende de 1965 a 1971. (Hajek y Espinoza, 1987).

2.2. Precipitaciones

2.2.1. Variación mensual y anual

En la tabla 6 y la figura 5 se exhiben las precipitaciones mensuales en mm y su coeficiente de variación para un período de 40 años de observación.

En general, el promedio anual alcanza los 1.126 mm, con una variabilidad de 31 % sobre el valor medio. Los meses que presentan las mayores precipitaciones corresponden a abril, mayo y junio (mayores a 100 mm) el resto del año las precipitaciones son algo menores y se distribuyen de forma relativamente uniforme, lo que denota el carácter oceánico del clima. Es decir, en general las precipitaciones se concentran en los meses de otoño.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
mm	95	83	86	123	130	103	86	84	83	73	82	98	1.126
%	73	64	61	53	68	85	62	61	68	74	87	83	31

Tabla 6. Precipitaciones mensuales en mm y coeficiente de variación (%) en Isla de Pascua. Resultados obtenidos a partir de 40 años de observación. (Hajek y Espinoza, 1987).

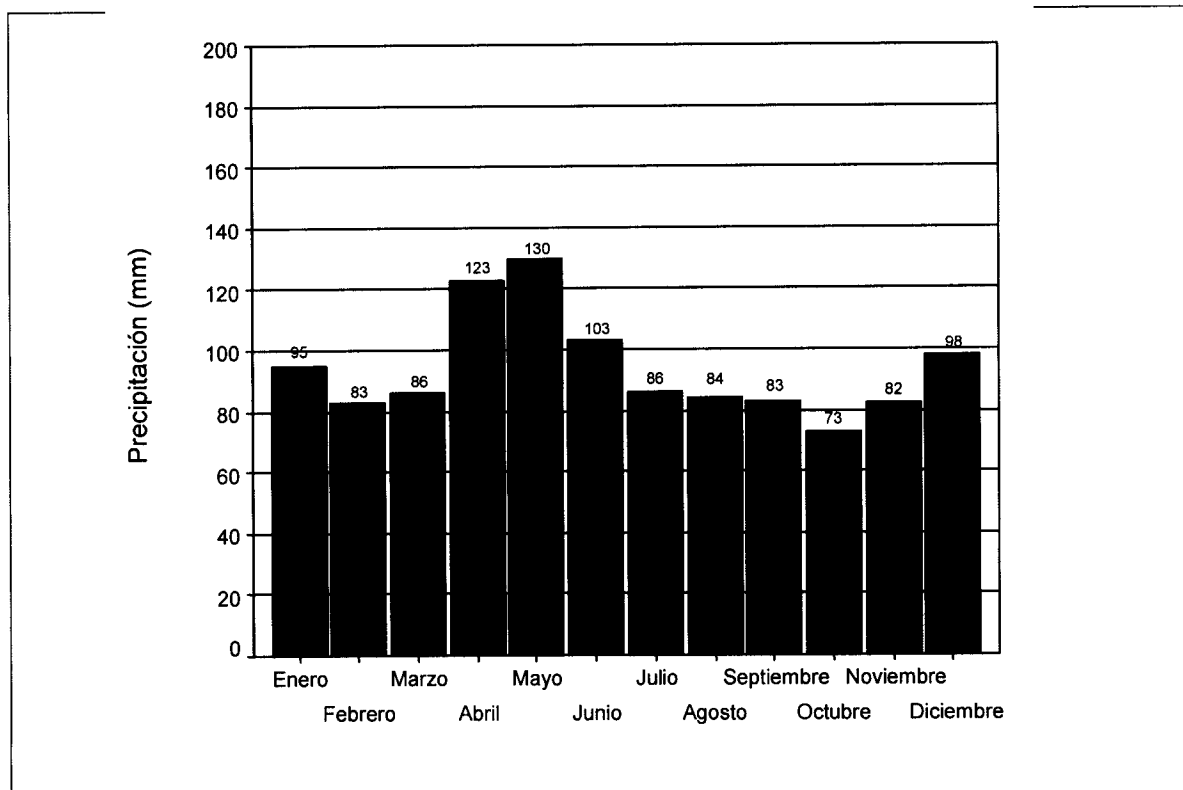


Figura 5. Gráfico de barras de la precipitación media mensual (mm) en Isla de Pascua. Valores obtenidos de 40 años de observación. (Hajek y Espinoza, 1987).

Los meses que presentan mayor variabilidad corresponden a los meses de noviembre y junio con 87 y 85 % respectivamente. Sin embargo, la variabilidad de las precipitaciones mensuales se encumbra por sobre el 50 % en todos los meses.

2.2.2. Intensidad

Las intensidades de las precipitaciones en Isla de Pascua presentan una amplia variación. Las precipitaciones máximas en 24 horas, es decir la lluvia más intensa del mes, presenta un promedio que corresponde aproximadamente a un 36 % del total mensual. En tanto las lluvias de menor intensidad sólo alcanzan el 1 %. Esto según precipitaciones para un período de tiempo de observaciones que comprende 7 años (Hajek y Espinoza, 1987).

La tabla 7 presenta las precipitaciones máximas en 24 horas para cada mes durante un lapso de 7 años en Isla de Pascua. Los valores fluctúan entre 36 mm en abril y 150 mm en diciembre.

Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
53	42	45	36	62	49	53	45	46	52	80	150

Tabla 7. Intensidad máxima de precipitaciones (mm) en 24 horas en Isla de Pascua.
El periodo de tiempo considerado es de 7 años. (Hajek y Espinoza, 1987).

2.2.3. Distribución de la lluvia en la Isla

Se han reportado variaciones pluviométricas al interior de la isla asociadas a efectos topográficos. Así, las precipitaciones de tres estaciones pluviométricas ubicadas en los sectores de Mataveri, Sanatorio y Vaitea arrojaron distintos valores en la cantidad de precipitación. La mayor de ésta se produjo en Vaitea, una intermedia se produjo en Sanatorio y la más baja en Mataveri. También se reportan variaciones en la frecuencia con que ocurren. Las estadísticas para el año 1964 indican que en Vaitea y Sanatorio los intervalos de días sin lluvias se reducen notablemente con respecto a Mataveri. En general, los períodos secos no han excedido a 7 días en Mataveri, 6 días en Sanatorio y 5 días en Vaitea. En consecuencia en Isla de Pascua es posible distinguir dos áreas, una húmeda y otra menos húmeda. La primera estaría al norte de una línea que conecta Vaitea y Sanatorio y la segunda se ubicaría al sur de este límite. (Hajek y Espinoza, 1987).

2.3. Temperaturas

2.3.1. Variación mensual

En la tabla 8 se presenta un resumen de algunos estadísticos para las temperaturas medias mensuales. La figura 6, en tanto, presenta un diagrama de caja donde se han graficado las medias, rango de datos, valores extremos y atípicos para las temperaturas medias mensuales en Isla de Pascua. El período de observaciones es de 22 años. Los datos han sido obtenidos de la base de datos de la AIEA.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Media	23,06	23,57	23,02	21,79	20,10	18,85	18,11	17,77	18,20	19,07	20,75	21,71
Mediana	23,25	23,30	23,10	21,70	20,05	18,90	18,20	18,00	18,15	19,20	20,55	21,75
Desv. típ.	1,31	1,08	0,40	0,49	0,65	0,61	0,75	0,84	0,49	0,76	0,99	0,67
Mínimo	19,60	22,40	22,40	20,80	18,80	17,50	16,30	14,60	17,20	17,70	19,70	20,50
Máximo	25,30	28,00	23,70	22,60	21,50	20,10	19,30	18,60	19,40	21,30	24,10	22,90

Tabla 8. Estadísticos para las temperaturas medias mensuales en Isla de Pascua. Valores obtenidos a partir de 22 años de observaciones.

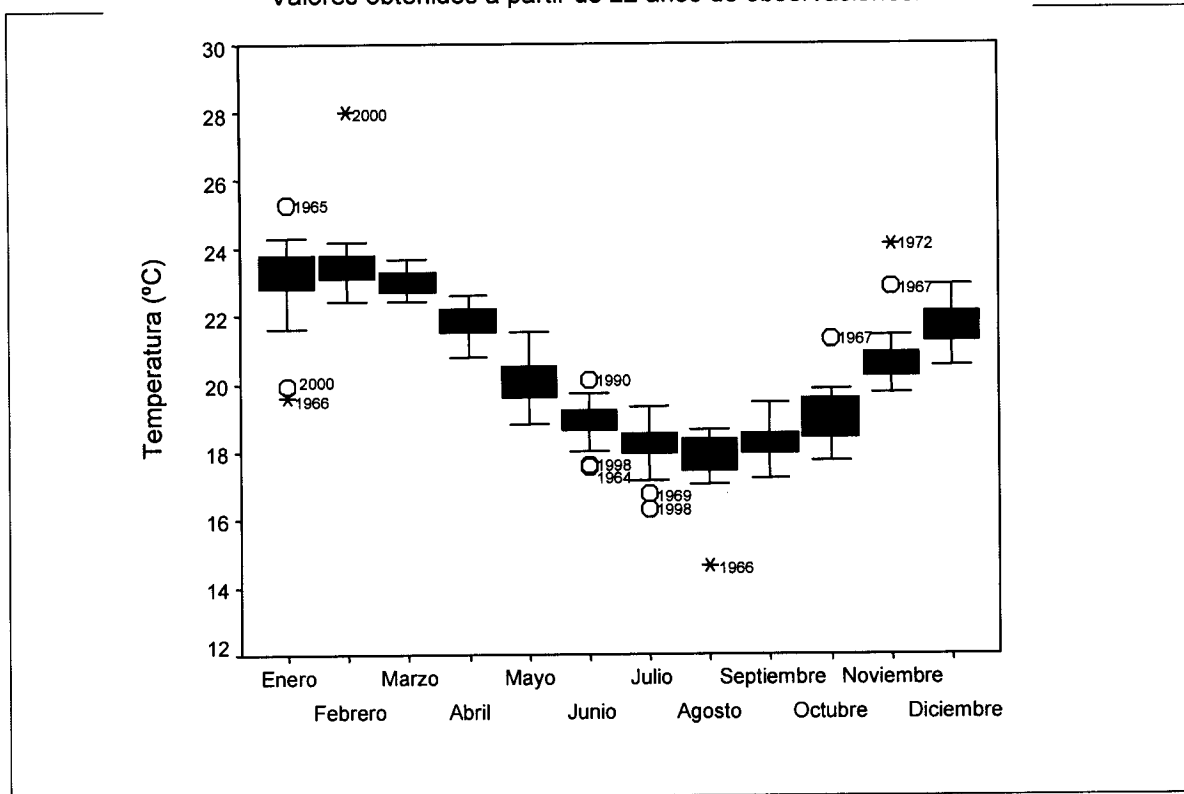


Figura 6. Diagrama de caja para las temperaturas medias mensuales (°C) de Isla de Pascua. Se grafica la mediana, el rango intercuartil, el rango de datos, los valores atípicos con círculos y los valores extremos con asteriscos. Valores obtenidos a partir de 22 años de observaciones.

En general, las temperaturas en Isla de Pascua son calidas y se mantienen relativamente homogéneas a lo largo de todo el año, con una variación de algo más de 5 °C, esto por el carácter oceánico que posee.

Las temperaturas medias mensuales más altas se registran en los meses de verano, especialmente en febrero con 23,5 °C. En este mes además se ha registrado la temperatura extrema más alta que alcanzó los 28 °C. La temperatura comienza a descender suavemente con los meses de otoño hasta llegar el invierno donde se registran las temperaturas más bajas con una media mínima de 17 °C en agosto. Las temperaturas más baja registrada se produjo en agosto de 1996 con 14,6 °C. Con la llegada del otoño comienzan a elevarse suavemente las temperaturas hasta alcanzar los valores máximos de verano.

2.3.2. Distribución y variaciones de la temperatura en la isla

En Isla de Pascua no existe uniformidad térmica en todos los sectores. Existen antecedentes de mediciones realizadas en los sectores de Vaitea y Mataveri que señalan las oscilaciones térmicas en el sector de Vaitea son algo menores que en Mataveri, aún cuando éste se encuentra más cerca el mar, además máximos y mínimos son superiores en Mataveri. Estas oscilaciones térmicas se deberían a que Vaitea está a mayor altura que Mataveri y a que es una zona con una vegetación relativamente mayor.

2.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración es uno de los parámetros climatológicos de mayor importancia ya que su valor tiene incidencia directa en el balance hídrico de una zona.

El valor de la evapotranspiración en Isla de Pascua ha sido obtenido primero, calculándolo mediante el método empírico de Thornthwaite, con la utilización de las características climatológicas detalladas anteriormente, y en segundo término, a partir de los datos de Hajek y Espinoza (1987) quienes utilizaron los criterios de Papadakis en su determinación.

2.4.1. Método empírico de Thornthwaite.

En este método se utiliza la temperatura media mensual t (Tabla 9) obtenida de las temperaturas medias diarias de cada mes. Con estas temperaturas se obtiene el índice de calor mensual i , según la fórmula: $i = (t/5)^{1.514}$

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	I
i	10,12	10,46	10,09	9,29	8,22	7,46	7,02	6,82	7,07	7,59	8,62	9,24	101,99

Tabla 9. Índice de calor mensual (i) e índice de calor anual (I) para Isla de Pascua.

Con el índice de calor anual, que corresponde a la sumatoria de los índices de calor mensual, se obtiene el valor de la constante a , mediante la fórmula:

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,49239$$

Esta constante (cuyo valor calculado es $a = 2,2341$), se utiliza para estimar el valor de la evapotranspiración media en mm/mes (ε) para meses teóricos de 30 días, con doce horas diarias de sol según la fórmula: $\varepsilon = 16 \cdot (10 \cdot t / I)^a$ (tabla 10).

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
ε	99,00	103,96	98,62	87,23	72,84	63,10	57,70	55,31	58,34	64,76	78,20	86,52

Tabla 10. Evapotranspiración potencial media en mm/mes.

Este método considera finalmente los días reales del mes (d) y el número máximo de horas de sol (N) según la latitud (Tabla 11).

El número máximo de horas de sol generalmente está tabulado en tablas según la latitud. Pero en el presente estudio se calculó a partir de la información de la tabla 3, que entrega información más específica para la zona.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
N	13,81	13,33	12,54	11,30	10,63	10,28	10,36	11,04	11,85	12,75	13,66	14,16
d	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

Tabla 11 Número máximo de horas de sol y días del mes.

Este valor fue inferido a partir de los datos de Hajek y Espinoza (1987), presentados en la tabla 3

Con la tabla anterior se calcula el valor de K a partir de la fórmula: $K = \frac{N \cdot d}{12 \cdot 30}$

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
K	1,19	1,04	1,08	0,94	0,92	0,86	0,89	0,95	0,99	1,10	1,14	1,22

Tabla 12. Valor de la constante K para cada mes.

Posteriormente, se calcula la evapotranspiración potencial (*ETP*) en mm/mes según la expresión: $ETP = K \cdot \varepsilon$

La tabla 13 presenta los valores de la evapotranspiración potencial tanto mensual como diaria, calculada por el método de Thornthwaite.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
ETP mm/mes	117,73	107,78	106,53	82,14	66,65	54,05	51,50	52,58	57,62	71,12	89,02	105,48	962.2
ETP mm/día	3,80	3,85	3,44	2,74	2,15	1,80	1,66	1,70	1,92	2,29	2,97	3,40	-

Tabla 13. Evapotranspiración potencial en mm/mes y mm/día (Método de Thornthwaite).

La tabla 14 presenta los valores de la evapotranspiración en mm/mes obtenidos por Hajek y Espinoza (1987). Dichos autores ocuparon los criterios de Papadakis que utiliza las temperaturas máximas y mínimas mensuales, transformadas en sus respectivos valores de presión de saturación de vapor de agua (expresada en mb).

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
ETP mm/mes	87	88	86	74	64	58	58	56	60	65	71	78	845

Tabla 14. Evapotranspiración potencial en mm/mes según Hajek y Espinoza (1987).

Como se puede ver en las tablas 13 y 14, los valores obtenidos para la evapotranspiración por el método de Thornthwaite presentan una mayor diferencia entre los meses de invierno y verano, que los valores obtenidos por Hajek y Espinoza que son más uniformes. En verano, la diferencia entre los dos métodos llega a casi 20 mm más de evapotranspiración en el método de Thornthwaite. Sin embargo, para los meses de invierno, la diferencia es mucho menor, pero ahora, la evapotranspiración mayor la postula el método de utilizado por Hajek y Espinoza (1987). Anualmente la diferencia llega a casi 120 mm más en el método de Thornthwaite. Estas variaciones están controladas por las variables climatológicas que considera cada método para realizar los cálculos.

3. HIDROGEOLOGÍA

3.1. Inventario de puntos de aguas

El recurso hídrico en Isla de Pascua ha tenido gran importancia desde tiempos primitivos, donde los antiguos habitantes de la isla, procedían a obtenerlo de las lluvias locales mediante "tazones" o receptáculos escavados en las rocas

volcánicas y que denominaban como “tahetas”, muchos de los cuales aún se conservan en varios puntos de la Isla. (Hauser, 1986). Del mismo modo, existen numerosas manifestaciones de aguas como pozos excavados y/o vertientes a los que los lugareños denominaban con el prefijo “Vai”, que significa agua, al que agregaban otro término de referencia como por ejemplo Vaitea o Vaihu.

La figura 7 presenta la distribución y el código de muestra para los puntos de agua en los que se tomaron muestras para los análisis químicos e isotópicos. Estas muestras provienen de distintas fuentes tales como sondeos, tubos volcánicos, pozos, lagunas y agua de lluvia. En general, estas muestras presentan una distribución que abarca casi la totalidad de la isla, con la excepción del extremo norte del Volcán Terevaka y del extremo este del Volcán Poike.

A continuación se presenta una descripción de los distintos puntos de agua reconocidos en Isla de Pascua. Cabe señalar, que muchos de estos sitios en la actualidad se encuentran deshabilitados o destruido por lo que la obtención de muestras no se pudo realizar. Sin embargo, algunos de ellos son mencionados ya que presentan información que permite la comparación temporal.

3.1.1. Sondeos

Durante los años 1963 y 1967, el Departamento de Recursos Hidráulicos de CORFO, construyó un total de 26 sondeos con profundidades de entre 7 y 102 metros. De éstos, en la actualidad, sólo se encuentran en buen estado 10, y de estos últimos, sólo cuatro son usados para abastecer las demandas de agua de la población. La distribución de estos sondeos es variada, concentrándose principalmente en las cercanías de Hanga Roa (Sondeos 7, 21, 25, 26 y 27) y en sectores dedicados a la agricultura y crianza de animales (Sondeos 13, 14, 19, 23 y 24). A continuación se presenta una descripción de cada sondeo y sus características.

Sondeo 7: Ubicado al suroeste de Hanga Roa, es el sondeo utilizado para el abastecimiento de agua potable más cercano a la costa. Presenta una bomba de agua que no permite el acceso a instrumental. La muestra se extrajo tras 15 minutos de funcionamiento.

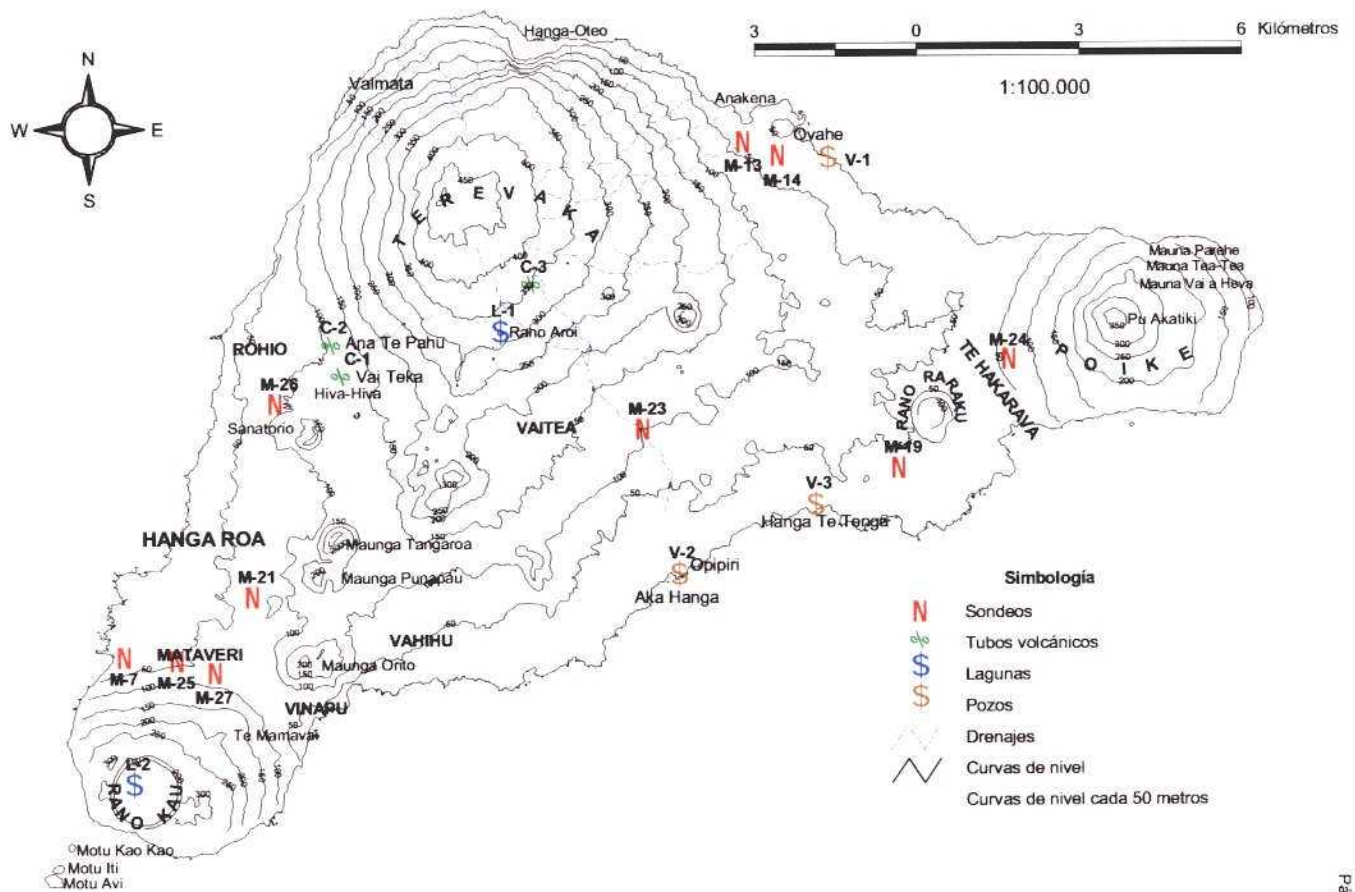


Figura 7. Mapa de ubicación de puntos de agua
Se indica además el código de la muestra obtenida

Sondeo 13: Localizado en el norte de la Isla, en las cercanías de la playa de Anakena. En el sector abunda la vegetación como matorrales y pastos. Este sondeo se encuentra abandonado, sin protección y sin bomba. La muestra se recolecto con tomamuestra.

Sondeo 14: Al sureste del Pozo 13, en el sector conocido como Ovahe, en una llanura con abundante vegetación y matorrales. Al igual que el sondeo anterior, se encuentra abandonado sin bomba y sin protección. La muestra se obtuvo con tomamuestra.

Sondeo 19: Localizado al suroeste del volcán Rano Raraku en una planicie con pastos y arbustos. Se encuentra abandonado, no presenta bomba ni protección. La muestra se obtuvo con tomamuestra

Sondeo 21: Ubicado al este de Hanga Roa, no presenta acceso a instrumental, la muestra se extrajo tras 10 minutos de funcionamiento de su bomba. Es utilizado en el abastecimiento de agua potable.

Sondeo 23: Corresponde al sondeo de mayor altura topográfica, ubicado casi en el centro de la isla, en el sector de Vaitea. Presenta una bomba instalada que no permite acceso a instrumental. La muestra fue obtenida después de 20 minutos de extracción de agua.

Sondeo 24: Al costado oeste del volcán Poike en un sector de crianza de animales. La muestra fue obtenida tras 20 minutos de funcionamiento de su bomba, en un estanque acumulador que dista unos 50 metros del sondeo.

Sondeo 25: Emplazado en los alrededores del aeropuerto Mataveri, no presenta acceso a instrumental, la muestra se extrajo tras 4 horas de funcionamiento de su bomba. Es utilizado en la extracción de agua potable.

Sondeo 26: Localizado al norte de Hanga Roa, en el sector denominado Sanatorio (conocido también como Leprosario). Se encuentra rodeado de abundante vegetación, árboles frutales y eucaliptos. No presenta acceso a instrumental. La muestra fue extraída transcurrido 15 minutos del encendido de su bomba.

Sondeo 27: Ubicado al este del sondeo 25. La muestra se obtuvo tras 15 minutos de trabajo de su bomba. Es utilizado en la extracción de agua potable.

La tabla 15 presenta un resumen de las principales características de los sondeos.

Nº	Nombre predio	Ubicación en coordenadas UTM		Cota m.s.n.m	Profundidad en metros	Profundidad N. E. en metros	Fecha construcción
7	Mataveri Otai	6994350N	654350E	30,7	35	30,2*	Ene/1965
13	Anakena	7003900N	665875E	21,3	26	19,75	Feb/1966
14	Ovahe	7003638N	666525E	14,91	17	13,34	Mar/1966
19	Rano Raraku	6997825N	668725E	33,18	32.4	31,35	Nov/1960
21	Tera Ai	6995475N	656725E	61	65	60.3*	Nov/1967
24	Poike	6999834N	670774E	42,57	45	41,6*	May/1967
23	Vaitea	6998550N	663975E	95,95	102	94,7*	Oct/1967
25	Mataveri	6994275N	655325E	43,09	48	42,3*	May/1967
26	Sanatorio	6999048N	657160E	64,55	68	62,2*	-
27	Mataveri 2	6994050N	656025E	65	-	-	-

Tabla 15. Características generales de los sondeos en Isla de Pascua

N. E. = Nivel estático; (*) Corresponde al nivel estático medido en la fecha de construcción.

Las muestras recolectadas en los sondeos, corresponden a la M-7, M-13, M-14, M-19, M-21, M-23, M-24, M-25, M-26 y M-27. El número de la muestra es coincidente con el número del sondeo del que se obtuvo.

3.1.2. Pozos

A lo largo de todo el sector costero de la isla, especialmente en el sur y norte, se han documentado alrededor de 15 pozos o norias. Estas se encuentran próximas a la costa a pocos metros sobre el nivel del mar, presentan profundidades cercanas a los 3 y 6 metros y presentan diversos diámetros que varían de 1 a 3 metros. Su nivel estático, prácticamente coincide con el nivel del mar. Se utilizan principalmente en el suministro de agua para animales. Presentan un origen diverso: algunos de ellos se presume que fueron construidos por los antiguos indígenas que habitaron la isla, en tanto otras fueron construidas por empresas dedicadas a la crianza de ovejas en el siglo XIX.

De estos pozos se recolectaron 3 muestras: V-1, V-2 y V-3. La muestra V-1 corresponde a un pozo ubicado en la rivera norte de la isla, en el sector denominado Ovahe, aproximadamente 1 km al noreste del sondeo 14. La muestra

V-2 fue obtenida del pozo denominado Aka Hanga ubicado en el sector sur, en la prolongación de la quebrada que pasa por el fundo Vaitea, próximo al sitio denominado Opipiri. La muestra V-3, se recolectó del pozo conocido como Hanga Te Tenga ubicado en la costa sur, al este de donde se obtuvo la muestra V-2.

3.1.3. Lagunas

Las lagunas presentes en la isla se encuentran ubicadas en estructuras tipo calderas volcánicas. La principal y de mayor envergadura es la ubicada en la caldera del Volcán Rano Kau, al sur de Hanga Roa. Posee un diámetro de 1,25 km, su superficie está a 120 m. s. n. m. y en su interior existe abundante vegetación. Es además, uno de los puntos de atractivo turístico importantes de la Isla. De ella se obtuvo la muestra L-2. Una segunda laguna se encuentra en el cráter conocido como Rano Aroi ubicado a 310 m. s. n. m. casi en el centro de la isla, camino a la cima del Volcán Terevaka, al norte del fundo Vaitea. De esta laguna, que posee aproximadamente unos 200 metros de diámetro y está rodeada por abundante pastizales, junquillos y árboles de eucaliptos, se extrajo la muestra L-1. Una tercera laguna se encuentra en el cráter del volcán Rano Raraku pero de ella no se pudieron obtener muestras para análisis.

3.1.4. Tubos volcánicos

Los tubos volcánicos son estructuras muy características de lavas basálticas y hawaiitas en Isla de Pascua. Se forman normalmente en terrenos con poca pendiente, donde el torrente de lava suele enfriarse rápidamente en superficie formando una costra rígida, mientras que en su interior, continúa escurriendo lava muy fluida, vaciándose hacia el exterior de la isla, generando de esta forma un tubo o túnel, cuyo diámetro varía entre 1 y 5 metros y, en algunos lugares, varios cientos de metros de longitud. Cuando parte del techo colapsa se genera una caverna y se puede tener acceso al interior de ellas. El agua que es infiltrada desde superficie, llega al interior de los tubos y producen una gran humedad interior tanto en las paredes como en el techo, del que constantemente caen gotas, y que forman charcas y pequeños cursos de agua, que son bien aprovechados por la vegetación.

Las muestras C-1, C-2 y C-3, corresponden a aguas recolectadas del interior de estas estructuras. Las muestras C-1 y C-2 se recolectaron de cavernas ubicadas al oeste del volcán Terevaka, en los sectores conocidos como Vai Teka y Ana Te Pahu respectivamente, al noreste del Sanatorio (sondeo 26), en el sector de Roiho. La muestra C-3, en tanto, se tomó de un tubo volcánico ubicado en el centro de la isla, aproximadamente 1km al noreste de la laguna Rano Aroi.

3.1.5. Aguas lluvia

Las muestras de aguas lluvia, que corresponden a las precipitaciones mensuales acumuladas, son recolectadas en dos puntos específicos de la isla, uno ubicado en Hanga Roa, en el sector oeste de la Isla; y otro, ubicado en el fundo Vaitea, casi en pleno centro de la isla, al norte del sondeo 23.

3.1.6. Agua de mar

Con el objetivo de tener análisis que representasen a cada parte del ciclo hidrológico, se consideró necesaria la adquisición de una muestra de agua de mar. Esta fue recolectada en el sector sur de la isla, en el sector costero cercano a los pozos de las muestras V-2 y V-3.

3.1.7. Otras manifestaciones de aguas

Un aspecto importante al momento de considerar los recursos hídricos de Isla de Pascua es que no existen cauces de aguas permanentes o semipermanentes que alcancen la costa, a pesar de las elevadas y constantes precipitaciones reinantes. No obstante, a lo largo de toda la línea de costa de la Isla, se han reportado algunas manifestaciones de aguas como vertientes, que representan la descarga natural del acuífero al mar. Éstas se encuentran generalmente en la zona subtidal a intertidal, quedando expuestas cuando la marea está baja. No se extrajeron de este tipo de muestras para análisis.

3.2. Características hidrogeológicas de las formaciones volcánicas

Las características hidrogeológicas de las formaciones volcánicas dependen de una gran cantidad de factores, como el tipo de volcanismo, la distancia desde el centro de emisión, efectos tectónicos, efectos producidos por la edad de los

depósitos y efectos de capas o materiales interestratificados de origen no volcánicos (Custodio, 1986), que de una u otra forma, intervienen o alteran la circulación de las aguas subterráneas y la geometría de los acuíferos. A continuación se discuten algunos de estos efectos y su incidencia sobre las unidades volcánicas.

En Isla de Pascua el volcanismo predominante es del tipo básico, existiendo también, en una proporción mucho menor, estructuras de volcanismo intermedio a ácido. Una de las características del volcanismo básico es que sus coladas presentan una baja viscosidad y alta fluidez, depositándose coladas de poco espesor unas sobre otras y generando pendientes relativamente bajas. Su porosidad depende de factores como el contenido de gas y de las condiciones de efusión, pudiendo presentarse con una gran cantidad de vesículas, como la mayoría de las muestras recolectadas en Pascua, hasta coherentes, en este último caso la permeabilidad estaría más bien relacionada a las fracturas producidas por la contracción térmica al solidificar (Custodio, 1986).

Como ya se describió en el capítulo 2, los edificios volcánicos de Isla de Pascua fueron controlados en parte por factores tectónicos. Estos factores pueden incidir además en la permeabilidad, disminuyéndola por efectos de compactación de las rocas (disminución de la porosidad), o aumentándola al producir sistemas de fracturas que facilitan la circulación de las aguas (Custodio, 1986). Esta última situación es la que más se aproxima a las características de la Isla de Pascua.

Otro factor que afecta el comportamiento hidráulico de un sector, es la presencia de intrusivos subvolcánicos como diques, que pueden constituir barreras impermeables o poco permeables al flujo de agua subterránea, o por el contrario, facilitar el movimiento del agua paralela a los mismos (Custodio, 1986). Sin embargo, en la isla, durante la campaña de terreno, no se pudieron constatar afloramientos de este tipo de estructuras, no descartándolas en niveles mucho más profundos.

En zonas próximas a los centros de emisión volcánicos pueden encontrarse productos piroclásticos de poca permeabilidad (principalmente tobas litificadas y depósitos de cenizas), que quedan interestratificados con coladas de lava más

permeables y que pueden actuar a modo de barreras casi horizontales (Custodio y Llamas, 1986).

El material volcánico está compuesto de vidrio y minerales que son inestables bajo las condiciones que predominan en la superficie terrestre, y pueden sufrir todo tipo de alteraciones, tales como relleno de vesículas o fracturas, precipitación y/o alteración de minerales, etc. Todos estos procesos que generalmente disminuyen la permeabilidad, dependen en cierta medida de la edad de los depósitos. Así, considerando que Isla de Pascua es relativamente joven, sus materiales no han sufrido estos efectos considerablemente, salvo en superficie donde la formación del suelo, por descomposición de los materiales, ha formado niveles arcillosos que en general presentan potencias menores a un metro. Además, se ha podido constatar, en algunos acantilados al oeste de Terevaka, la existencia de paleosuelos bajo decenas y centenares de metros de coladas posteriores. Estos niveles, que marcan los periodos de inactividad de volcanismo en la isla, conforman verdaderas barreras horizontales que separan hidráulicamente las coladas superiores de las inferiores.

3.2.1. Parámetros hidráulicos

La porosidad de las rocas volcánicas es comúnmente alta, incluso en lavas compactas, sin embargo, la porosidad eficaz (cantidad de poros o vesículas que están conectadas) es mucho menor. En el caso de los basaltos ésta puede variar de un 5% a 1% si son masivos y sin vesículas; a valores de hasta 30% se presentan figurados y con vesículas. Y en el caso de los piroclastos de 25% a 50% o incluso valores tan altos como 80% en escorias. (Custodio, 1986).

Los valores de la permeabilidad, en tanto, puede variar significativamente de 1.000 m/d en escorias frescas a 0,001 m/d en ignimbritas. Además, esta puede variar considerablemente según la dirección que se considere debido a la heterogeneidad del medio volcánico. En general las rocas volcánicas de composición basáltica presentan mayor permeabilidad que las rocas volcánicas más ácidas. En cuanto a la edad, las lavas más modernas son más permeables que las más antiguas que pueden haber sufrido distintos procesos (Custodio, 1986)

3.2.2. Geometría del acuífero

La geometría del acuífero queda controlada principalmente por los contrastes de permeabilidad entre los distintos materiales volcánicos, así como por el manto de las coladas de lava y los depósitos piroclásticos. También ejercen un control importante la disposición espacial de las unidades subvolcánicas asociadas al volcanismo.

Durante la construcción de las captaciones de agua subterráneas en Isla de Pascua por parte de CORFO en la década de los 60, no se realizó un registro ni una descripción detallada de las características litológicas del subsuelo de los distintos sondeos. Es por eso que la información disponible para establecer las características geométricas del acuífero queda remitida a los antecedentes geológicos recopilados y sólo se establecen algunas generalidades basadas en las características hidráulicas mencionadas anteriormente.

Isla de Pascua está dividida naturalmente en los tres edificios volcánicos que la conforman. Sin embargo, las diferencias geológicas, de los tres volcanes y de sus zonas de interacción no presentan diferencias significativas desde el punto de vista hidrogeológico. No obstante, es posible diferenciar áreas y zonas dentro de la isla que pueden presentar variaciones en sus características acuíferas, como los domos traquíticos de Poike o las riolitas presentes al noreste de Rano Kau, pero corresponden a características puntuales que no son lo suficientemente amplias para diferenciarlas como distintos acuíferos. Otro aspecto es que si se consideran las dimensiones del volcán Terevaka frente a los otros dos volcanes, estos últimos sólo forman una pequeña fracción de todo el acuífero.

En resumen Isla de Pascua se puede considerar como un gran acuífero basáltico cuya permeabilidad es producida por la porosidad y fisuración propia del tipo de roca que la compone, y cuya recarga es producida por la infiltración del agua de lluvia y que presenta descargas repartidas más o menos uniformemente a lo largo de toda su línea de costa.

3.3. Superficies piezométricas

El estudio de la superficie piezométrica permite obtener datos básicos sobre el movimiento y comportamiento del agua subterránea, además es fundamental para

caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero y para evaluar su evolución en el tiempo.

La superficie piezométrica de la figura 8 se ha construido considerando a Isla de Pascua como un acuífero único, donde las permeabilidades son relativamente homogéneas.

Las curvas de isopieza se construyeron a partir de los datos de la profundidad del nivel estático permanente de los sondeos, registrados en el momento de su construcción (Tabla 15). Cabe mencionar que no se dispone de la información que señale la metodología utilizada para medir los niveles estáticos cuando fueron construidos. Por lo tanto, se asume que se utilizó la regla general donde se da cota al borde del tubo de la entubación final, y todas las mediciones posteriores se realizan en referencia a este punto.

Las curvas se han trazado preferentemente en aquellos sectores donde se posee mayor información, en otras zonas sólo se presentan como inferidas, y en sectores como el extremo norte de la isla son inexistentes. Lo anterior debido a que la distribución y densidad de datos (12 puntos para una superficie de 160 Km²), no permite la construcción de una superficie más detallada. A lo anterior se agrega el grado de error asociado a la determinación de la cota de las captaciones, ya que fue determinada a partir del mapa topográfico de la Isla a escala 1:25.000 y donde la equidistancia de las curvas de nivel es de 10 m. A pesar de los alcances mencionados, se puede establecer una primera aproximación a la superficie piezométrica, que permite disponer de una visión de conjunto para establecer las direcciones de flujo preferenciales y las profundidades a las que se podría encontrar el agua subterránea en determinados sectores.

De acuerdo a la tabla 15 se puede apreciar que en prácticamente todos los sondeos el nivel estático se encuentra a profundidades comprendidas entre los 13 y 95 metros, que corresponden a valores ligeramente inferiores a la cota topográfica en la que se encuentra el sondeo. Esto indica que el nivel freático se encuentra muy próximo al nivel del mar, y que posee un valor relativamente homogéneo en todos los sondeos. Esta característica concuerda con una gran permeabilidad de las rocas.

En general la distribución de las curvas de la superficie piezométrica sigue aproximadamente la forma de la topografía del terreno. Sin embargo, existen diferencias de un punto de la isla a otro, presentando distintos gradientes, que en cierta medida podrían indicar variaciones de permeabilidad del terreno.

Los valores del nivel estático más altos se presentan en el sondeo 26 (ubicado a 64,5 m.s.n.m.), con un valor de 2,35 m. Mientras que el valor mínimo se ubica a lo largo de todo el borde costero, donde prácticamente coincide con el nivel del mar, y es posible observarlo en algunos pozos. El punto más alto de la superficie piezométrica estaría hacia el interior de la isla, bajo la cumbre del Terevaka. Sin embargo no existen sondeos a cotas superiores para confirmarlo.

A pesar que en toda la isla se presentan de manera suave, las pendientes más pronunciadas, de esta superficie, se observan principalmente en el sector del sondeo 26 (con un flujo al oeste), le siguen el sector del sondeo 19 y en el norte los sondeos 13 y 14 (flujo al norte). Por el contrario, la pendiente más suave se encuentra en el sector de Vaitea, donde pese a su cercanía con el centro de la isla, y estar más alejado de la línea de costa, se registra un nivel piezométrico de tan solo 1,25 m el sondeo 23. También en todo el sector de Hanga Roa es posible observar una muy baja pendiente, mostrando niveles piezométricos que no superan un metro, manteniéndose prácticamente constantes.

Las líneas de flujo de las aguas subterráneas siguen una dirección que va desde el centro de los edificios volcánicos principales hacia la costa. De esta forma en los sectores en que se unen los volcanes quedan establecidas las vaguadas de aguas subterráneas. Y de igual forma, las líneas divisorias de aguas subterráneas quedarían establecidas por dos líneas que unen los puntos de mayor cota de los tres volcanes principales (figura 8), y que determinan tres direcciones de flujos preferenciales: Una en dirección al oeste, otra al sureste y la última al norte.

Cabe señalar que para la elaboración de la superficie piezométrica no fueron considerados los niveles de superficie que presentan las lagunas. Esto debido a que la formación de éstas responde a la acumulación de sedimentos y materia orgánica en el fondo de la caldera que forman una capa impermeable, y que permite la acumulación de agua. Además, las características químicas de estos

embalses naturales, como se vera más adelante, las desvinculan totalmente del resto de las aguas subterráneas, conformando niveles saturados más bien a nivel local. En el caso de la laguna Rano Aroi, se ubica prácticamente en el centro de la isla y su nivel se presenta a más de 300 m.s.n.m.; y en el caso de la laguna Rano Kau su nivel dentro de la gran caldera es de aproximadamente 110 m.s.n.m.

3.4. Caracterización de la recarga

3.4.1. Estimación de la infiltración por balance de cloruros

La estimación de la infiltración o recarga por balance de cloruros se apoya en la dificultad con que este ion es modificado, por lo que su comportamiento se puede considerar como la de un trazador ideal (Custodio y Llamas, 1986). El método consiste en la comparación del aporte de cloruro en la lluvia con respecto al contenido de cloruro que transporta la recarga al nivel freático, considerando además factores como la evaporación, la escorrentía superficial y el aporte o retención de cloruros por parte de la vegetación y otros agentes artificiales. Considerando lo anterior la expresión para el balance de cloruros es según Custodio y Llamas (1986):

$$\frac{I}{1000} C_I = \frac{(P - E_s)}{1000} C_p + A_s - A_v + A'v$$

Donde:

I = infiltración o recarga (mm/año)

P = precipitación media anual (mm/año)

E_s = escorrentía superficial media (mm/año)

C_p = contenido medio de cloruros en el agua de lluvia (mg/l)

C_I = contenido medio de cloruros en el agua de recarga (mg/l)

A_s = aporte de cloruros tomados del suelo o aportados artificialmente ($g/m^2/año$)

A_v = retención de cloruros tomados por la vegetación ($g/m^2/año$)

$A'v$ = devolución de cloruros del suelo al morir la vegetación ($g/m^2/año$)

La expresión anterior puede ser simplificada si se considera que los cloruros tomados en el suelo o aportados de forma artificial son nulos ($A_s=0$), como es frecuente; que la retención de cloruros por la vegetación es igual a la liberación de los mismos al morir dicha vegetación ($A_v = A'v$); y que la escorrentía superficial es

muy pequeña o nula por la alta permeabilidad del terreno ($E_s=0$), como el caso de Isla de Pascua. De esta forma se reduce a:

$$I = \frac{P \cdot C_p}{C_i}$$

Con esta fórmula se calculó la infiltración para cada sondeo considerando el sector en que se encuentra ubicado: Hanga Roa o Vaitea. Los contenidos de cloruros en las precipitaciones utilizados corresponden al promedio de los meses en que se recolectaron muestras y el valor de la precipitación anual se tomó de la tabla 6. Cabe señalar que los contenidos de cloruros en las precipitaciones se muestran relativamente homogéneos durante el transcurso del año y la diferencia entre los dos sectores es mínima. La tabla 16 presenta los resultados obtenidos.

	Muestra	C_i (mg/l)	P (mm)	C_p (mg/l)	I (mm)	I %
Sector Hanga Roa	C-1	13,78	1126	8,88	726	64,4
	C-2	14,17	1126	8,88	706	62,7
	M-26	383,92	1126	8,88	26	2,31
	M-21	539,45	1126	8,88	19	1,65
	M-27	129,22	1126	8,88	77	6,67
	M-25	180,92	1126	8,88	55	4,91
	M-7	290,74	1126	8,88	34	3,05
Sector Vaitea	C-3	11,31	1126	8,37	833	74,01
	M-23	38,73	1126	8,37	243	21,61
	M-24	351,09	1126	8,37	27	2,38
	M-19	888,23	1126	8,37	11	0,94
	M-13	817,45	1126	8,37	12	1,02
	M-14	1015,51	1126	8,37	9	0,82
	V-1	1875,34	1126	8,37	5	0,45
	V-2	549,29	1126	8,37	17	1,52
	V-3	1233,35	1126	8,37	8	0,68

Tabla 16. Valores de la Infiltración según el balance de cloruros para cada muestra.

C_i = Contenido de cloruros en la infiltración; P = Precipitación; C_p = Contenido de cloruros en la precipitación; I = Infiltración o recarga; I % = Porcentaje de la infiltración respecto de la precipitación.

Es claro que a medida que aumenta el contenido de cloruros de la muestra el valor de la infiltración disminuye. Es por esto que se ha considerado como agua representativa de la recarga aquella localizada en la parte superior del acuífero y que presenta una menor mineralización, como las muestras recolectadas en los tubos volcánicos. Estas indican, de acuerdo al balance de cloruros, que la infiltración que se produce varía entre un 62 a un 64% (706 a 726 mm) en el sector de Hanga Roa y un 74 % (833 mm) en el sector de Vaitea.

El resto de las muestras, por sus altos contenidos de cloruros, arrojaron valores de recarga que en promedio no superan el 5 % (poco más de 55 mm). Sin embargo, estas muestras no son representativas, ya que en muchas de ellas se encuentran a una cota topográfica muy baja y lejos de la zona de infiltración. Además, como se vera en el capítulo 4, algunas de ellas presentan evidencias de mezclas y/o contaminaron con agua de mar. La única muestra que escapa a las descritas anteriormente es la correspondiente al sondeo 23, ubicado casi en el centro de la isla, pero que de todas maneras entrega un valor de recarga significativamente menor (21 %, 243 mm) al de las muestras de los tubos volcánicos.

CAPÍTULO 4. HIDROGEOQUÍMICA

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta la caracterización hidroquímica de las aguas de Isla de Pascua, basándose principalmente en los datos obtenidos en la presente investigación y complementada a partir de la información recopilada de antecedentes inéditos realizados con anterioridad.

Esta caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas se estudia desde el punto de vista de las relaciones entre las distintas variables fisicoquímicas, su distribución espacial y la evolución hidrogeoquímica temporal. El estudio de los iones principales se realiza con el apoyo de diagramas de Schoeller-Berkaloff, diagramas de Piper y Stiff, así como también, mediante el cálculo de algunas relaciones iónicas de interés ($r_{Cl/Br}$, $r_{Mg/rCl}$, $r_{SO4/rCl}$, $r_{Na/rCl}$, $r_{Mg/rCa}$) y la elaboración y análisis de mapas isoquímicos.

Además, basándose en la supuesta inalterabilidad del ion cloruro, se ha calculado la mezcla teórica de aguas que podría existir entre algunas muestras, con el objetivo de determinar y/o cuantificar posibles intrusiones marinas.

2. ASPECTOS HIDROQUÍMICOS DE LAS FORMACIONES VOLCÁNICAS.

Como en todo tipo de formaciones geológicas, la composición química del agua subterránea en formaciones volcánicas dependerá de factores como la

composición del agua de lluvia, clima, tipo de roca, agresividad del agua, tiempo de contacto, temperatura, presión, etc.

Los minerales presentes en las formaciones volcánicas, que en su mayoría son silicatos, son insolubles. Sin embargo, éstos son fácilmente alterables (hidrolizables) si existen hidrogeniones presentes y el medio es capaz de mantener el pH constante, lo cual es posible con la presencia de CO_2 disuelto en cantidad suficiente. Estos procesos afectan con mayor eficacia a las rocas más básica como basaltos, que aportarán con una mayor cantidad de iones, que las rocas ácidas como riolitas. En general, la composición del agua subterránea estará relacionada con la composición de la roca, aunque no siempre coincida con ella (Custodio, 1986).

En climas húmedos a semi-húmedos la composición aniónica predominante es $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, producido por el CO_2 disuelto en la lluvia o en el suelo. En climas áridos en cambio, los aniones Cl^- y/o el SO_4^{2-} son los más abundantes, acompañados por sus correspondientes cationes: Na^+ con Cl^- y Ca^{2+} con SO_4 . En el caso de islas la salinidad climática puede ser generada principalmente por el viento que traslada el aerosol marino al interior de ella, aumentando la concentración de algunos iones como el Cl^- (Custodio, 1986).

3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE ISLA DE PASCUA

3.1. Datos disponibles y resultados

Existen dos fuentes principales de datos químicos para las aguas de Isla de Pascua.

Primero, se disponen de una serie de análisis químicos efectuados entre 1979 y 1992 recopilados de informes inéditos realizados por empresas consultoras. Cabe señalar que gran parte de esta información sólo es utilizada como referencia ya que en algunos casos es imprecisa y no se señalan metodologías utilizadas ni mayores antecedentes.

En segundo término, se dispone de 36 análisis de aguas obtenidos a partir de las muestras recolectadas en la campaña de terreno de mayo de 2002 y que corresponden a las muestras mencionadas en el inventario de puntos de agua del capítulo III. Estos análisis fueron realizados en los laboratorios del Instituto Minero

y Geológico de España en Madrid. Los distintos parámetros determinados y los procedimientos técnicos utilizados en su obtención están resumidos en la tabla 17.

Parámetro	Procedimiento técnico
Conductividad	Electrometría.
pH	Electrometría.
Potasio	Espectrometría de emisión atómica.
Sodio	Espectrometría de emisión atómica.
Amonio	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Bicarbonatos	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Calcio	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Carbonatos	Volumetría
Cloruros	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Fluoruros	Electrometría. Método con electrodos específicos.
Fosfatos	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Magnesio	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Nitratos	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Nitritos	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Sílice	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Sulfatos	Espectrofotometría de absorción. Autoanalizador de flujo continuo.
Bromuros	Cromatografía iónica.
Cloruros*	Cromatografía iónica.

Tabla 17. Procedimientos técnicos realizados para los distintos parámetros determinados en los análisis químicos.

(*) La concentración de cloruros se ha determinado por cromatografía iónica y espectrofotometría de absorción.

El informe de los análisis químicos, emitido por esta entidad, señala que las incertidumbres de algunos ensayos se han calculado a partir de los datos de validación de los mismos, obtenidos con materiales de referencia certificados. De esta forma, la incertidumbre que se expresa, da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

No obstante lo anterior, a cada análisis se le realizó el cálculo del porcentaje de error, de acuerdo al balance de aniones y cationes, que está definido por la ecuación:

$$error(\%) = 200 \frac{\sum cat - \sum an}{\sum cat + \sum an}$$

El porcentaje de error admisible del análisis, depende de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) que presente la muestra. La tabla 18 muestra los valores de conductividad y el error analítico admisible (Custodio y Llamas, 1986)

Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$	50	200	500	2000	>2000
Error admisible	30	10	8	4	4

Tabla 18. Porcentaje de error analítico admisible de una muestra según su conductividad.
Tabla según Custodio y Llamas (1986).

A continuación se presentan una serie de tablas con los resultados de los análisis químicos para los distintos tipos de aguas recolectadas. La tabla 19 presenta los resultados de las aguas provenientes de los sondeos; la tabla 20 de las aguas de los tubos volcánicos, lagunas y pozos; y las tablas 21 y 22 a los análisis de las precipitaciones de los sectores de Hanga Roa y Vaitea respectivamente.

Muestras sondeos	M-7	M-13	M-14	M-19	M-21	M-23	M-24	M-25	M-26	M-27
Cond. (20°C) (Lab.) $\mu\text{S}/\text{cm}$	1.054	2.923	3.643	3.003	2.143	204	1.159	703	1.250	528
Cond. (25°C) (campo) $\mu\text{S}/\text{cm}$	1.271	2.800	4.100	3.520	2.510	246	1.454	899	1.640	692
Temperatura Campo °C	24,1	22,1	22	22,6	23	21,6	26	23,7	22	23,8
pH (Lab.)	7,6	7,5	7,2	7,1	7,8	7,3	7,4	7,5	7,3	7,2
pH (campo)	7,35	7,51	7,41	7,35	7,18	7,71	7,49	7,65	7,69	7,48
Alcalinidad ppm CaCO_3	70	60	60	40	120	45	60	70	70	60
Na^+ mg/l	183,7	426,49	740,8	524,7	349,32	31,05	233,51	118,49	251,42	97,74
K^+ mg/l	10,95	21,35	25,5	19,9	17,53	2,36	10,58	7,5	11,49	6,47
Ca^{2+} mg/l	25	40	40	28	38	5	17	16	13	12
Mg^{2+} mg/l	29	68	50	69	65	8	22	20	30	17
NH_4 mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cl^- mg/l	320	856	1090	910	570	42	362	198	394	138
SO_4 mg/l	34	127	186	141	99	7	36	19	41	25
CO_3H mg/l	86	77	79	67	210	59	84	86	96	20
CO_3^{2-} mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO_3^- mg/l	6	3	9	4	3	3	7	7	2	83
NO_2 mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
PO_4^{3-} mg/l	0,09	0,38	0,25	0,29	0,55	0,19	0,12	0,13	0,33	0,12
Sílice mg/l	56,2	64,8	51,8	54,2	70,8	53,8	51,2	57	56	59,6
Li mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F mg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Br mg/l	1,0301	2,4991	3,5469	2,8463	1,9318	0,1596	1,1554	0,653	1,1668	0,4896
Cl^- mg/l*	290,74	817,45	1015,5	888,23	539,45	38,73	351,09	180,92	383,92	129,22
B mg/l	0,101	0,218	0,223	0,179	0,132	0,046	0,101	0,069	0,085	0,063
% Error	5,86	5,02	7,89	2,24	5,78	1,03	5,08	3,87	5,56	5,53

Tabla 19. Resultado análisis químico de las muestras de los sondeos en Isla de Pascua.

Muestra	Tubos volcánicos			Lagunas		Pozos			Mar en
	C-1	C-2	C-3	L-1	L-2	V-1	V-2	V-3	I. P.
Conductividad (20 °C) $\mu\text{S}/\text{cm}$	71	67	87	62	106	6393	2033	4423	66171
Conductividad (Campo) $\mu\text{S}/\text{cm}$	90	-	126	88	140	7100	-	4890	-
Temp. Campo °C	19,7	18	16,7	18,6	23,9	21,2	22	22	23,7
pH (Laboratorio)	8	7,2	7,9	7,3	6,7	7,4	6,8	7,3	7,8
pH (Campo)	7,13	7,3	6,43	5,46	4,6	7,65	7,34	7,54	8,27
Alcalinidad (ppm CaCO_3)	15	10	40	20	140	49	-	-	-
Na^+ mg/l	10,6	11,42	10,56	10,32	16,81	1237,3	363,72	832	12123
K^+ mg/l	<1	<1	<1	<1	<1	47,1	16,28	27,5	444
Ca^{2+} mg/l	2	1	3	1	2	64	26	52	458
Mg^{2+} mg/l	3	2	4	4	4	98	47	84	1040
NH_4 mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,45	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cl^- mg/l	16	18	15	15	34	1950	580	1295	18756
SO_4 mg/l	5	5	4	7	8	298	97	262	3880
CO_3H mg/l	17	14	29	15	3	79	103	111	76
CO_3^{2-} mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO_3^- mg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	4	7	6	<0,5
NO_2 mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
PO_4^{3-} mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,28	0,55	0,37	<0,05
Sílice mg/l	9,9	7,3	20,1	4,8	3,9	52	52,8	48,4	0,1
Li mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,138
F mg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,85
Br mg/l	0,058	0,0567	0,0644	0,0391	0,1021	6,7494	2,1269	4,2081	64,637
Cl^- mg/l	13,78	14,17	11,31	13,05	29,27	1875,3	549,29	1233,4	18188,36
B mg/l	0,033	0,022	0,022	0,022	0,058	0,362	0,15	0,254	3,86
% Error	3,06	2,28	4,38	1,79	1,09	5,86	5,99	5,64	5,83

Tabla 20. Resultado del análisis químico de las muestras de tubos volcánicos, cavernas, pozos y agua de mar en Isla de Pascua.

Fecha	Lluvias Hanga Roa								
	30/06/02	30/07/02	30/08/02	30/09/02	30/10/02	30/11/02	30/12/02	30/01/03	28/02/03
Conductividad (20 °C) $\mu\text{S}/\text{cm}$	34	37	60	38	25	31	178	155	34
pH (LAB)	7	6,9	7,2	7,6	7,5	7,4	6,9	7,2	7,4
Na^+ mg/l	5,14	6,13	9,23	5,7	2,53	3,01	9,33	6,59	4,49
K^+ mg/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1,32	<1	<1
Ca^{2+} mg/l	1	1	3	2	2	4	28	29	5
Mg^{2+} mg/l	2	1	1	1	1	1	1	1	1
NH_4 mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,2	0,13	0,14	<0,05
Cl^- mg/l	10	10	14	8	4	4	14	11	8
SO_4 mg/l	2	1,37	3	8	7	3	4	2	3
CO_3H mg/l	4	2	10	9	2	13	81	84	14
CO_3^{2-} mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO_3^- mg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1	1	1	<0,5
NO_2 mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
PO_4^{3-} mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación)

<i>Lluvias Hanga Roa</i>									
Fecha	30/06/02	30/07/02	30/08/02	30/09/02	30/10/02	30/11/02	30/12/02	30/01/03	28/02/03
Sílice mg/l	0,1	0,1	0	0	0	0,1	1,8	0,8	0,2
F mg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Br mg/l	0,0234	0,0276	0,0497	0,0164	0,0062	0,0652	0,0346	0,0228	0,0197
Cl ⁻ mg/l	8,28	9,1	14,28	7,79	3,66	2,96	11,88	7,98	5,17
% Error	11,98	11,55	2,26	22,48	0,5	6,27	4,44	5,06	1,97

Tabla 21. Resultado del análisis químico para las muestras de precipitación del sector de Hanga Roa.

<i>Lluvias Vaitea</i>									
Fecha	30/06/02	30/07/02	30/08/02	30/09/02	30/10/02	30/11/02	30/12/02	30/01/03	28/02/03
Conductividad (20 °C) μ S/cm	23	25		38	36	22	64	66	49
pH (LAB)	7,3	6,3		7,2	7,6	7,4	7,3	7,1	7,5
Na ⁺ mg/l	4,03	6,13		4,07	4,19	2,75	5,85	4,49	6,3
K ⁺ mg/l	<1	<1		<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ca ²⁺ mg/l	1	1		3	3	3	8	9	5
Mg ²⁺ mg/l	1	1		1	1	1	1	1	1
NH ₄ mg/l	<0,05	<0,05	Análisis no disponible	<0,05	<0,05	0,12	<0,05	<0,05	<0,05
Cl ⁻ mg/l	9	10		6	6	5	11	8	12
SO ₄ mg/l	1	1,37		2	3	4	3	3	3
CO ₃ H mg/l	1	2		12	9	6	21	25	11
CO ₃ ⁻² mg/l	0	0		0	0	0	0	0	0
NO ₃ ⁻ mg/l	<0,5	<0,5		<0,5	<0,5	1	<0,5	<0,5	<0,5
NO ₂ mg/l	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,11
PO ₄ ⁻³ mg/l	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Sílice mg/l	0,1	0,1		0	0	0,4	0,6	1,4	0,4
F mg/l	<0,5	<0,5		<0,5	<0,5	<1	<1	<1	<1
Br mg/l	0,0185	0,0276	0,0142	0,0081	0,007	0,0057	0,0118	0,2495	
Cl ⁻ mg/l	5,74	9,1	5,37	4,76	2,55	7,56	5,56	8,6	
% Error	5,65	15,07		0,5	8,89	8,78	2,76	4,2	4,29

Tabla 22. Resultado del análisis químico para las muestras de precipitación del sector de Vaitea

3.2. Características de parámetros físico- químicos de las aguas

3.2.1. Conductividad eléctrica y contenido de cloruros

La figura 9 grafica la relación entre la conductividad eléctrica y el contenido de cloruros para las aguas de Isla de Pascua. Se aprecia que a excepción de las precipitaciones, que presentan una mayor dispersión, todas las muestras presentan una relación prácticamente lineal con un amplio rango de valores, que se distribuyen según el tipo de agua y/o según su cercanía al mar.

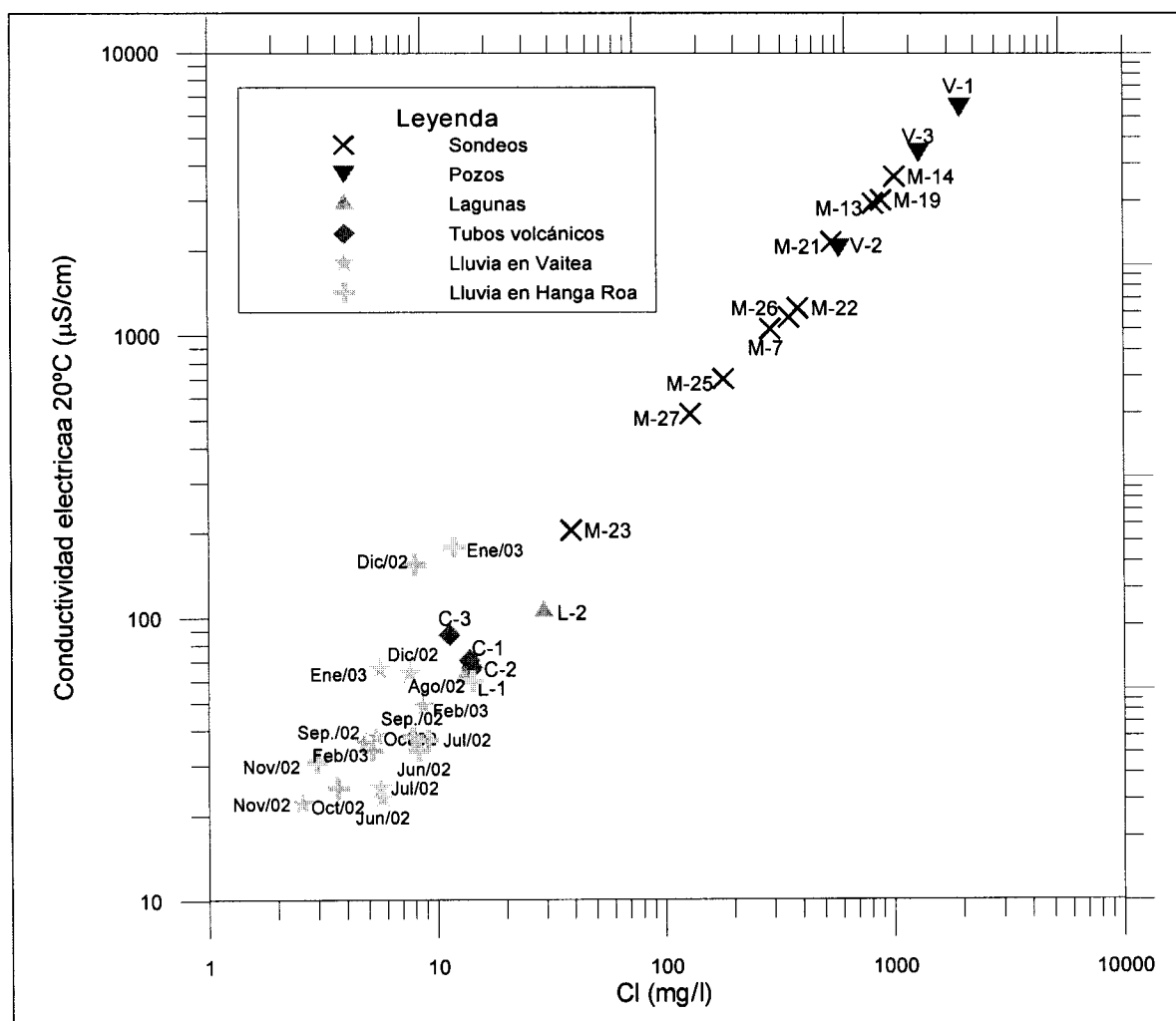


Figura 9. Relación entre la conductividad eléctrica y contenido de cloruros.

Existen grandes variaciones en la conductividad de las aguas. Las más diluidas corresponden a las aguas de lluvia con valores entre 25 y 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (en Hanga Roa). Sin embargo, dos muestras presentan valores de 178 y 155 $\mu\text{S}/\text{cm}$. También con valores bajos en la conductividad, se presentan las aguas de las lagunas y de los tubos volcánicos, situándose entre 60 y 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En particular, las muestras de los sondeos, presentan variaciones notables. Por ejemplo, las muestras con menor conductividad corresponden en orden ascendente a la M-23, M-27, M-25, M-7, M-24 y M-26 (200 a 1.250 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Por otra parte, con conductividades mayores a 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se tienen las muestras M-21, M-13, M-19 y M-14, y además, todas las muestras de los pozos, alcanzando hasta los 6.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cabe señalar que las conductividades medidas en campo resultaron ligeramente

superiores a las medidas arrojadas por el laboratorio, debido en parte a que la medida de campo, está calibrada a 25°C, mientras que la de laboratorio es a 20°C. Los contenidos de cloruros se distribuyen de forma tal que las muestras que presentan una menor concentración se ubican preferentemente al centro de los edificios volcánicos (puntos de mayor cota). Por ejemplo, las muestras de los sondeos 7, 25 y 27 disminuyen el contenido de 291 a 129 mg/l, a medida que se avanza al interior de la isla (Figura 10). De igual forma, las lluvias del fundo Vaitea, en centro de la isla, en general, presentan menores contenidos de Cl⁻ que las lluvias de Hanga Roa, ubicadas más cerca del borde costero. Dejando clara la influencia que presenta el aerosol marino en las variaciones del contenido de cloruros.

Las muestras con mayor contenido de cloruros, con valores que llegan hasta los 1800 mg/l, se presentan en las zonas costeras, especialmente en los pozos, esto debido probablemente a una mezcla de agua dulce y salada, producto de la mayor influencia que posee el aerosol marino por su cercanía al mar, o por el efecto de marejadas.

En el caso de los sondeos 13 y 14, del sector de Anakena, y del sondeo 19 del sector de Rano Raraku, presentan contenidos que van de 817 a 1015 mg/l, estos valores, sumados a otras características que se abordarán más adelante, pueden ser producidos por fenómenos de intrusión marina. Mención especial merece la muestra M-21, que a pesar de encontrarse lejos de la costa, presenta un contenido de cloruro relativamente alto (539 mg/l); factor a tomar en cuenta, ya que en la actualidad este sondeo es uno de los principales en el abastecimiento de agua para el poblado de Hanga Roa. Y de acuerdo con antecedentes en este punto se habría producido en una oportunidad, un brusco aumento de su conductividad durante procesos de bombeo.

3.2.2. pH

El valor de pH, medido en laboratorio como en campo, es muy similar para todas las muestras de agua recolectadas, situándose en torno a valores de neutralidad cercanos a pH 7. Los sondeos en general presentan valores comprendidos entre un máximo de 7,8 en la muestra M-21, a un mínimo de 7,1 en la muestra M-19. El

pH medido en campo para estas muestras es casi el mismo teniendo una variación que en promedio alcanza a 0,3 unidades. El pH de los pozos sigue un comportamiento similar.

Las muestras recolectadas en los tubos volcánicos y lagunas, presentan variaciones algo mayores para los valores de campo y laboratorio. Especialmente en las muestras C-1, C-3, L-1 y L2. Estas últimas, presentan el pH más bajo medido en campo, que alcanza a 5,46 y 4,6 respectivamente. La muestra C-2 es la excepción con un pH casi neutro en ambas mediciones.

El pH de las lluvias de Hanga Roa y Vaitea se acerca al valor de neutralidad, variando entre 6,9 y 7,6. De ellas sólo se disponen de medidas de laboratorio.

3.2.3. Temperatura

La temperatura del agua fue medida al momento de su extracción. Estas presentan rangos de valores que aproximadamente coinciden con su localización espacial y/o su proximidad al mar. Los sondeos cercanos a Hanga Roa (7, 25, 27 y 21) y la laguna de Rano Kau presentan temperaturas entre 23,7 y 24,1 °C. El mar en isla de Pascua registró 23,7 °C; mientras que los pozos y sondeos del sector norte (13 y 14) cercanos a él registraron temperaturas de 22 °C.

Las temperaturas más bajas se presentan hacia el interior de la Isla, en las muestras C-3 y L-1, con 16,7 y 18,6 °C; y en los tubos volcánicos del sector occidental con temperaturas entre 18 y 19,7 °C. La temperatura máxima la registró el sondeo 24 con 26 °C.

Cabe señalar que la medida de la temperatura, a pesar de que en agua es muy conservativa, puede variar en el transcurso de tiempo entre la extracción y la medición, como también por otros de factores como la hora de la medición, época del año, etc.

3.3. Características químicas de las aguas

3.3.1. Características químicas del agua de lluvia

La figura 11 exhibe los diagramas de Schoeller-Berkaloff de columnas verticales logarítmicas resultantes para la composición de las aguas de lluvia de los sectores de Hanga Roa y Vaitea.

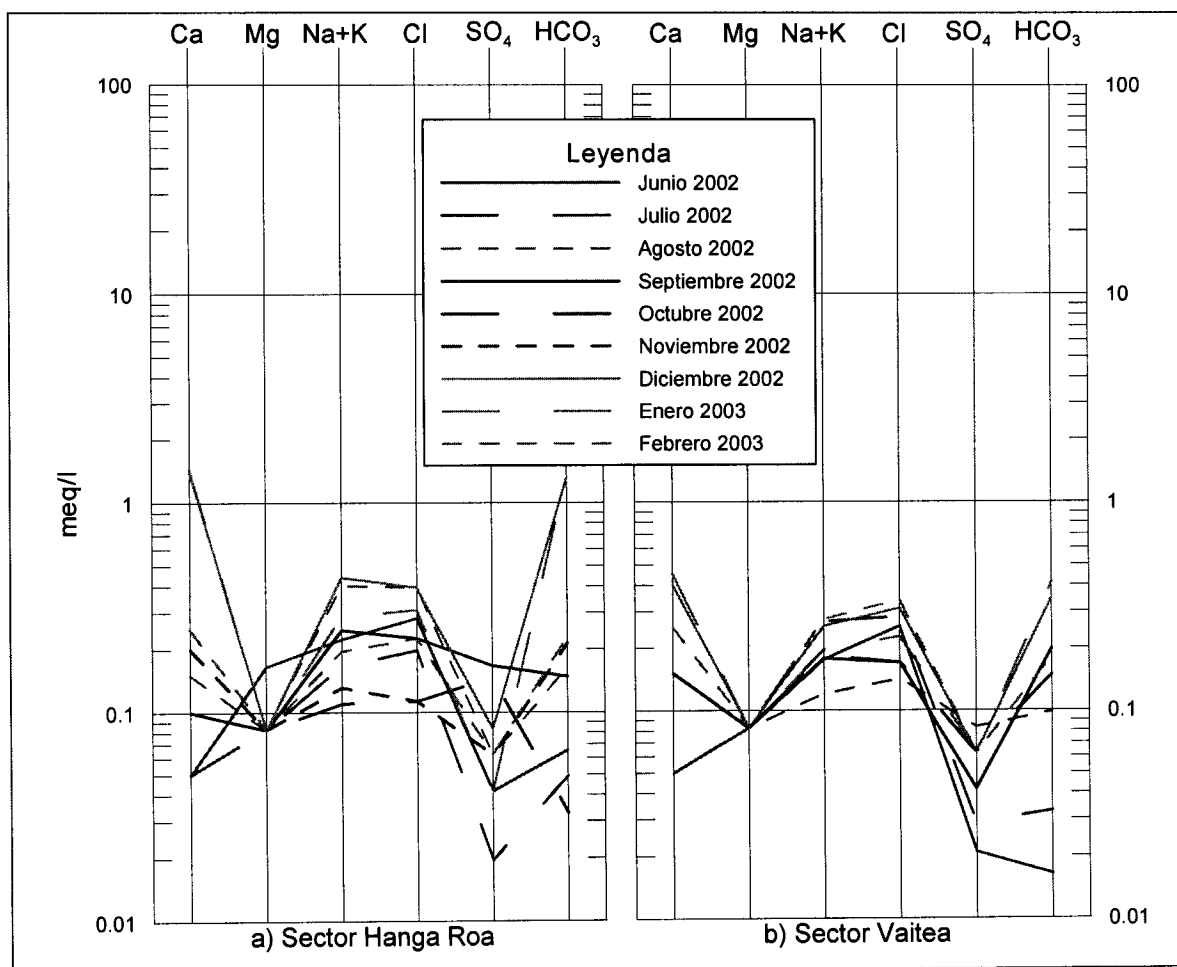


Figura 11. Diagramas de Schoeller-Berkaloff para las precipitaciones.

Los análisis comprenden un lapso de tiempo de 9 meses (8 para la estación de Vaitea, que falta agosto) de junio de 2002 a enero de 2003.

Las aguas de las precipitaciones, a pesar de ser muy diluidas, presentan un error analítico aceptable, según los valores de la conductividad que varían en un rango de 22 a 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20 $^{\circ}\text{C}$). En cuanto al valor del pH, tanto para las muestras obtenidas de la estación de Hanga Roa como de la estación de Vaitea, presentan valores muy cercanos al valor neutral o levemente superior, teniendo como máximo un valor de 7,6. El mes de julio, sin embargo, es el único en el que el valor del pH se presenta con un valor inferior a 7 en ambas estaciones.

Composicionalmente, tanto en la estación de Vaitea como en Hanga Roa, las aguas presentan una clara variación temporal que es muy similar entre si. Durante los meses de junio y julio la composición es esencialmente clorurada-sódica.

Desde septiembre a noviembre, si bien mantiene esta condición comienza a enriquecerse en iones Ca^{2+} y en HCO_3^- , para luego, en los meses de verano, y especialmente en las muestras de Hanga Roa, adquirir claramente un carácter bicarbonatado-cálcico. Esta variación va acompañada de un aumento progresivo en la conductividad.

Los contenidos de Mg^{2+} se mantienen constantes durante todos los meses y en ambas estaciones, sin embargo, el SO_4 presenta una mayor variabilidad aumentando con el transcurso del tiempo.

Los elementos como CO_3^{2-} , NO_2 , PO_4^{3-} , F^- y sílice, se presentan en concentraciones nulas o traza. No obstante, en las muestras recolectadas en los últimos meses del año, se presentan algunos valores fuera del rango típico. Así, por ejemplo, los contenidos de NO_3^- en Hanga Roa presentan una concentración de 1 mg/l, sólo en los meses de noviembre, diciembre y enero, estando ausente en el resto de los análisis.

3.3.2. Características químicas de las aguas subterráneas.

En el diagrama de columnas verticales de la figura 12, están representados los análisis químicos de las lagunas, tubos volcánicos, sondeos, pozos y el promedio de las lluvias muestreadas en Hanga Roa y Vaitea. En general, se observa que la mayoría de las aguas presentan un carácter clorurado-sódico. Para su caracterización se han considerado según su conductividad.

Las muestras provenientes de los pozos junto con las muestras de los sondeos 13, 14, 19 y 21, son las que presentan la mayor concentración iónica, especialmente las muestras V-1, y V-3, que presentan conductividades sobre 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Todas estas aguas son clorurado-sódicas, y presentan un comportamiento iónico similar. Las concentraciones relativas de Mg^{2+} y SO_4 son aproximadamente equivalentes en cada muestra, lo mismo ocurre para los contenidos de Ca^{2+} y HCO_3^- , que presentan una concentración relativa mucho menor. Sin embargo, de este grupo de muestras, la V-2 y M-21, que son las de menor conductividad (próxima a 2.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$), presentan un enriquecimiento en los contenidos de HCO_3^- .

El resto de los sondeos (7, 22, 24, 25, 26 y 27), presentan aguas con una concentración iónica menor (conductividad entre 703 a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$), pero mantienen el carácter de cloruradas-sódicas. Estas aguas, comparadas con las descritas anteriormente, presentan un mayor enriquecimiento en los contenidos de HCO_3^- y una disminución del ión SO_4 , a excepción de la muestra M-27, cuya concentración de HCO_3^- se comportan de forma similar al de la muestra M-21. Los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} , en tanto, conservan el mismo comportamiento del grupo anterior.

La muestra M-23 (204 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y las muestras C-1, C-2 Y C-3 (de 67 a 87 $\mu\text{S}/\text{cm}$), correspondientes a los tubos volcánicos, siguen un comportamiento muy similar. En ellas el ion bicarbonato adquiere una mayor presencia, por lo que adquieren una composición variable entre cloruradas-sódicas y bicarbonatadas-sódicas. El Mg^{2+} se presenta en concentraciones medias y los iones Ca^{2+} y SO_4 son los menos abundantes.

Las muestras provenientes de las lagunas, si bien ambas son cloruradas sódicas, presentan características totalmente distintas. La muestra L-1, presenta contenidos de Cl^- , $\text{Na}^+\text{+K}^+$ y Mg^{2+} , casi iguales a los de la muestra C-3, ubicada geográficamente muy cerca, para el resto de los iones el comportamiento es el mismo, variando sólo en la concentraciones. En cuanto la muestra L-2, cuyo contenido de HCO_3^- es el más bajo de todos, exhibe un comportamiento iónico similar al de las muestras que presentan una mayor conductividad.

Por último, se observa que el promedio de las composiciones del agua de lluvia, para los sectores de Hanga Roa y Vaitea, presentan un comportamiento similar en cuanto a los contenidos iónicos, mostrándose levemente más concentrada la lluvia en Hanga Roa. Composicionalmente, corresponden a aguas bicarbonatadas cálcicas, lo que se aleja del comportamiento típico observado en las aguas de la isla. No obstante lo anterior, este promedio puede no ser representativo de la lluvia, ya que como se dijo anteriormente, estas aguas presentan una variación temporal de su composición, donde las muestras que son bicarbonatadas cálcicas, son las más concentradas, factor que incide en el aumento del promedio calculado, en desmedro de las muestras cloruradas sódicas mucho más diluidas.

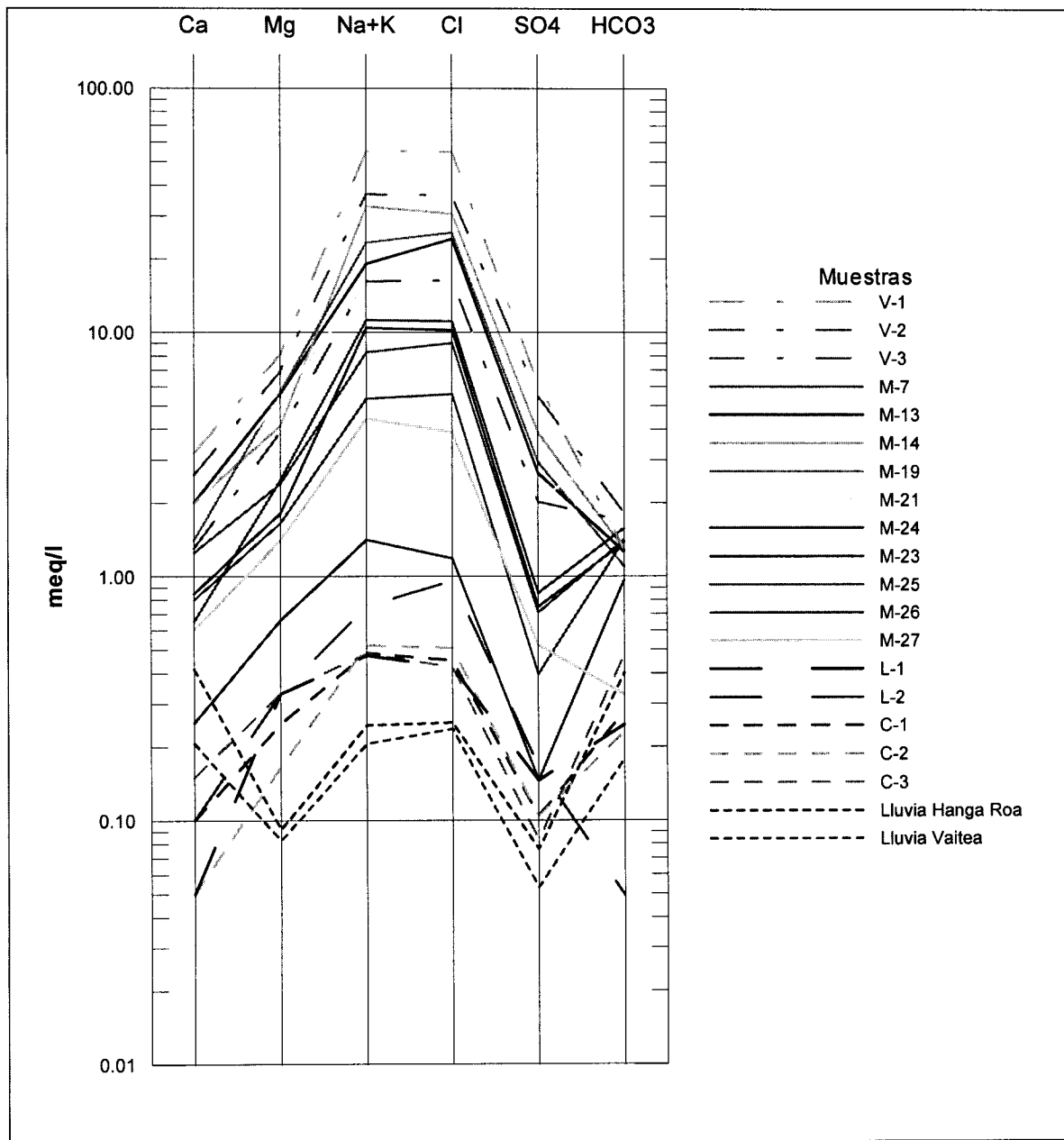


Figura 12. Diagrama Schoeller-Berkaloff para las aguas subterráneas de Isla de Pascua. Se incluye además el promedio de las composiciones de las agua de lluvia para los sectores de Hanga Roa y Vaitea.

El diagrama triangular de Piper representado en la figura 13, muestra la distribución que presentan las distintas aguas según sus contenidos iónicos en %. Como se aprecia, las muestras se pueden agrupar en tres conjuntos principales: el primero compuesto por las aguas de lluvia que caen en el campo de las aguas bicarbonatadas cálcicas en el caso de las lluvias de Hanga Roa y en el campo de

las aguas cloruradas cálcica para las lluvias de Vaitea; un segundo grupo, ubicado al centro del diagrama, que incluye las muestras de agua de mar, C-1, C-2, L-1 y M-23 de composición clorurada sódica y además, a la muestra C-3 de composición bicarbonatada sódica; y por último, un tercer grupo que incluye a las aguas obtenidas de los pozos, los sondeos y la muestra L-2 que caen en el campo de las aguas cloruradas sódicas.

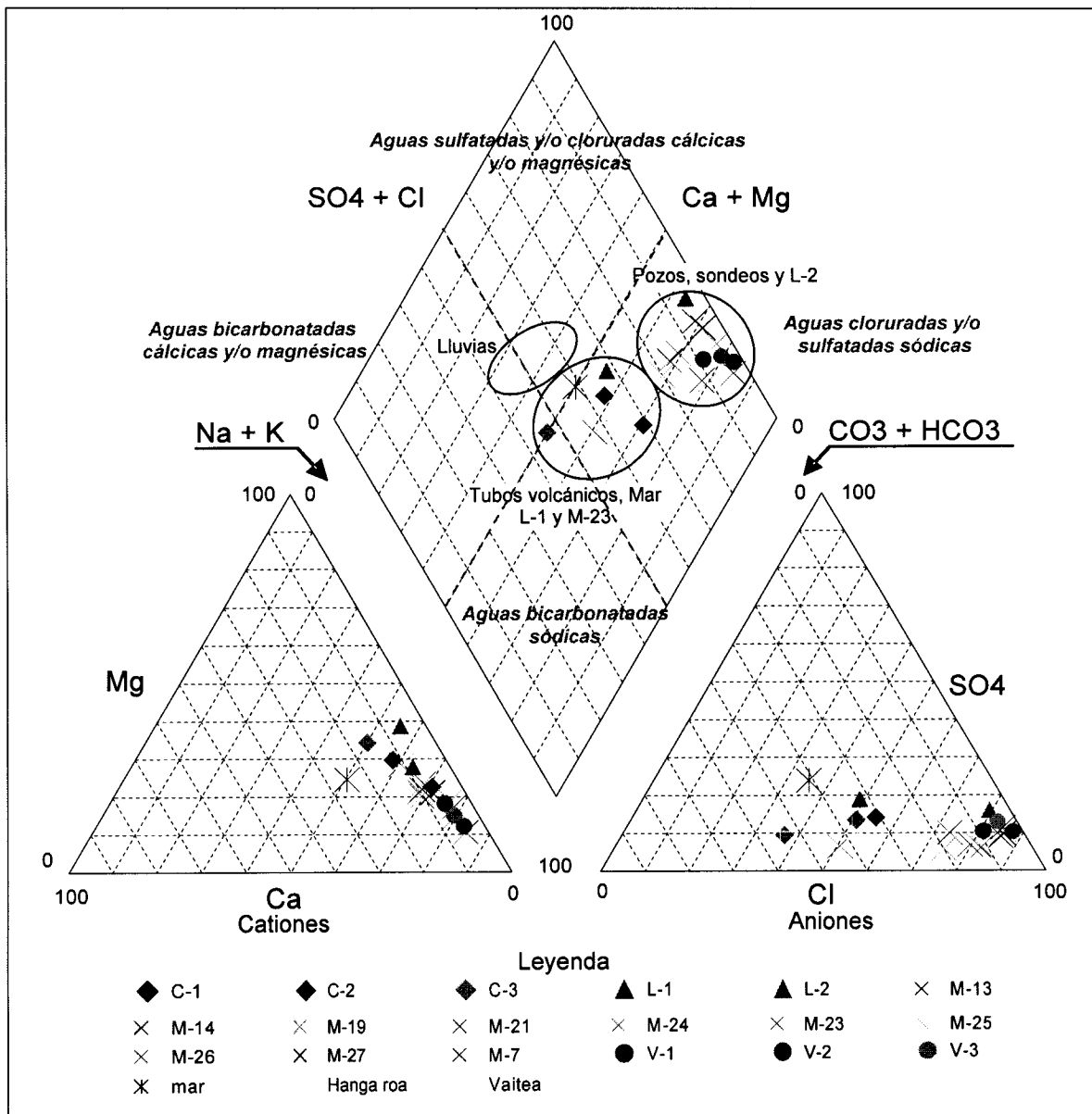


Figura 13. Diagrama de triangular de Piper para las aguas de Isla de Pascua. En rojo se indican los tipos de aguas deducidas del diagrama. (Custodio, 1986)

La concentración de los distintos iones (en meq/l) es muy variada dependiendo del tipo de agua que se considere. La figura 14 presenta los diagramas de Stiff para las distintas muestras recolectadas en Isla de Pascua, donde se puede visualizar de forma gráfica la variación en el espacio de la química del agua en el área de estudio.

El ion sodio tiene un comportamiento similar al del ion cloruro, presentándose con mayor concentración en las aguas pertenecientes a los pozos, con valores de 800 a 1200 mg/l, y en los sectores de Anakena y Rano Raraku con valores de 400 a 750 mg/l. Los sondeos en general, presentan concentraciones que fluctúan entre 100 y 250 mg/l, Siendo el de menor contenido el ubicado en el fundo Vaitea con 31 mg/l. Las lagunas y los tubos volcánicos presentan valores que promedian los 11 mg/l. Mientras que en las agua lluvia se puede observar que las mayores concentraciones se encuentran en el sector de Hanga Roa, y un poco mas diluidas en Vaitea.

Las concentraciones de los iones potasio, calcio, magnesio y sulfato presentan patrones muy similares. Sin embargo, se puede destacar lo siguiente: en el caso del ion potasio este puede tener su origen de los procesos de interacción agua-roca, ya que éste está prácticamente ausente en las aguas de lluvia. En el caso del ión magnesio su comportamiento puede responder además de la interacción con minerales ferromagnesianos, a procesos de mezcla con agua de mar, esto especialmente en el sector de los pozos y sondeos 13, 14 y 19. El ion sulfato, en tanto, presenta concentraciones que responde de buena forma a la acción del aerosol marino (Prof. Christian Herrera. *Com. verbal*).

El ion fosfato está prácticamente ausente en el agua de lluvia y en el agua de mar, las muestras que presentan mayor concentración corresponden a la M-21 y V-2, con 0,55 mg/l. En las demás muestras los valores se encuentran en un rango que varía entre los 0,35 y los 0,1 mg/l. Estos valores tienen su origen probablemente en procesos de contaminación producto de la actividad relacionada con la crianza de animales, especialmente en la muestra V-2, muy cercana a corrales.

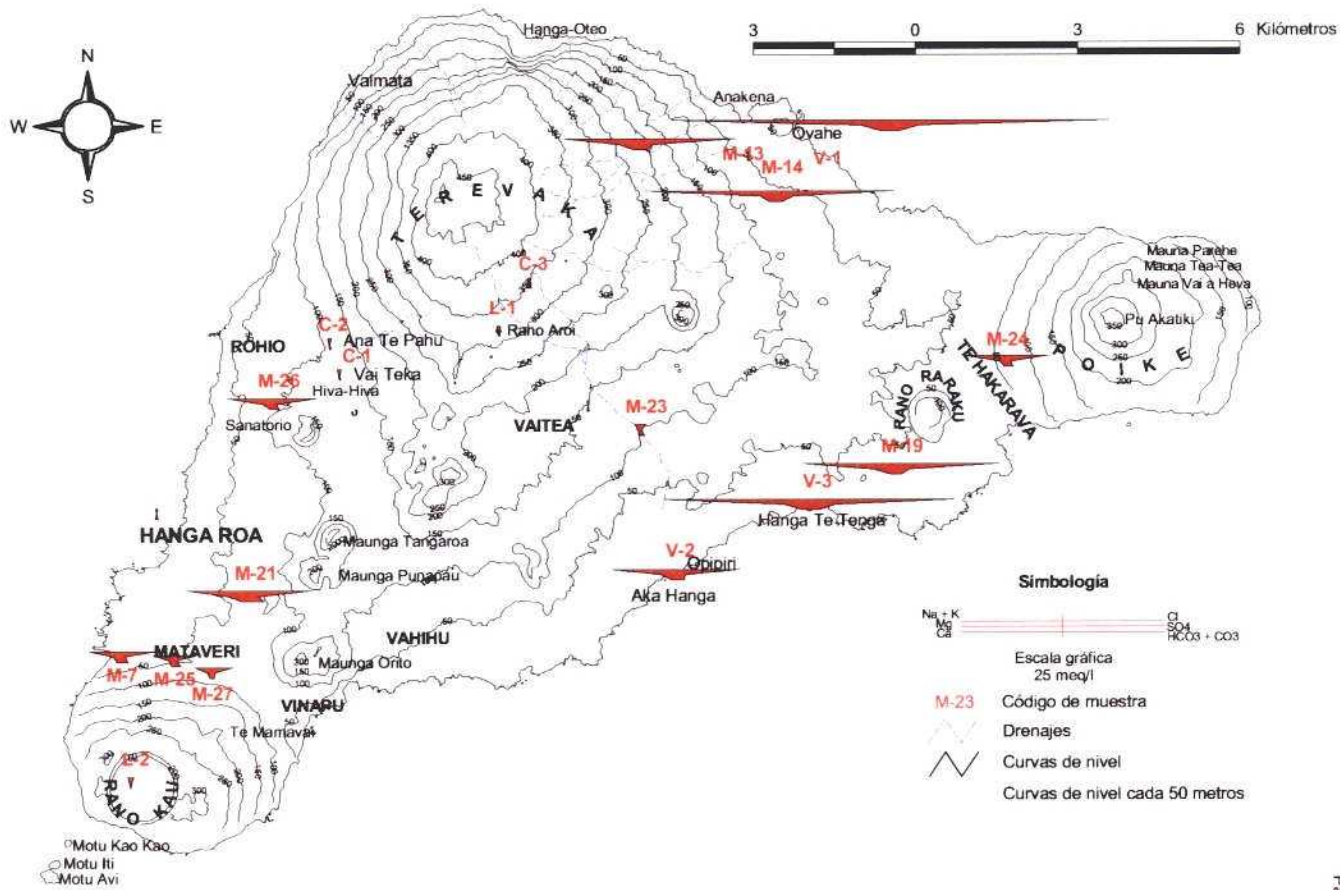


Figura 14. Diagramas de Stiff para las muestras de agua de Isla de Pascua

El contenido de sílice presenta un valor promedio de 55 mg/l para los sondeos y pozos, con la excepción de las muestras M-13 y M-21 con 64 y 70 mg/l respectivamente. Su origen se debe a la interacción agua-roca, ya que las concentraciones en el agua de mar y en las lluvias es prácticamente nula (0,1 mg/l). El valor promedio de sílice en los tubos volcánicos, que representan el agua en tránsito por la zona no saturada, es de 10 mg/l en el sector oeste (flujos de lavas más nuevas), y 20 mg/l al interior de la isla. En el caso de las lagunas éste es de 4,8 y 3,9 mg/l en Rano Aroi y Rano Kau respectivamente.

El ion bicarbonato, para las aguas de sondeos y pozos, presenta el valor más alto en la muestra M-21, con 210 mg/l. Sin embargo, la mayoría de estas muestras se sitúan con valores cercanos al del agua de mar, que es de 76 mg/l. En las aguas de las lagunas y tubos volcánicos estos valores disminuyen, situándose entre 30 y 10 mg/l. El agua de lluvia presenta valores que no supera los 12 mg/l, pero que sin embargo está presente en una mayor proporción en comparación con las otras muestras

En el resto de los análisis efectuados se obtuvieron los siguientes resultados: para el ion NH_4 los valores resultaron inferiores a 0,05 mg/l salvo para la muestra L-2 con 0,45 mg/l; para los iones CO_3^{2-} , NO_2^- , Li^+ , F^- , todos los valores fueron de concentración nula o traza.

3.4. Relaciones Iónicas

Las relaciones iónicas obtenidas de los análisis químicos se presentan en la tabla 4. Estas relaciones además se presentan gráficamente en las figuras 15, 16, 17, 18, 19 y 21 para una mejor visualización.

Muestra	Fecha	r Cl/rBr	rMg/rCl	r SO ₄ /rCl	rNa/rCl	rMg/rCa	rCl/rCO ₃ H+rCO ₃
C-1		535	0,639	0,268	1,187	2,479	1,393
C-2		563	0,414	0,261	1,244	3,306	1,739
C-3		396	1,038	0,262	1,441	2,204	0,670
L-1		922	0,899	0,397	1,221	6,612	1,495
L-2		646	0,401	0,202	0,886	3,306	16,765
M-13		737	0,244	0,115	0,805	2,810	18,242
M-14		645	0,144	0,135	1,126	2,066	22,088
M-19		703	0,228	0,117	0,912	4,073	22,780
M-21		629	0,354	0,136	0,999	2,827	4,414
M-24		685	0,184	0,076	1,027	2,139	7,182

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación)

Muestra	Fecha	r Cl/rBr	rMg/rCl	r SO ₄ /rCl	rNa/rCl	rMg/rCa	rCl/rCO ₃ H+rCO ₃
M-23		547	0,606	0,134	1,237	2,645	1,128
M-25		624	0,324	0,078	1,011	2,066	3,615
M-26		742	0,229	0,079	1,011	3,814	6,872
M-27		595	0,386	0,143	1,167	2,342	11,102
M-7		636	0,293	0,086	0,975	1,917	5,809
V-1		626	0,153	0,118	1,018	2,531	40,790
V-2		582	0,251	0,131	1,022	2,988	9,164
V-3		661	0,200	0,157	1,041	2,670	19,093
MAR (en Isla de Pascua)		634	0,168	0,158	1,029	3,753	411,227
Hanga Roa	30/06/02	798	0,709	0,179	0,958	3,306	3,557
	30/07/02	743	0,322	0,111	1,040	1,653	7,818
	30/08/02	646	0,205	0,155	0,998	0,551	2,454
	30/09/02	1071	0,377	0,760	1,129	0,826	1,487
	30/10/02	1331	0,802	1,415	1,067	0,826	3,145
	30/11/02	102	0,991	0,749	1,569	0,413	0,391
	30/12/02	839	0,246	0,249	1,212	0,059	0,252
	30/01/03	789	0,367	0,185	1,274	0,056	0,163
	28/02/03	592	0,567	0,429	1,340	0,330	0,634
Vaitea	30/06/02	699	0,511	0,129	1,084	1,653	9,863
	30/07/02	766	0,523	0,124	1,062	1,653	3,213
	30/08/02	-	-	-	-	-	-
	30/09/02	852	0,546	0,275	1,170	0,551	0,769
	30/10/02	1325	0,616	0,466	1,359	0,551	0,909
	30/11/02	821	1,150	1,160	1,664	0,551	0,730
	30/12/02	2989	0,388	0,293	1,194	0,206	0,619
	30/01/03	1062	0,527	0,399	1,246	0,183	0,382
	28/02/03	78	0,341	0,257	1,130	0,330	1,343

Tabla 23. Relaciones iónicas de las aguas de Isla de Pascua.

3.4.1. Relación rCl/rCO₃H

En la relación iónica rCl/rCO₃H+CO₃ (figura 15), se observa cómo la gran mayoría de las muestras posee valores comprendidos entre 0,5 y 10, que son valores característicos de aguas más continentales. Así, se observa que las aguas de lluvia presentan en general un comportamiento similar, y sus valores son aproximadamente los mismos que el de las muestras de cavernas y lagunas. A excepción de la muestra L-2 presenta un valor anormalmente alto de 16,72.

Esta razón en las muestras de los sondeos aumentan gradualmente a medida que se incrementa la salinidad. De esta forma, se tiene que la muestra M-23, que es la más diluida, presenta un valor de 1,13, mientras que las muestras M-13, M-14 y M-19 con mayor contenido salino, presentan valores de 18 a 22, muy similares a

mucho más restringido, que va de 0,35 a 0,61. Estos últimos valores, son bien correlacionables con las aguas del sondeo 23, que presentan un valor de 0,6 y que pertenece a la misma zona, sin embargo, las muestras C-3 y L-1, ubicadas también en las cercanías, presentan los valores más altos de todos, con 0,89 para L-1 y 1,03 para C-3.

Las aguas de sondeos y pozos presentan una disminución progresiva en el valor de la relación, que se acerca al valor del agua de mar (0,168) a medida que aumenta el contenido de cloruros; llegando incluso a valores de hasta 0,14 para la muestra M-14.

3.4.3. Relación rSO_4/rCl

En la figura 17, se observa, al igual que en la relación anterior, que las aguas lluvia de Hanga Roa presentan un amplio rango de valores entre 0,11 y 1,4; en tanto las muestras de lluvia de Vaitea, presentan valores algo más restringidos de 0,12 a 0,46. Las muestras de los tubos volcánicos, presentan valores muy similares, cercanos a 0,26. Por otra parte, las muestras de las lagunas presentan valores de 0,20 para L-2 y 0,39 para L-1. Tanto éstas, como las muestras de los tubos volcánicos, se encuentran dentro del rango de valores de las aguas lluvia, y además, sobre el valor que presenta el agua de mar, que es de 0,15.

Todas las muestras de sondeos y pozos, a excepción de la V-3, presentan valores inferiores al de la relación marina. Existe además un grupo compuesto por las muestras M-7, M-24, M-24 y M-26 que presentan los valores más bajos de todos, entre 0,076 y 0,086, y de los que se presume habría ocurrido una reducción del contenido de sulfatos. Estas muestras presentan una distribución muy variada en la isla, por lo que el fenómeno de reducción no tendría un origen claro.

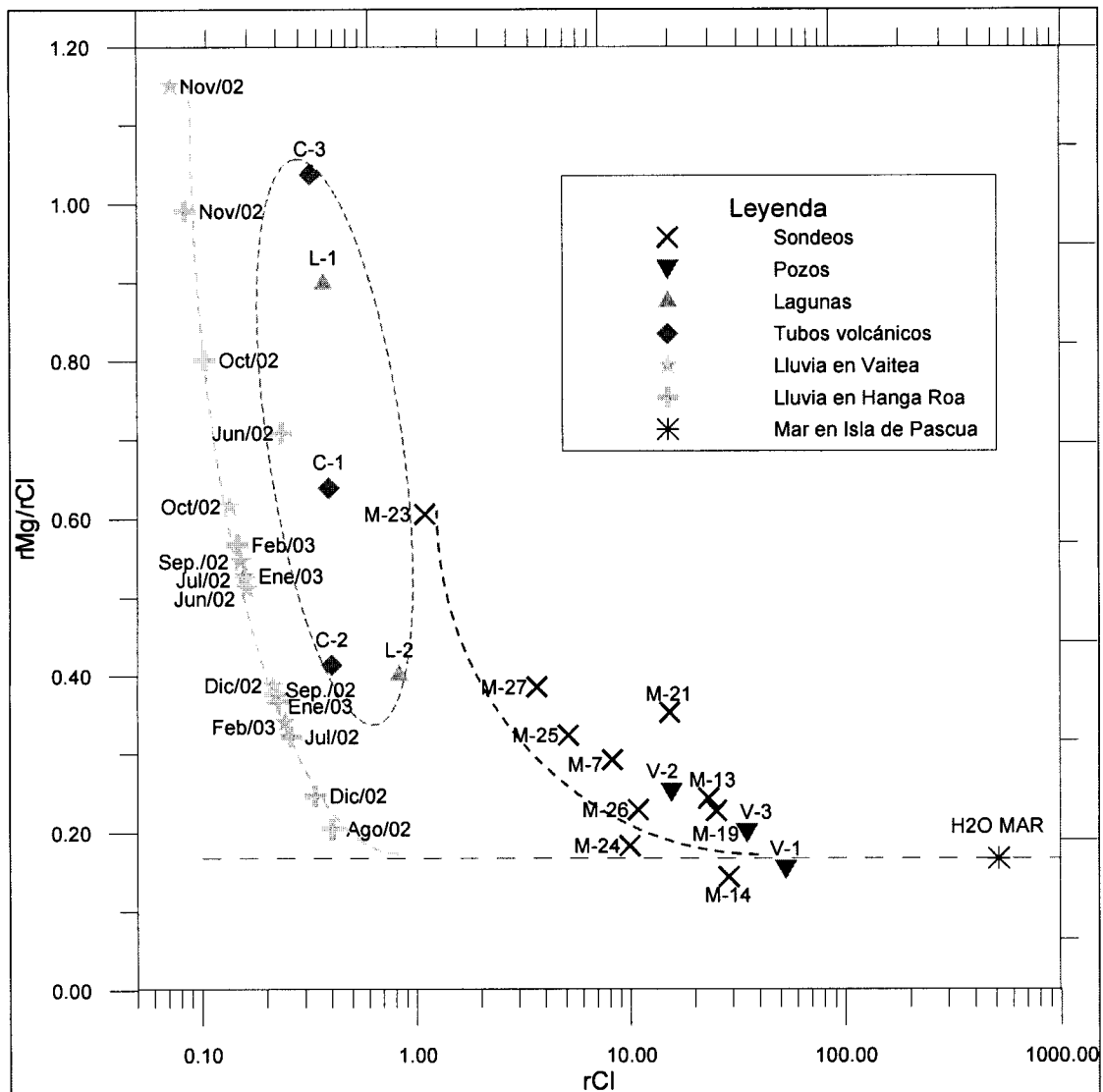


Figura 16. Gráfico relación iónica rMg/rCl v/s rCl

3.4.4. Relación rCl/rBr

En la relación rCl/rBr graficada en la figura 18, se observa que en general las aguas procedentes de la lluvia presentan valores muy dispersos, especialmente para las muestras de Hanga Roa cuyos valores van desde 643 a un valor máximo de 1331 producido en octubre. Las lluvias de Vaitea presentan un comportamiento similar en el valor de la relación con un mínimo de 699 a un máximo de 2989, en el mes de diciembre. Esta gran variabilidad en el valor de la relación puede estar controlada por la intensidad y frecuencia en que se producen las lluvias. Las muestras de las lagunas presentan valores de 922 para L-1 y 622 para L-2, es

decir, dentro del rango de los valores del agua de lluvia. Los valores obtenidos en los tubos volcánicos se ubican bajo el valor marino, que en Isla de Pascua vale 634, y que en la muestra C-3 es de 396, el menor de todos. Los pozos y los sondeos en general se aproximan al valor marino a excepción de las muestras M-23, con un valor de 547, mucho mas similar a las muestras C-1 y C-2; y las muestras M-19, M-13 y M-26, con valores algo mayores.

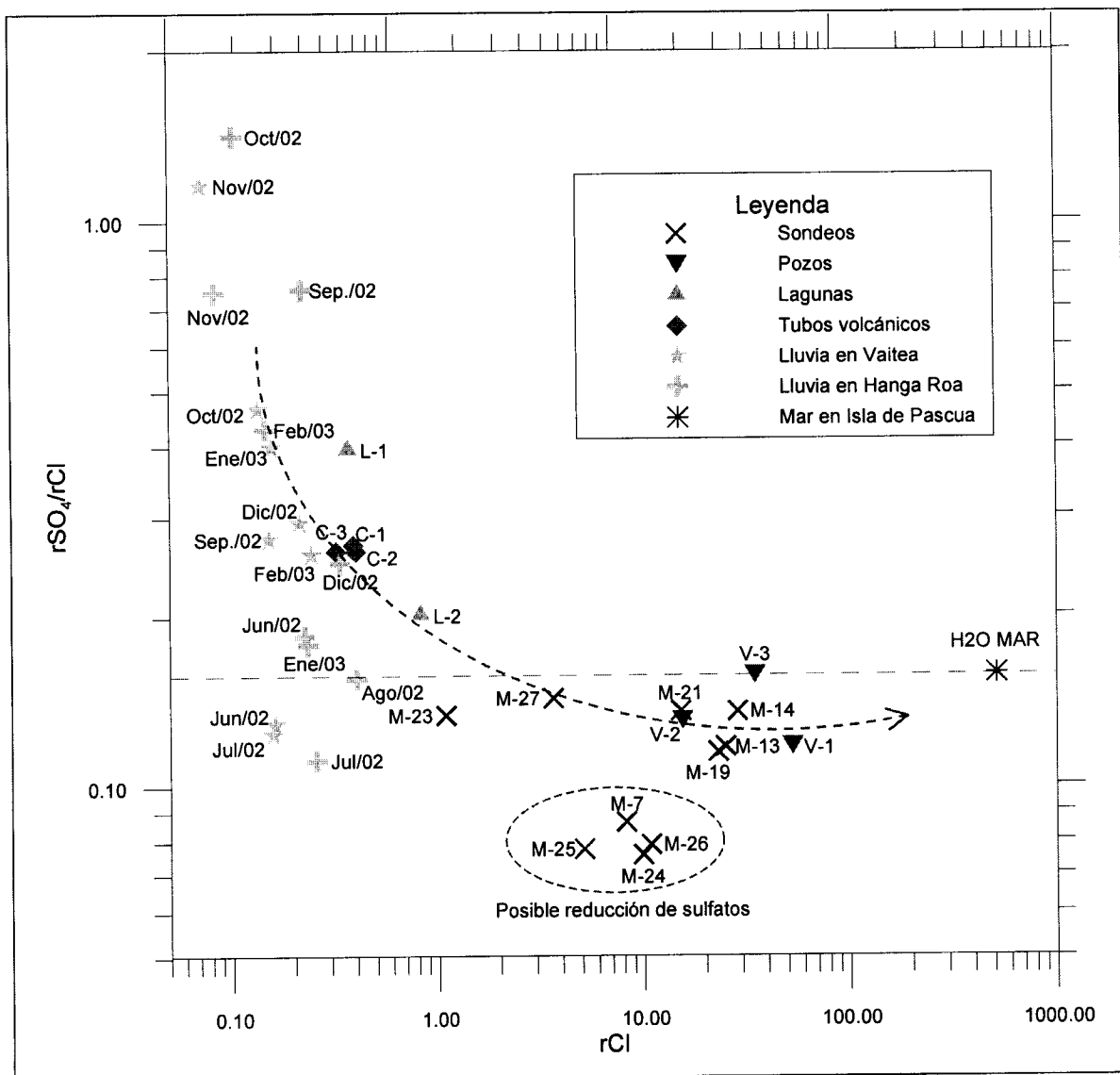


Figura 17. Gráfico relación rSO_4/rCl v/s rCl

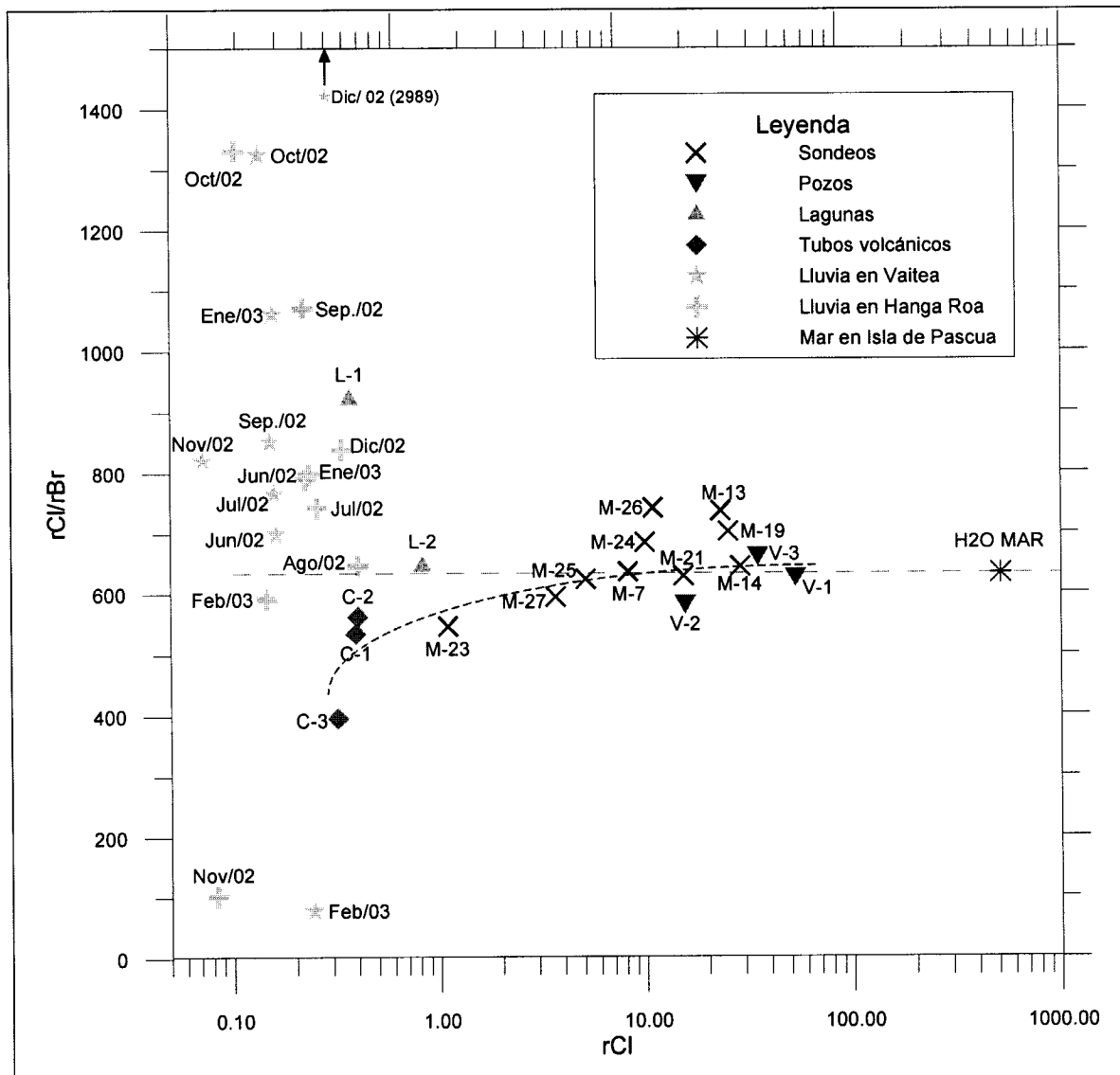


Figura 18. Gráfico relación rCl/rBr v/s rCl

3.4.5. Relación rNa/rCl

En las figuras 19 y 20 se observa el comportamiento de la relación rNa/rCl. La relación marina presenta un valor de 1,029. Comparada con ella, la mayoría de las muestras de sondeos y pozos exhiben valores ligeramente algo inferiores, pero muy cercanos. Por el contrario, en las aguas más diluidas como las lluvias, tubos volcánicos, lagunas, M-23 y M-27, los valores se presentan con rangos mucho más amplios y claramente superiores, con excepción de algunas muestras de lluvia de Hanga Roa y de la muestra L-2. Esto ligado probablemente a la relación que existe con la distancia a la costa. De esta forma se tiene que las lluvias de

Vaitea presentan valores superiores a los de Hanga Roa. Lo mismo sucede con los tubos volcánicos y con las lagunas. Por último, las muestras M-13, M-19 y M-14, de alto contenido de cloruros, presenta valores que escapan a la tendencia general, comprendiendo valores de 0,805 y 0,912 para las dos primeras (bajo el valor del mar) y 1,126 para la última.

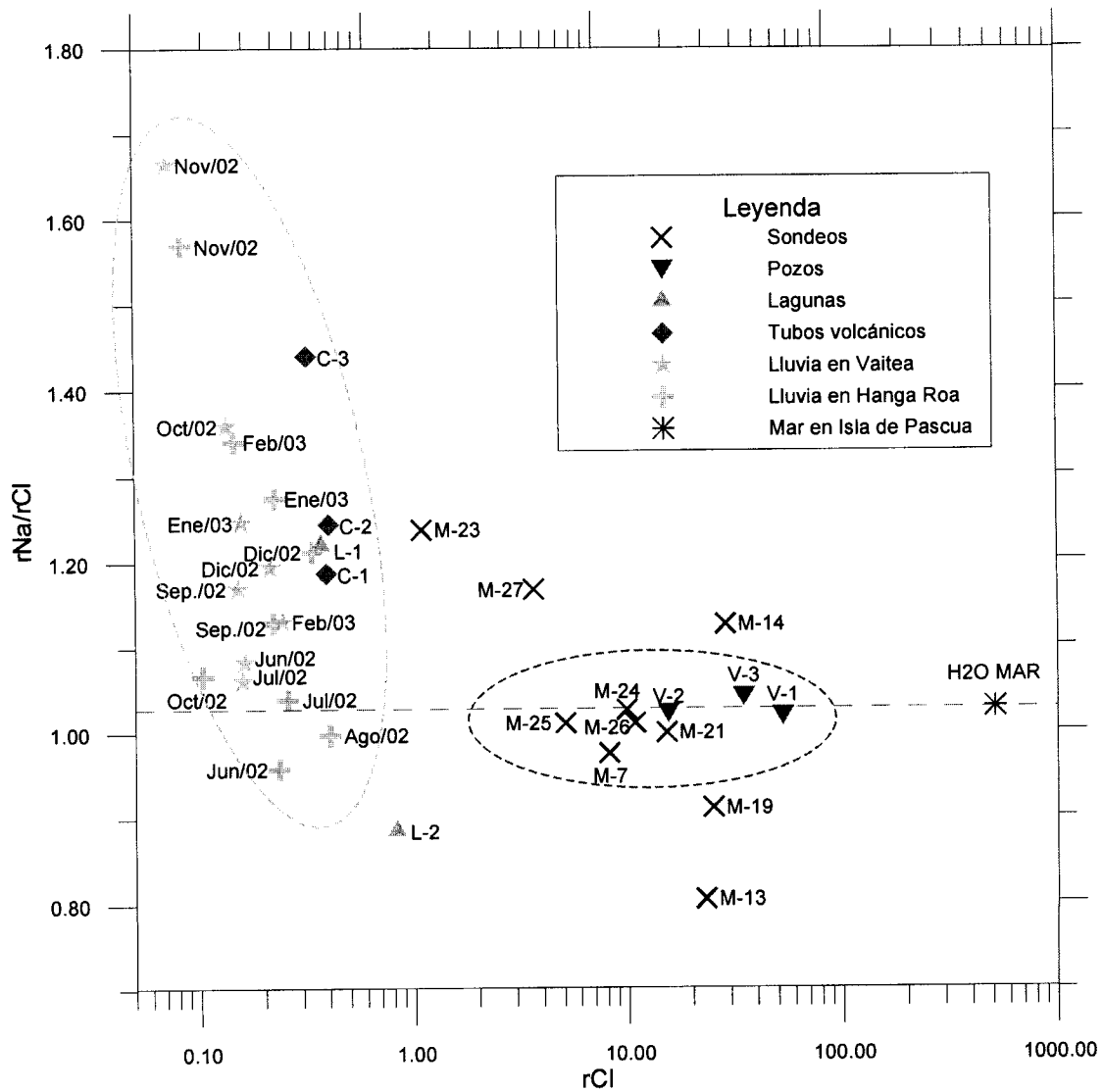


Figura 19. Gráfico relación rNa/rCl v/s rCl

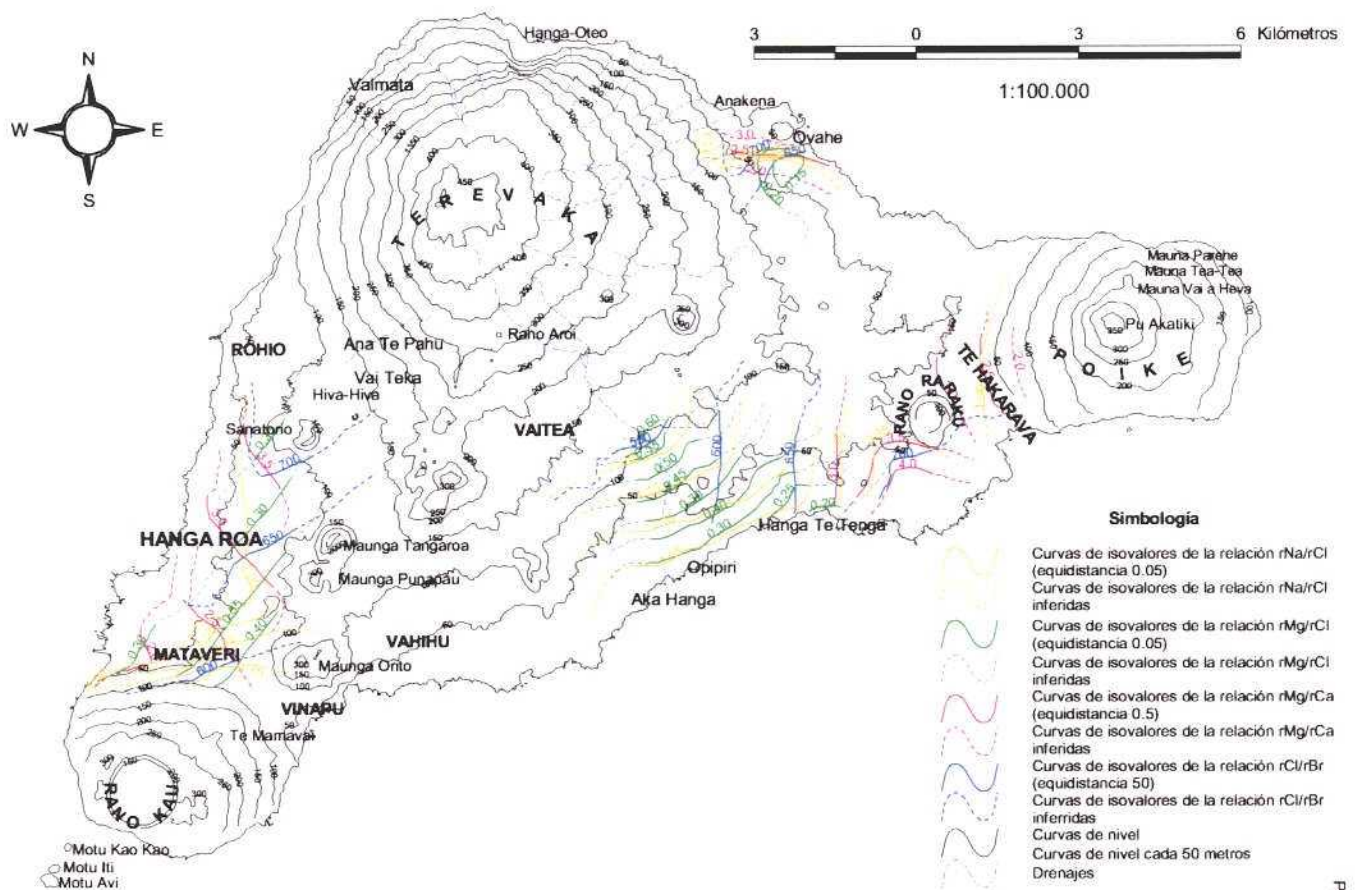


Figura 20. Mapa de curvas de relaciones iónicas.
 Las relaciones representadas son: rNa/rCl , rMg/rCl , rMg/rCa y rCl/rBr . ($r=meq/l$)

En el caso de las muestras de los tubos volcánicos, éstas presentan valores entre 2,2 y 3,3; valores generalmente relacionados a terrenos ricos en silicatos magnésicos, como los basaltos (Custodio y Llamas, 1986), que corresponde al caso de Isla de Pascua.

3.5. Mezcla de aguas

El estudio de mezclas de aguas, se basa en las características conservativas del ion cloruro. Así, si se tiene un agua con un contenido C (de cloruro) que es mezcla de otras dos aguas de contenidos C_1 y C_2 , y existe una fracción X del agua 1 y $1-X$ del agua 2 se debe de cumplir que:

$$C = C_1 \cdot X + C_2(1 - X) \text{ (Custodio y Llamas, 1986)}$$

Y el porcentaje de mezcla de aguas estaría determinado por la expresión:

$$X = \frac{C - C_2}{C_1 - C_2}$$

Considerando lo anterior, se han seleccionado de acuerdo a su ubicación geográfica, 3 grupos de muestras para establecer los porcentajes de mezcla de agua. Cada grupo está compuesto por dos muestras más el agua de mar. La muestra de menor concentración de cloruros, representa el agua original y la de mayor el agua de mezcla.

En el sector de Hanga Roa se han seleccionado las muestras M-27 y M-21, ya que ambas se obtuvieron de sondeos ubicados a similares cotas (tabla 15), pero presentan concentraciones de cloruros bastante distintas; para el sector sureste, las muestras M-23 y M-19; y para el sector noreste, las muestras M-23 y M-13.

Las tablas 24, 25 y 26 presentan un resumen con los resultados obtenidos para cada zona.

Agua	Concentración de iones en mg/l						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄	CO ₃ H
Mar	458	1040	12123	444	18188,36	3880	76
M-27	12	17	97,74	6,47	129,22	25	20
M-21	38	65	349,32	17,53	539,45	99	210
La mezcla teórica contendría un 2,3% de agua de mar y 97,7% de agua del sondeo 27							
Agua de mezcla teórica	22	40	370,90	16,41	539,45	113	21
Agua real - agua teórica	16	25	-21,58	1,12	0,00	-14	189

Tabla 24. Resultados de cálculos de mezcla de agua para el sector de Hanga Roa. El porcentaje de mezcla es calculado a partir del ión Cl⁻ que permanece constante.

Agua	Concentración de iones en mg/l						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄	CO ₃ H
Mar	458	1040	12123	444	18188,36	3880	76
M-23	5	8	31,05	2,36	38,73	7	59
M-19	28	69	524,7	19,9	888,23	141	67
La mezcla teórica contendría un 4,7% de agua de mar y 95,3% de agua del sondeo 23							
Agua de mezcla teórica	26	56	597,02	23,03	888,23	188	60
Agua real - agua teórica	2	13	-72,32	-3,13	0,00	-47	7

Tabla 25. Resultados de cálculos de mezcla de agua para el sector sureste.

Agua	Concentración de iones en mg/l						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄	CO ₃ H
Mar	458	1040	12123	444	18188,36	3880	76
M-23	5	8	31,05	2,36	38,73	7	59
M-13	40	68	426,49	21,35	817,45	127	77
La mezcla teórica contendría un 4,3% de agua de mar y 95,7% de agua del sondeo 23							
Agua de mezcla teórica	24	52	549,86	21,31	817,45	173	60
Agua real - agua teórica	16	16	-123,37	0,04	0,00	-46	17

Tabla 26. Resultados de cálculos de mezcla de agua para el sector noreste.

En general, se observa que el porcentaje de mezcla con agua de mar alcanza valores que varían de 2,3% para el sondeo 21, a 4,3 y 4,7% en los sondeos 13 y 19.

El comportamiento de los demás iones frente a estos porcentajes de mezcla es variable en cada caso.

Para el sector de Hanga Roa, el Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y HCO₃⁻ presentan una concentración inferior a la esperada en 40, 30, 10 y 90% respectivamente, por el contrario, el Na⁺ y el SO₄ arrojan valores de concentración mayores al agua real en un 6 y 13%.

En el sector sureste, la mezcla arroja un contenido muy similar (variaciones inferiores al 20%) al esperado en casi todos los iones, a excepción del SO₄ que aumenta en aproximadamente un 30%.

Por último, el sector noreste, el agua de mezcla teórica se presenta con una concentración iónica inferior a la real en el Ca²⁺, Mg²⁺, y HCO₃⁻, en porcentajes que varían de un 40 a un 20%, el Na⁺ y el SO₄, en tanto, aumentan en una proporción de 30 a 36%, y el K⁺ prácticamente permanece inalterable.

CAPÍTULO 5. ISÓTOPOS AMBIENTALES

1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo trata la aplicación de técnicas isotópicas al estudio del sistema hidrogeológico de Isla de Pascua. Estas técnicas son de gran utilidad ya que permiten para el caso de los isótopos estables determinar, por ejemplo, el origen, cota de recarga de y/o los procesos físico-químicos que afectan al agua; y para los isótopos radiactivos establecer tiempos de residencia del agua en los acuíferos. Este estudio corresponde al primero en su tipo que se hace en ese territorio insular.

Los isótopos ambientales utilizados en el presente estudio corresponden al oxígeno-18 (^{18}O) y deuterio (^2H o D) para los isótopos estables, y tritio (^3H) como isótopo radioactivo.

2. ISÓTOPOS ESTABLES. ^{18}O y D

2.1. Características generales del ^{18}O y D

El ^{18}O y el D al formar parte de la molécula de agua son muy buenos trazadores del movimiento de la misma y de algunos de los procesos que la afectan.

En las aguas naturales los contenidos de estos isótopos presentan pequeñas variaciones producidas principalmente por el fraccionamiento isotópico, producido en los fenómenos de evaporación y condensación, aunque también pueden colaborar con menor intensidad otros fenómenos como la difusión térmica, procesos biológicos, etc. (Custodio, 1986).

Estas variaciones isotópicas se miden como desviaciones respecto a un estándar, que normalmente es el SMOW (Standard Median Ocean Water), y cuya notación δ (δD para el deuterio y $\delta^{18}\text{O}$ para el oxígeno-18) es expresada en partes por mil (‰). De esta forma si A es la concentración de ^{18}O o D expresado en $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o en D/H respectivamente, δ esta definida por:

$$\delta = \frac{A_{\text{muestra}} - A_{\text{SMOW}}}{A_{\text{SMOW}}}$$

Las variaciones naturales de δ son del orden de ± 400 ‰ para el D y de ± 40 ‰ para el ^{18}O . Generalmente se designa como aguas de composición isotópica ligera a las muestras con valores muy negativos de δ y como aguas de composición isotópica pesada a las que tienen valores de δ poco negativos o positivos.

2.2. Contenido de ^{18}O y D en la precipitación

Los datos utilizados en el estudio de los contenidos de ^{18}O y D en la precipitación proceden de dos fuentes.

En primer término se disponen de once análisis de muestras de agua de lluvia tomadas entre junio de 2002 y enero de 2003, y que corresponden a precipitaciones de los sectores de Hanga Roa y Vaitea. Estos análisis, realizados en los laboratorios del Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en Madrid, España, arrojaron los resultados expuestos en la tabla 27.

Sector	Fecha	δD (‰) SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) SMOW	d (d = $\delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$)	Cota m.s.n.m.
Hanga Roa	Jun 2002	-13,8	-2,15	3,4	40
	Oct. 2002	-1,62	-3,8	9,2	
	Nov. 2002	-2,22	-5,3	12,4	
	Dic. 2002	-1,16	1,9	11,2	
	Ene. 2003	-1,92	-4,3	11,1	
	Feb. 2003	-0,99	0,1	8	
Media	-	-3,62	-2,26	9,22	
Vaitea	Jun 2002	-19,90	-3,00	4,10	170
	Nov. 2002	-2,18	-6,6	10,9	
	Dic. 2002	-0,69	6,1	11,7	
	Ene. 2003	-1,89	0,3	15,4	
	Feb. 2003	-3,94	-20,1	11,5	
Media	-	-5,72	-4,66	10,72	

Tabla 27. Determinaciones de ^{18}O y D para las precipitaciones de Hanga Roa y Vaitea.
d = exceso de deuterio.

En segundo término, se disponen de 144 análisis de ^{18}O y 135 de D (131 pares de datos) de precipitaciones de Isla de Pascua, que fueron obtenidos de la base de datos GNIP/ISOHIS (Global Network of Isotopes in Precipitation / Isotope Hydrology Information System) que posee y elabora la Agencia Internacional de

Energía Atómica (AIEA) a partir distintas estaciones que tiene alrededor del mundo. Esta base de datos es asequible en el sitio web: <http://isohis.iaea.org>.

Estos datos corresponden a la concentración promedio mensual de ^{18}O y D en las precipitaciones (en δ ‰ de SMOW) recolectadas en una estación ubicada a 41 metros sobre el nivel del mar en el sector de Hanga Roa (en Mataverí). Y que abarcan un período de tiempo de 1964 al 2000. La totalidad de estos análisis se presenta en el anexo 1, y el procedimiento de muestreo y recomendaciones utilizado por la AIEA se detalla en el anexo 2.

2.3. Contenido de ^{18}O y D en las aguas subterráneas

Las muestras para la caracterización isotópica de ^{18}O y D de las aguas subterráneas fueron tomadas durante la campaña de terreno en mayo de 2002. En total son 16 muestras que involucran sondeos, pozos, tubos volcánicos y lagunas. Los análisis isotópicos, al igual que para las precipitaciones, fueron realizados en los laboratorios del CEDEX en Madrid, España. Los resultados obtenidos de estos análisis se presentan en la tabla 28.

Muestra	δD (‰) SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) SMOW	d (d = $\delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$)	Cota m.s.n.m.
M-7	-22,30	-2,95	1,30	30,7
M-13	-11,50	-2,77	10,66	21,3
M-19	-13,80	-2,81	8,68	33,18
M-21	-21,50	-2,93	1,94	61
M-24	-17,70	-2,75	4,30	42,57
M-23	-18,40	-3,16	6,88	95,95
M-25	-19,00	-2,85	3,80	43,09
M-26	-18,80	-3,00	5,20	64,55
M-27	-17,00	-2,97	6,76	65
V-1	-18,30	-3,00	5,70	2
V-3	-16,70	-2,98	7,14	2
C-1	-8,80	-2,31	9,68	115
C-2	-8,50	-1,92	6,86	110
C-3	-18,90	-3,45	8,70	350
L-1	-14,30	-2,79	8,02	300
L-2	-2,00	0,85	-8,80	120

Tabla 28. Concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ y δD en las aguas subterráneas de Isla de Pascua.
d = exceso de deuterio

2.4. Estudio de los contenidos de ^{18}O y D en la precipitación

Los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las muestras de lluvia recolectadas en la presente investigación, presentan grandes variaciones. En general, las muestras del sector de Hanga Roa son más pesadas isotópicamente que las del sector de Vaitea. Probablemente, debido a que en Hanga Roa la trayectoria de caída es mayor que en Vaitea, facilitando la evaporación de la lluvia, y de esta manera el enriquecimiento isotópico. Sin embargo, existen meses donde la situación es a la inversa.

Por otro lado, no se observa una tendencia o variación en el tiempo, en ninguno de los dos sectores, aunque el número de muestras es limitado para establecer una tendencia de este tipo. Además, no se poseen los valores de las cantidades de precipitación mensual, por lo que no es posible establecer si la variabilidad de los datos, está relacionada con las intensidades de ellas.

Como ya se mencionó en el capítulo 3, la cantidad de precipitaciones en Isla de Pascua se mantienen relativamente homogéneas durante todo el año, concentrándose principalmente en los meses de otoño. Las figuras 22 y 23 presentan la relación existente entre el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , frente a la cantidad de precipitación, mensual en mm, respectivamente.

En ambos gráficos se puede observar que existe una gran dispersión de los puntos. No obstante, y de acuerdo a la interpolación lineal por mínimos cuadrados, existe para ambos isótopos una leve tendencia (Coeficiente de determinación, R^2 , muy bajo) que señala un aligeramiento de los contenidos isotópicos a medida que las precipitaciones son más abundantes.

Sin embargo, hay que considerar, que las concentraciones isotópicas corresponden a la media mensual de las lluvias acumuladas en un mes, y por lo tanto, la precipitación mensual no reflejaría necesariamente la intensidad con la que ha caído la lluvia, debido a que ésta puede haber sido el resultado de pocas lluvias de gran intensidad o de varias de menor intensidad, efecto que en parte puede estar generando la gran dispersión de los puntos.

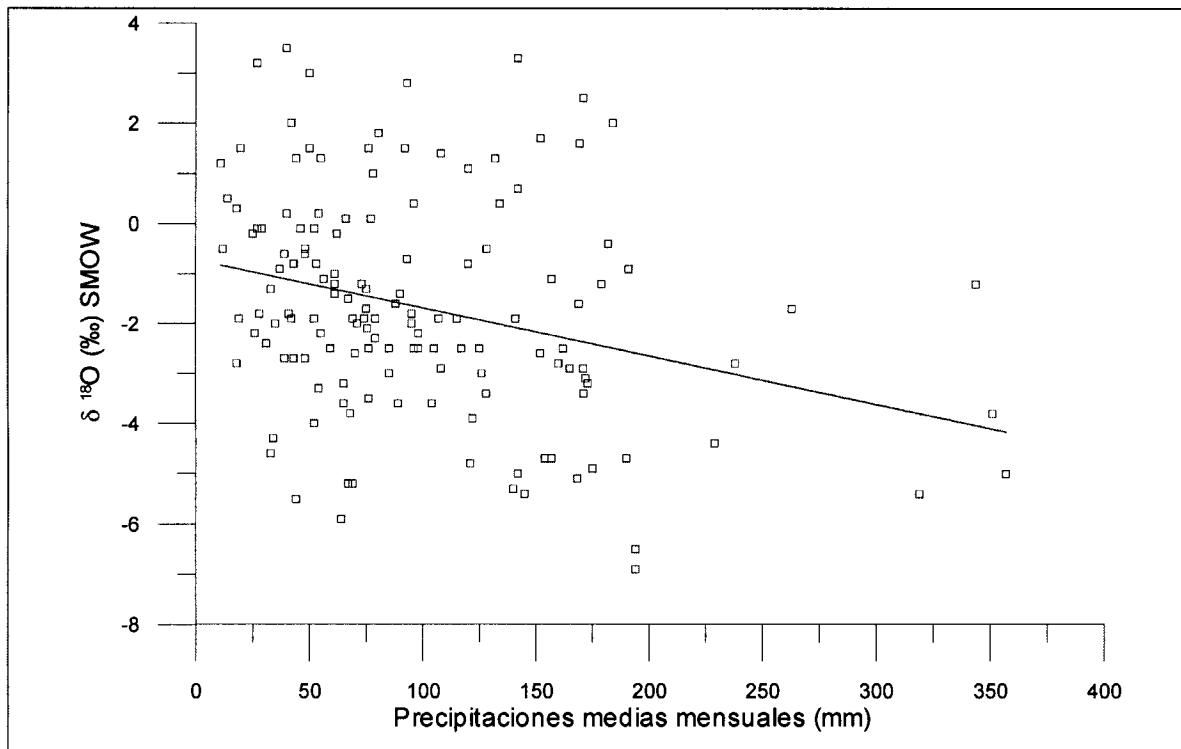


Figura 22. Relación entre el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y las precipitaciones mensuales de Isla de Pascua.

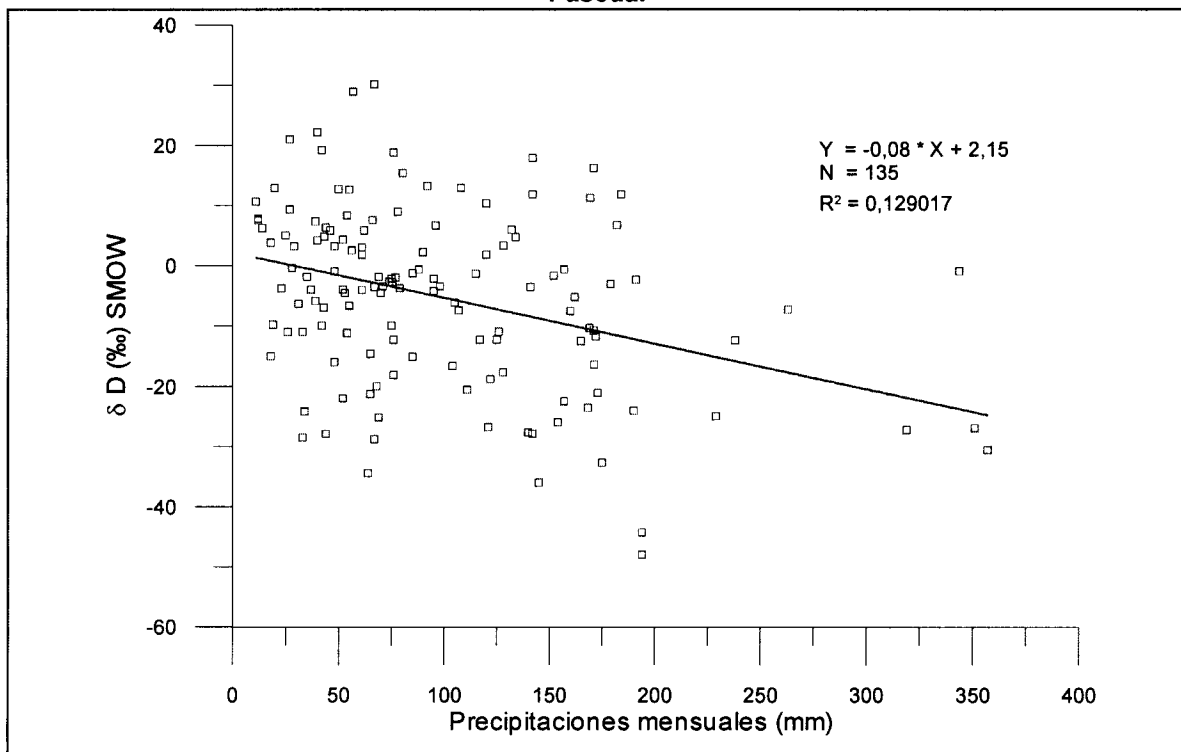


Figura 23. Relación entre el contenido de δD y las precipitaciones mensuales de Isla de Pascua.

La tabla 29 y la figura 24 exhiben parámetros estadísticos calculados para los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ de cada mes.

Los valores calculados más bajos para la media se presentan durante los meses de abril, mayo y octubre con valores cercanos a $-2,4\text{‰}$, mientras que los más altos se alcanzan en los meses de septiembre y noviembre con $-0,85$ y $-0,5\text{‰}$ respectivamente, además se observa que en general presentan un error que gira en torno a $0,6\text{‰}$ aproximadamente. Los valores de la mediana son en su mayoría algo más ligeros que los valores de la media, siendo los meses de junio y julio los que presentan la mayor variación que alcanza un máximo de $0,46\text{‰}$. La desviación típica presenta valores que fluctúan de un mínimo de $1,46\text{‰}$ en diciembre a un máximo de $2,76 \text{‰}$ en junio, con un promedio que alcanza a $2,16\text{‰}$.

Estadístico	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Media	-1,30	-1,98	-1,95	-2,42	-2,39	-1,34	-1,59	-2,16	-0,85	-2,45	-0,50	-1,20
Error	0,63	0,74	0,46	0,58	0,71	0,83	0,70	0,69	0,67	0,53	0,52	0,42
Mediana	-1,60	-2,05	-1,90	-2,50	-2,50	-1,80	-2,05	-1,85	-0,65	-2,55	-0,40	-1,55
Desv. típica	2,21	2,35	1,66	1,94	2,37	2,76	2,45	2,41	2,52	2,01	1,82	1,46
Máximo	3,20	1,80	1,50	1,40	2,00	2,50	3,30	1,60	3,50	0,20	2,80	1,30
Año	1996	2000	1998	1998	1998	1996	2000	1999	1992	1992	1965	1996
Mínimo	-4,60	-5,30	-4,90	-5,40	-5,50	-5,40	-5,10	-6,90	-5,00	-6,50	-4,30	-3,00
Año	1993	1992	1997	1997	1997	1991	2000	1997	1993	1993	1994	1995
Rango	7,80	7,10	6,40	6,80	7,50	7,90	8,40	8,50	8,50	6,70	7,10	4,30
Amplitud intercuartil	2,47	3,87	1,95	3,20	3,80	4,60	3,12	3,42	3,42	2,50	2,55	2,35
N	12	10	13	11	11	11	12	12	14	14	12	12

Tabla 29. Estadísticos para las concentraciones mensuales de $\delta^{18}\text{O}$ en las precipitaciones.

En casi todos los meses el rango de valores es de aproximadamente 7‰ a excepción del mes de diciembre que presenta un rango algo menor que sólo llega a $4,3\text{‰}$. Por otra parte, la amplitud intercuartil donde se concentra el 50% de las mediciones presenta un promedio cercano a $3,1\text{‰}$. Los principales valores máximos absolutos registrados (los más pesados) corresponden en orden decreciente a septiembre de 1992 con $3,5\text{‰}$, julio de 2000 con $3,3\text{‰}$ y enero de 1996 con $3,2\text{‰}$. En el caso de los valores mínimos absolutos registrados, es decir las muestras más livianas, éstas se presentan en agosto de 1997 con $-6,9\text{‰}$, octubre de 1953 con $-6,5\text{‰}$ y mayo de 1997. En la figura 24 se grafican además los valores atípicos (outliers en inglés) que corresponden a las muestras cuyos valores de $\delta^{18}\text{O}$ se encuentran entre 1,5 a 3 longitudes de caja (amplitud

intercuartil) desde el borde superior o inferior de la caja. Estas muestras son las de enero de 1996 con 3,2 ‰, marzo de 1998 con 1,5 ‰, abril de 1998 con 1,4 ‰ y octubre de 1993 con -6,5 ‰.

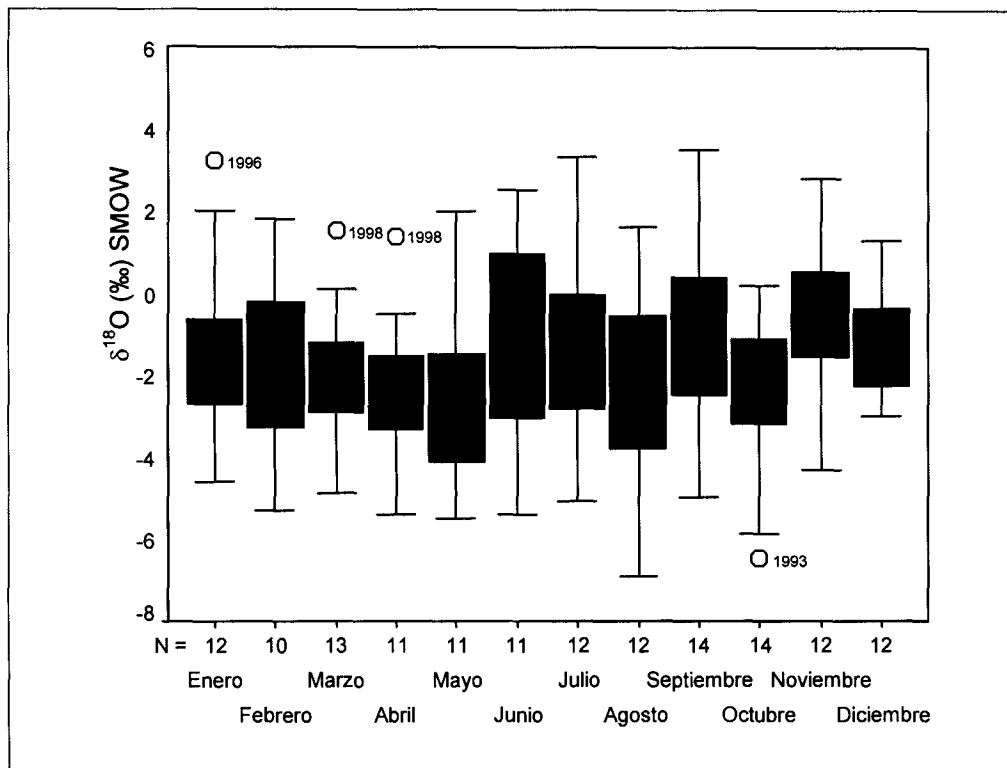


Figura 24. Diagrama de caja para los contenidos mensuales de δ¹⁸O en el agua de lluvia. Se grafica la mediana, el rango intercuartil (50% de I, el rango de datos y los valores atípicos representados por círculos junto al año en que se presentan. N = número de muestras.

De la misma forma que para el δ¹⁸O, se determinaron los valores estadísticos mensuales para los contenidos en la precipitación de δD. Estos se exponen a continuación en la tabla 30 y la figura 25.

La media presenta los valores más altos (más pesados) durante los meses de noviembre, diciembre y enero con -0,68, -1,11 y -1,75 ‰ respectivamente. En tanto los meses que exhiben las medias más pequeñas son octubre, agosto y mayo con valores de -10,65, -10,27 y -9,89 ‰. Los errores para este cálculo estadístico promedian los 4,6 ‰, con un máximo en junio de 6,07 ‰ y un mínimo en diciembre de 2,39 ‰. Los valores de la mediana, a diferencia de lo que ocurre con el δ¹⁸O, son levemente más pesados que los valores de la media, siendo los meses de octubre, noviembre y marzo los que presentan la mayor variación que

bordea los 4 ‰ aproximadamente. La desviación típica presenta valores que fluctúan de un mínimo de 7,95 ‰ en diciembre a un máximo de 20,13 ‰ en junio (los mismos meses que para el $\delta^{18}\text{O}$), con un promedio que alcanza a 14,6 ‰.

	Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Media	-1,75	-5,99	-6,91	-5,20	-9,89	-3,30	-5,64	-10,27	-2,95	-10,65	-0,68	-1,11
error	4,33	4,56	4,03	4,78	4,61	6,07	3,99	5,92	4,27	4,38	3,03	2,39
Mediana	-3,60	-4,30	-3,10	-5,75	-9,05	-1,70	-7,50	-7,25	-0,70	-6,40	3,20	-1,90
Desv. Tip.	14,38	14,44	13,39	16,58	14,60	20,13	13,83	18,72	15,41	15,80	10,07	7,95
Máximo	21,00	15,40	18,80	28,90	11,80	30,10	17,90	11,20	22,20	9,30	10,60	12,60
Año	1996	2000	1998	1972	1998	1973	1996	200	1999	1999	1993	1996
Mínimo	-28,50	-28,80	-32,70	-27,30	-27,90	-36,00	-26,80	-48,00	-30,60	-44,30	-24,20	-16,00
Año	1993	1996	1997	1997	1997	1991	1994	1997	1993	1993	1994	1991
Rango	49,50	44,20	51,50	56,20	39,70	66,10	44,70	59,20	52,80	53,60	34,80	28,60
Amplitud intercuartil	17,50	21,90	17,30	24,47	24,15	33,50	20,27	29,80	22,85	22,30	10,60	7,90
N	11	10	11	12	10	11	12	10	13	13	11	11

Tabla 30. Estadísticos para las concentraciones mensuales de δD en las precipitaciones.

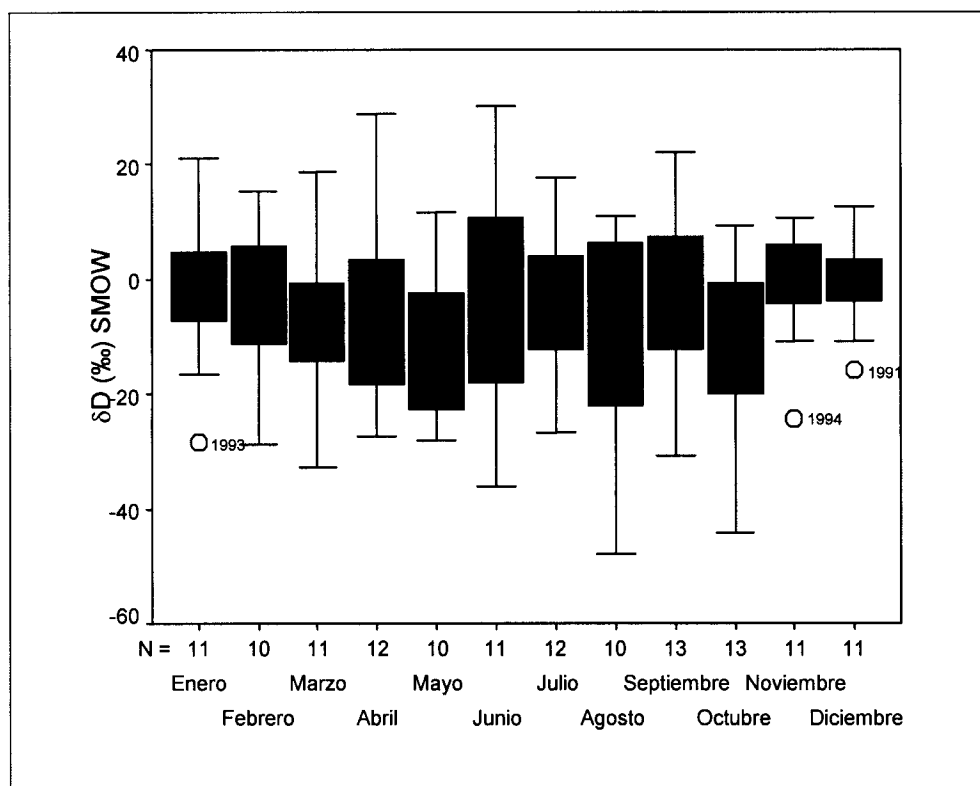


Figura 25. Diagrama de caja para los contenidos mensuales de δD en el agua de lluvia. Se grafica la mediana, el rango intercuartil, el rango de datos y los valores atípicos representados por círculos junto al año en que se presentan. N = número de datos.

En general, el rango de valores mensuales tiene un promedio de 48,4 unidades con un máximo en junio de 66,1 ‰ y una variación mínima para el mes de diciembre de 28,6 ‰. Asimismo, la amplitud intercuartil presenta un promedio que alcanza a 20 ‰ aproximadamente. Además, los principales valores máximos absolutos registrados (los más pesados) corresponden a junio de 1973 con 30,1 ‰, abril de 1972 con 28,9 ‰ y septiembre de 1999 con 22,2 ‰. En el caso de los valores mínimos absolutos registrados, es decir las muestras más livianas, éstas se presentan en agosto de 1997 con -48,0 ‰, octubre de 1993 con -44,3 ‰ y junio de 1991 con -36,0. Los valores atípicos para los contenidos de δD se grafican en la figura 25 y corresponden a las muestras de enero de 1993 con -28,5 ‰, noviembre de -24,2 y diciembre de 1991, con -16,0 ‰.

Para la obtención de un valor representativo de la composición isotópica del agua lluvia, se calculó mediante el software S.P.S.S. 8.0 algunos estimadores robustos centrales para los pares de datos de $\delta^{18}O$ y δD (131 en total). Estos estimadores son alternativas robustas a la mediana y a la media de los datos que se utilizan para determinar el centro de la localización. Los estimadores calculados se diferencian por las ponderaciones que aplican a los casos.

La tabla 31 muestra los resultados obtenidos para los siguientes estimadores: el estimador-M de Huber, el estimador bponderado de Tukey, el estimador-M redescendente de Hampel y el estimador en onda de Andrews, además de la media y la mediana ya calculadas.

Mes	Media		Mediana		Estimador-M de Huber		Bponderado de Tukey		Estimador-M de Hampel		Onda de Andrews	
	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD
Enero	-1,30	-1,75	-1,60	-3,60	-1,314	-2,2573	-1,4691	-2,5647	-1,4353	-1,9142	-1,4652	-2,4132
Febrero	-1,98	-5,99	-2,05	-4,30	-2,0196	-4,6094	-2,0559	-4,3322	-2,0207	-4,7454	-2,0554	-4,3558
Marzo	-1,95	-6,91	-1,90	-3,10	-2,0697	-6,2299	-2,1331	-6,2218	-2,0774	-6,8362	-2,1369	-6,1495
Abril	-2,42	-5,20	-2,50	-5,75	-2,5256	-7,2779	-2,6100	-7,6081	-2,5229	-8,2263	-2,6086	-7,6073
Mayo	-2,39	-9,89	-2,50	-9,05	-2,6952	-10,8204	-2,6262	-10,2847	-2,5556	-9,8900	-2,6246	-10,2843
Junio	-1,34	-3,30	-1,80	-1,70	-1,6817	-3,1186	-1,6519	-3,5812	-1,6333	-4,0741	-1,6521	-3,5917
Julio	-1,59	-5,64	-2,05	-7,50	-2,1829	-8,3256	-2,3469	-11,2204	-2,4231	-9,1435	-2,3315	-11,2348
Agosto	-2,16	-10,27	-1,85	-7,25	-2,1970	-8,0367	-2,1750	-7,8450	-2,2115	-8,6652	-2,1765	-7,8646
Sep.	-0,85	-2,95	-0,65	-0,70	-1,0751	-1,5722	-1,1616	-1,3024	-1,1530	-2,1481	-1,1817	-1,3146
Oct.	-2,45	-10,65	-2,55	-6,40	-2,1739	-8,3253	-2,0433	-7,6295	-2,1521	-8,7120	-2,0456	-7,6318
Nov.	-0,50	-0,68	-0,40	3,20	-0,6889	1,2346	-0,5417	2,2230	-0,6530	1,2877	-0,5400	2,2204
Dic.	-1,20	-1,11	-1,55	-1,90	-1,3370	-0,5578	-1,4852	-0,5394	-1,2885	-0,7790	-1,4855	-0,5424

Tabla 31. Estimadores robustos centrales para los datos de $\delta^{18}O$ y δD

Las constantes de ponderación son 1,339 para el estimador Huber, 4,685 para Tukey, 1,700, 3,400 y 8,500 para Hampel y $1,340 \cdot \pi$ para el estimador de Andrews.

En general, el valor obtenido para estos estimadores resulta ser levemente más ligero, tanto para los valores de $\delta^{18}\text{O}$ como de δD . Esto debido a que las muestras que han sufrido procesos de evaporación al estar más alejadas de los valores medios, presentan una ponderación menor.

2.5. Relación con la altitud

Las muestras de agua lluvia tomadas en el marco de esta investigación, corresponden a puntos de distinta elevación topográfica y distinta distancia respecto al mar (Figura 7). Estas muestras, presentan una variación muy amplia, tanto en los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$, que van de -20,10 ‰ a 1,9 ‰, como para los de δD , que varían de 15,4 ‰ a 3,4 ‰. Sin embargo, de acuerdo al promedio de su contenido, las lluvias recolectada en Vaitea, a 170 m. s. n. m. son más ligeras que las lluvias de Hanga Roa, ubicada tan sólo a 40 m. s. n. m. Este comportamiento puede ser considerado como el "normal" para estos isótopos ya que está acorde a la situación geográfica de estos dos sectores.

En cuanto a las muestras provenientes de la base de datos de la AIEA, éstas han sido recolectadas en la misma estación y, por lo tanto, a una misma cota, no pudiendo establecer una relación de los contenidos isotópicos con la altitud.

Con el objeto de establecer un gradiente altitudinal local, además de considerar el contenido isotópico medio del agua de lluvia de los dos sectores, se han tomado en cuenta las muestras provenientes de los tubos volcánicos, ya que por sus características, la cota a la que fueron recolectadas representan aproximadamente la altura a la cual se produce la recarga.

En la figura 26 se grafica la relación entre la altitud y el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ de todas las muestras. También se han representado, por interpolación lineal de mínimos cuadrados, las rectas altitudinales resultantes para el promedio del contenido en las lluvias, en los tubos volcánicos y en los sondeos.

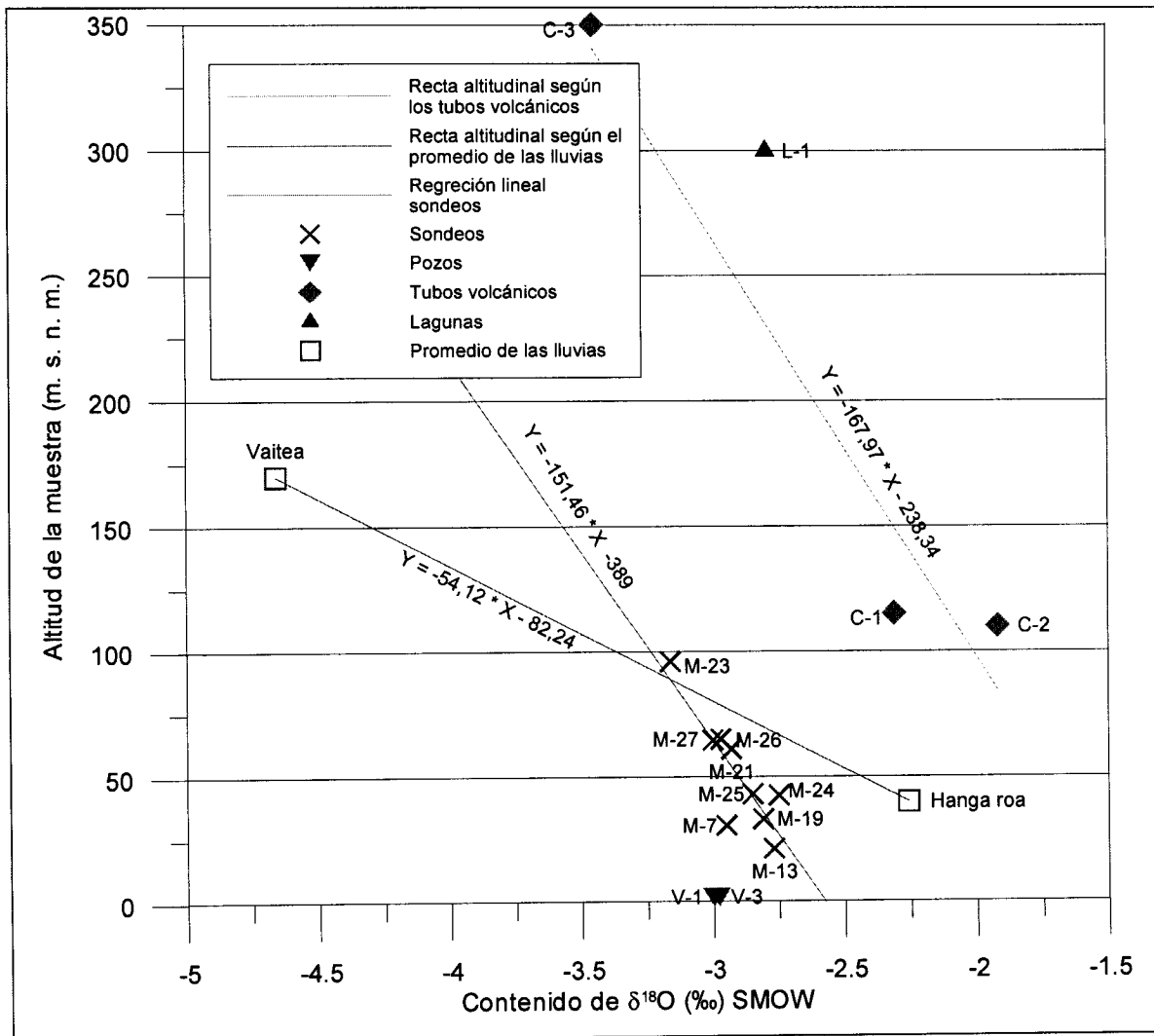


Figura 26. Rectas altitudinales locales obtenidas para el $\delta^{18}\text{O}$ a partir de las muestras de agua lluvia, tubos volcánicos y el conjunto sondesos.

Como se observa en la figura 26, las rectas altitudinales generadas según los distintos tipos de muestras son:

- a. Muestras agua lluvia: $Y = -54,12 * X - 82,24$
- b. Muestras de tubos volcánicos: $Y = -167,97 * X - 238,34$
- c. Sondesos: $Y = -151,46 * X - 389$ ($R^2 = 0,72$)

Donde Y = cota topográfica de la muestra; y X = $\delta^{18}\text{O}$ (‰).

Con excepción de la recta generada por las muestras de lluvia, la regresión de los sondesos y tubos volcánicos poseen una pendiente (coeficiente angular) muy similar. De esta forma, los gradientes altitudinales calculados en ‰ cada 100

metros son: de -0,82 según las aguas de lluvia, -2,38 de acuerdo a los tubos volcánicos y -3,89 según los sondeos.

Las zonas de recarga según estas rectas serían aproximadamente las siguientes:

- La recta altitudinal, calculada a partir de los tubos volcánicos, varía entre los 200 y 225 metros para las muestras M-13, M-24 y M-19; y alrededor de 300 metros para la muestra M-23. El resto de las muestras cae dentro de este intervalo.
- Para el caso de la recta generada por los sondeos, si se considera que las muestras provienen del nivel freático, y que éste se alza unos pocos metros sobre el nivel del mar, la cota de recarga sería aproximadamente la misma altura topográfica del sondeo.
- Y, para la recta del promedio de las lluvias, la zona de recarga se encontraría, entre los 75 y 100 metros.

Estas rectas y los gradientes altitudinales calculados, corresponden a valores de referencia, ya que por ejemplo, en el caso de las aguas de lluvias, éstas presentan una gran variabilidad, y sus medidas (y los promedios de ellas) pueden estar afectados por diferentes factores, como diferencias en la intensidad de la precipitación y/o errores inherentes al muestreo. Sin embargo, aportan una primera aproximación.

2.6. Estudio de la relación $^{18}\text{O}/\text{D}$ en la precipitación

La figura 27, presenta la relación $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ para todos los análisis isotópicos obtenidos de la base de datos de la AIEA, junto a las muestras de precipitación de esta investigación. En el caso de las primeras muestras, estas se han diferenciado de acuerdo al volumen de las precipitaciones mensuales en tres grupos: menos de 73 mm, entre 73 y 130 mm y mayor a 130 mm. Estos intervalos se establecen a partir de los meses con menor y mayor precipitación. Además se grafica la línea meteórica mundial (LMM) que esta definida por la recta $\delta\text{D} = \delta^{18}\text{O} * 8 + 10$.

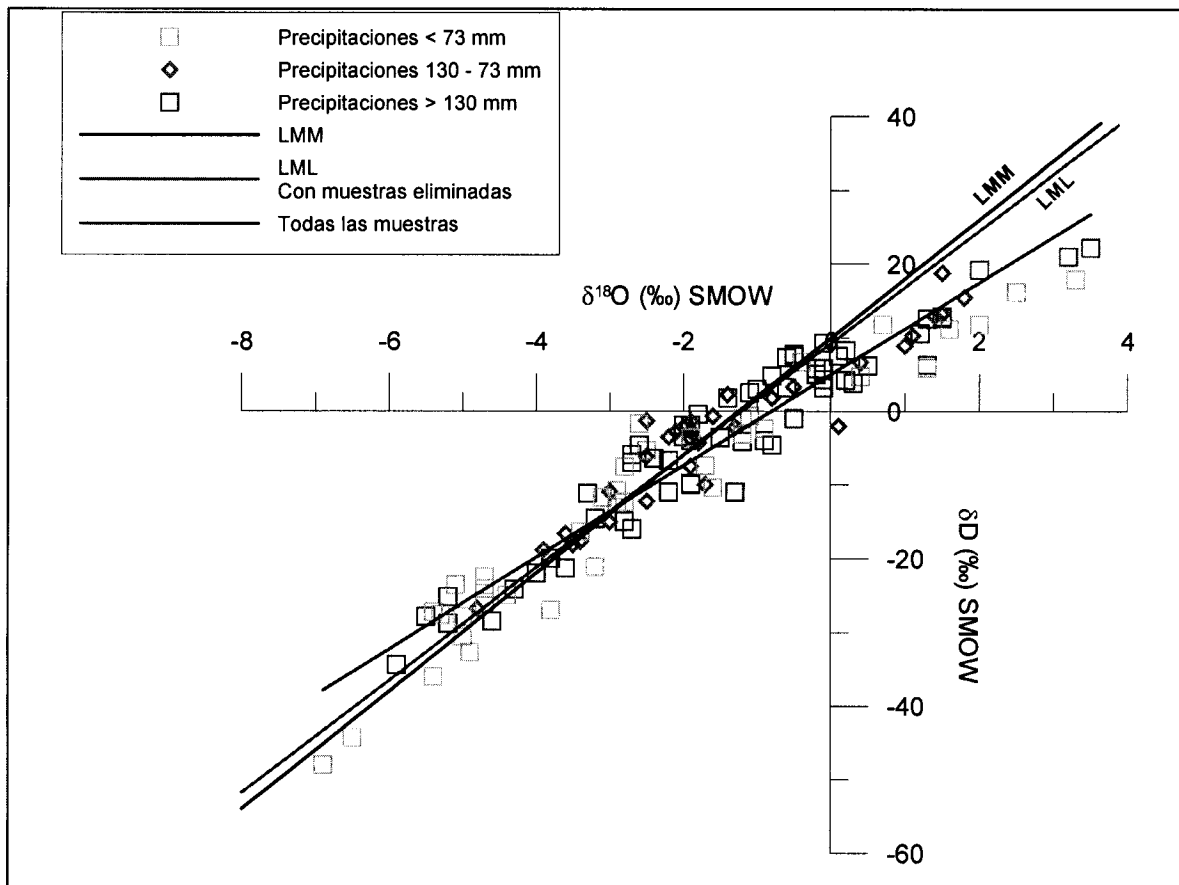


Figura 27. Relación $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ (‰) SMOW para las precipitaciones de Isla de Pascua

Como se puede observar, las muestras recolectadas en la presente investigación, no tienen una distribución definida. Presentándose más bien dispersas, quedando incluso algunas muestras fuera del área del gráfico.

Las muestras obtenidas de la base de datos de la AIEA se distribuyen a lo largo de la recta determinada por la ecuación $\delta\text{D} = 6,22 * \delta^{18}\text{O} + 5,02$, que se determinó por interpolación lineal por mínimos cuadrados, y que presenta un coeficiente de determinación (R^2) de 0,92. Esta recta obtenida para el conjunto total de precipitaciones presenta una pendiente ligeramente más suave en comparación a la línea meteórica mundial. Sin embargo, hay que tener en cuenta que está fuertemente influenciada por muestras que han sufrido un marcado enriquecimiento por evaporación.

Como ya se mencionó, se observa que las muestras no presentan una clara relación entre los contenidos isotópicos y el volumen de precipitación caída. De

esta forma las muestras cuyas precipitaciones mensuales son inferiores a 73 mm (media mensual más pequeña, mes de octubre) presentan una distribución muy similar a las muestras cuyas precipitaciones mensuales son superiores a 130 mm (media mensual más grande, mes de mayo). Lo mismo sucede para las muestras con valores de precipitaciones mensuales intermedias.

La línea meteórica loca (LML), de la figura 27, se obtuvo sesgando los datos de aquellas muestras que presentaban posibles signos de evaporación, Utilizando sólo aquellas cuyo exceso de deuterio ($d = \delta D - 8 * \delta^{18}O$) se encuentra en un rango de 5 a 10. De esta forma, la LML resultante tiene por ecuación $\delta D = 7,6 * \delta^{18}O + 9,2$. Con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,95.

2.7. Estudio de la relación del $^{18}O/D$ en las aguas subterráneas

En la figura 28 se grafica la relación $\delta^{18}O/\delta D$ para las muestras de aguas subterráneas de Isla de Pascua, y se comparan con la línea meteórica mundial ($\delta D = 8 * \delta^{18}O + 10$) y la línea meteórica local ($\delta D = 7,6 * \delta^{18}O + 9,2$).

En general, se observa que la mayoría de las muestras se ubican bajo la línea meteórica mundial y local. En el caso de las muestras tomadas de los sondeos se aprecia que presentan valores de $\delta^{18}O$ relativamente homogéneos entre si, que oscilan entre -2,75 ‰ para la muestra M-24 y -3,16 ‰ para la muestra M-23. Por su parte, los contenidos de δD presentan una mayor dispersión siendo los valores extremos -11,5 y -22,3 ‰ para las muestras M-13 y M-7 respectivamente. Estas muestras se pueden subdividir en tres grupos: el primero constituido por las muestras M-7 y M-21 que son las que presentan los contenidos mas bajos de $\delta^{18}O$, un segundo grupo conformado por las muestras M-23, M-24, M-25, M-26 y M-27 con valores intermedios y un tercero formado por las muestras M-19 y M-13 con los valores más altos de $\delta^{18}O$. Las muestras obtenidas de los pozos V-1 y V-3, presentan un contenido isotópico muy similar entre si y son levemente más ligeras que las muestras del segundo grupo de sondeos mencionado anteriormente. En el caso de las muestras extraídas de los tubos volcánicos, se aprecia que éstas se encuentran ubicadas prácticamente paralelas a la línea meteórica mundial, pero levemente por debajo de ella. Estas se presentan en dos grupos: el primero

conformado por las muestras C-1 y C-2, con contenidos de $-1,92$ y $-2,31$ ‰ para el $\delta^{18}\text{O}$ y de $-8,8$ y $-8,5$ ‰ para el δD , siendo marcadamente más pesadas que la muestra C-3 con solo $-3,45$ ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y $-18,9$ ‰ de δD (la muestra más ligera). Las muestras correspondientes a las lagunas presentan composiciones isotópicas muy distintas. La muestra L-1 con contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ de $-2,79$ ‰ y de δD de $-14,3$ ‰ se ubica levemente bajo la línea meteórica mundial y es muy similar a la muestra M-13 de los sondeos. Por otra parte, la muestra L-2 es la que presenta los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD más altos de todas, debido a que posiblemente se ha enriquecido isotópicamente por evaporación.

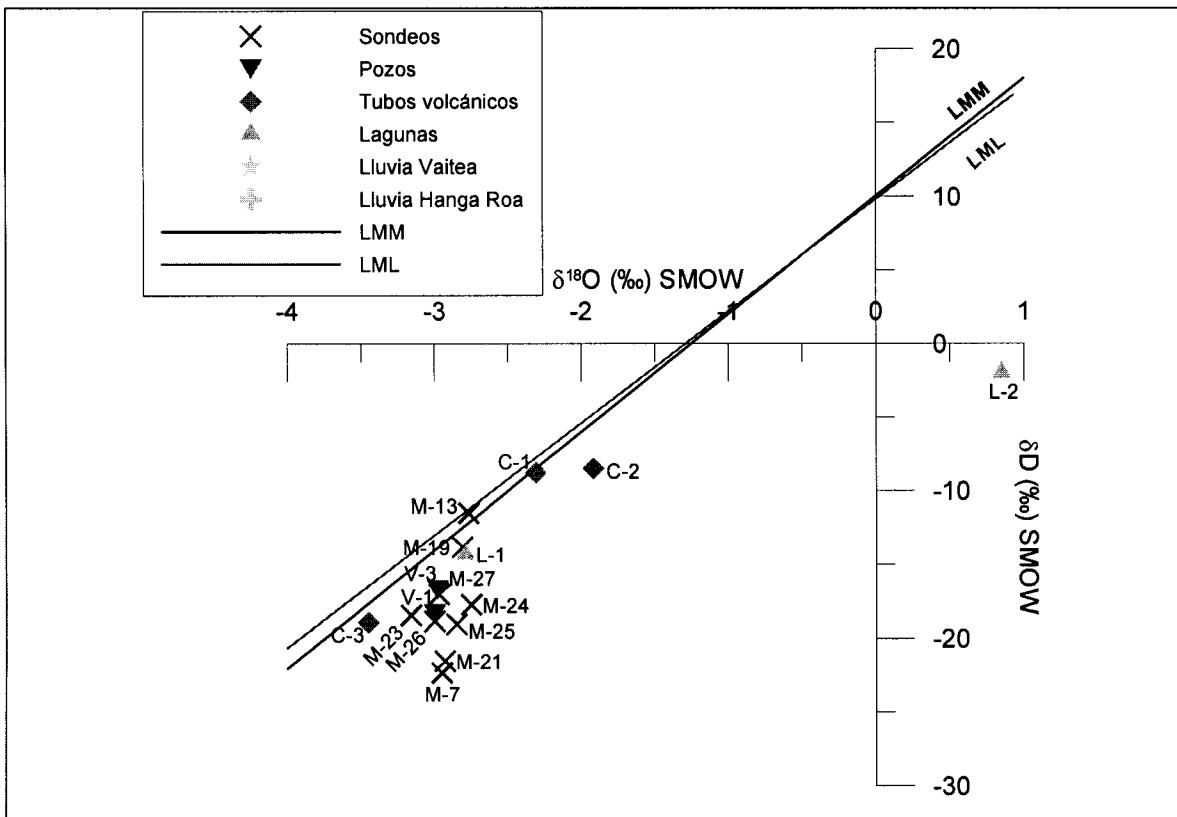


Figura 28. Relación $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ (‰) SMOW para las muestras de aguas subterráneas de Isla de Pascua

3. ISÓTOPOS RADIOACTIVOS. TRITIO

3.1. Características generales del tritio

El tritio (^3H o T) es un isótopo radioactivo del hidrógeno que presenta una vida media de 12,26 años, y cuya unidad de medida es la unidad de tritio (UT) que corresponde a un átomo de tritio por cada 10^{18} átomos de hidrógeno.

Este isótopo es producido naturalmente en la estratosfera por interacción de los rayos cósmicos con el oxígeno y el nitrógeno. Sin embargo, la fuente más importante para los estudios modernos corresponde al tritio formado artificialmente como resultado de las explosiones termonucleares realizadas durante los años 1952 y 1969, que elevaron los contenidos de tritio hasta alcanzar valores de 10.000 UT en algunas localidades del hemisferio norte. (Custodio y Llamas, 1986) Una de las principales aplicaciones del tritio es la estimación del tiempo de permanencia o de renovación del agua subterránea. Ya que una vez creado reacciona rápidamente formando ^3HOH y como tal entra a formar parte del ciclo hidrológico incorporado en la precipitación. En el agua subterránea no es afectado significativamente por los procesos químicos. Y si una vez producida la recarga el agua queda aislada en el subsuelo la concentración de tritio disminuye de acuerdo a su período de vida media. No obstante, en la datación es necesario considerar además los procesos de flujo y dispersión hidrodinámica.

En el presente trabajo se realiza un estudio del contenido de tritio en las precipitaciones y en las aguas subterráneas. Y mediante la utilización de distintas funciones de entrada se realiza una primera aproximación a los tiempos de residencia de las aguas subterráneas en distintos puntos de la isla, mediante la utilización del código MULTIS.

3.2. Contenido de tritio en la precipitación

Los datos utilizados para el estudio de los contenidos de tritio en la precipitación de Isla de Pascua fueron tomados, al igual que para el estudio de isótopos estables, de la base de datos GNIP/ISOHIS de la AIEA. Estos datos corresponden a la concentración promedio de tritio (en UT) de las precipitaciones mensuales (salvo algunas excepciones en que corresponden al promedio trimestral). En total, son 198 datos de tritio que han sido recolectados en distintos lapsos de tiempo comprendidos desde 1964 hasta el año 2000. (Ver anexo 1).

Para la utilización del código MULTIS en la interpretación del tiempo medio de residencia de las aguas subterráneas, es necesario definir una función de entrada con datos desde 1954 a la fecha, que refleje de la forma más completa y

representativa los contenidos de tritio en las precipitaciones. Para tal efecto, los datos disponibles (que generalmente por diversos motivos se encuentran incompletos), deben ser complementados con información de otras estaciones de la AIEA que presenten características similares, o bien, si no se dispone de información para un lugar específico, realizar correlaciones con las estaciones más cercanas (de preferencia aquellas de similar latitud y clima).

En el caso de Isla de Pascua, los datos fueron completados recopilando información de la estación ubicada en las Islas Cook pertenecientes a Nueva Zelanda ($21^{\circ} 2'$ de latitud sur, $159^{\circ} 8'$ de longitud oeste) (Ver figura 1, capítulo 1). Esta es la estación más cercana a Isla de Pascua que posee la AIEA; sin embargo, presenta características similares en lo que respecta a su carácter oceánico y en cuanto a su ubicación geográfica. Los contenidos isotópicos para esta estación se presentan en el anexo 3.

La figura 29 grafica los contenidos de tritio en las precipitaciones y su distribución en el tiempo, para las estaciones de Isla de Pascua y de las Islas Cook. En ella se observa cómo los contenidos de tritio se comportan de forma similar para estas dos estaciones. Primero comienzan con un rápido aumento en los contenidos de tritio, que alcanzan sus valores más elevados en la década de los años 60' aproximadamente. Cabe señalar, que estos valores llegan a superar las 100 UT y coinciden con el período de ensayos termonucleares realizados en el hemisferio norte. Posteriormente, de la década de los 70' a los 90' se presenta un descenso paulatino en los contenidos de tritio, con variaciones que corresponden más bien a cambios estacionales. Para este período de tiempo los datos de Isla de Pascua son prácticamente nulos; sin embargo, se encuentra bien documentado para las Islas Cook. De los años 90' en adelante se observa un leve incremento en los contenidos de tritio, presentándose claramente 3 picos: el primero en 1991 con 13,4 UT que se presenta tanto en Isla de Pascua como en las Islas Cook y los otros dos en enero y julio de 1996 con 23,6 y 24,4 UT respectivamente. Estos dos últimos picos no se alcanzan a registrar para los datos de las Islas Cook que solamente llegan hasta 1994. El origen de estas anomalías en el registro no es

claro ya que no se conocen todos los antecedentes de ensayos atómicos durante ese período de tiempo (desde 1990 a 2002).

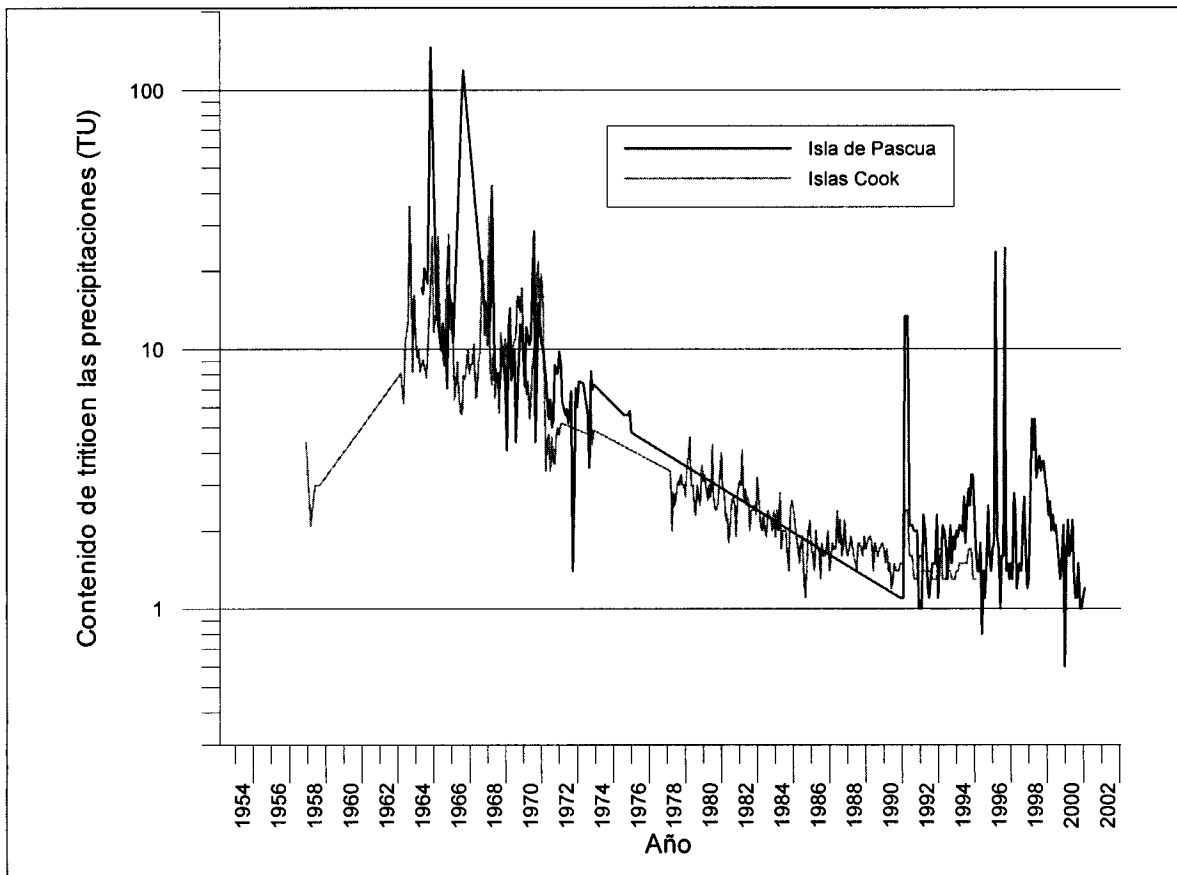


Figura 29. Contenidos de tritio en la lluvia para las estaciones de Isla de Pascua e Islas Cook (Nueva Zelanda)

3.3. Contenido de tritio en las aguas subterráneas

Las muestras para el análisis de tritio de las aguas subterráneas fueron obtenidas durante la campaña de terreno en mayo de 2002. En total son 14 análisis que involucran muestras de sondeos, pozos, tubos volcánicos y lagunas. Todas las muestras fueron analizadas en los laboratorios del CEDEX en Madrid, España.

Los resultados obtenidos de estos análisis se presentan en la tabla 32. En ella se observa que las muestras que presentan un mayor contenido de tritio corresponden a las muestras provenientes de los tubos volcánicos con valores superiores a 1,22 UT y un máximo en la muestra C-3 con 1,77 UT. Las muestras pertenecientes a los sondeos, presentan en general una concentración de tritio que es mayor para muestras ubicadas al este de la Isla (M-19, M-24 y M-23) y

menor para las muestras del oeste (M-25, M-26, M-21, M-7 y M-27). Las muestras de la laguna (L-2) y del pozo presentan valores intermedios. Para todas las muestras el error de medición varía entre el rango de ± 32 a ± 39 UT.

Muestra	Tritio UT	Error UT	Nivel estático metros	Cota m. s. n. m.
M-7	0,69	$\pm 0,35$	30,2	64,55
M-13	0,86	$\pm 0,32$	19,75	30,7
M-19	1,09	$\pm 0,37$	13,34	21,3
M-21	0,70	$\pm 0,34$	31,35	14,91
M-24	1,07	$\pm 0,36$	60,3	33,18
M-23	1,07	$\pm 0,32$	41,6	61
M-25	0,72	$\pm 0,34$	94,7	42,57
M-26	0,77	$\pm 0,34$	42,3	95,95
M-27	0,61	$\pm 0,33$	62,2	43,09
V-3	1,00	$\pm 0,35$	-	2
C-1	1,24	$\pm 0,36$	-	115
C-2	1,77	$\pm 0,39$	-	110
C-3	1,21	$\pm 0,37$	-	350
L-2	0,95	$\pm 0,35$	-	120

Tabla 32. Contenido de Tritio (UT) para distintas muestras de aguas subterráneas de Isla de Pascua

3.4. Tiempo de residencia de las aguas

3.4.1. Código MULTIS

En el cálculo del tiempo medio de residencia de las aguas se ha utilizado el código MULTIS. Dicho código ha sido desarrollado para la interpretación de datos isotópicos ambientales en estudios hidrogeológicos; y se basa en la utilización y combinación de distintos modelos de mezcla y dispersión de fluidos en los acuíferos, a partir de una función de entrada que puede contener los datos de forma mensual como anual; considerando al sistema acuífero como un medio homogéneo donde no existen fenómenos de retraso y donde la solución se realiza en sistema estacionario. Los cuatro modelos básicos ocupados son: el modelo exponencial (o modelo de mezcla total), modelo lineal, modelo de flujo pistón y modelos de dispersión, que combinados en serie o en paralelo, producen más de

30 modelos diferentes. Este código permite dos formas de trabajo: Problema directo y problema inverso. El problema directo permite obtener diferentes funciones de salida teórica, a partir de la función de entrada utilizada, para un modelo de flujo determinado al que se le asignan parámetros específicos; el problema inverso permite obtener para un determinado conjunto de datos isotópicos, cuales son los parámetros, para un modelo de flujo determinado, con una menor desviación entre la función de salida teórica y la real. En la presente investigación se han utilizado ambas formas de cálculo.

3.4.2. Función de entrada

La función de entrada utilizada por el código MULTIS requiere datos mensuales o anuales desde 1954. Como ya se mencionó, los datos ausentes para la Isla de Pascua fueron completados utilizando la información procedente de las Islas Cook. De esta forma los contenidos de tritio en el agua de lluvia para la función de entrada obtenida tienen las siguientes procedencias:

1. De octubre de 1957 a febrero de 1964: Islas Cook
2. De marzo de 1964 a octubre de 1973: Isla de Pascua
3. De junio a noviembre de 1975: Isla de Pascua
4. De enero de 1978 a septiembre de 1990: Islas Cook
5. Y de octubre de 1990 a diciembre de 2000: Isla de Pascua

Sin embargo, existen periodos de tiempo donde no se tienen datos para ninguna de las dos estaciones. En estos casos los datos que están ausentes se completaron por interpolación lineal simple.

La función de entrada para que sea más representativa debe ser ponderada de acuerdo a las precipitaciones, o mejor aún a la recarga de la zona. Con este procedimiento se asegura que los contenidos de tritio de precipitaciones de mayor volumen presenten mayor peso frente a los contenidos registrados en precipitaciones de menor intensidad. La expresión utilizada para este efecto es:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

Donde C_i y P_i corresponden a las concentraciones mensuales de tritio y a las precipitaciones mensuales respectivamente.

La ponderación se efectuó según los datos de precipitación presentes en la base de datos GNIP/ISOHIS de la AIEA. Sin embargo, del año 1953 a 1963 y de 1976 a 1987, no se dispone de esta información por lo que para estos períodos de tiempo se utilizaron las precipitaciones medias mensuales obtenidas de la tabla 6 del capítulo 3.

La figura 30 grafica las 2 funciones de entradas resultantes: una con base mensual sin ponderar y otra con base anual ponderada. El detalle de las funciones de entrada utilizadas se indica en el anexo 4.

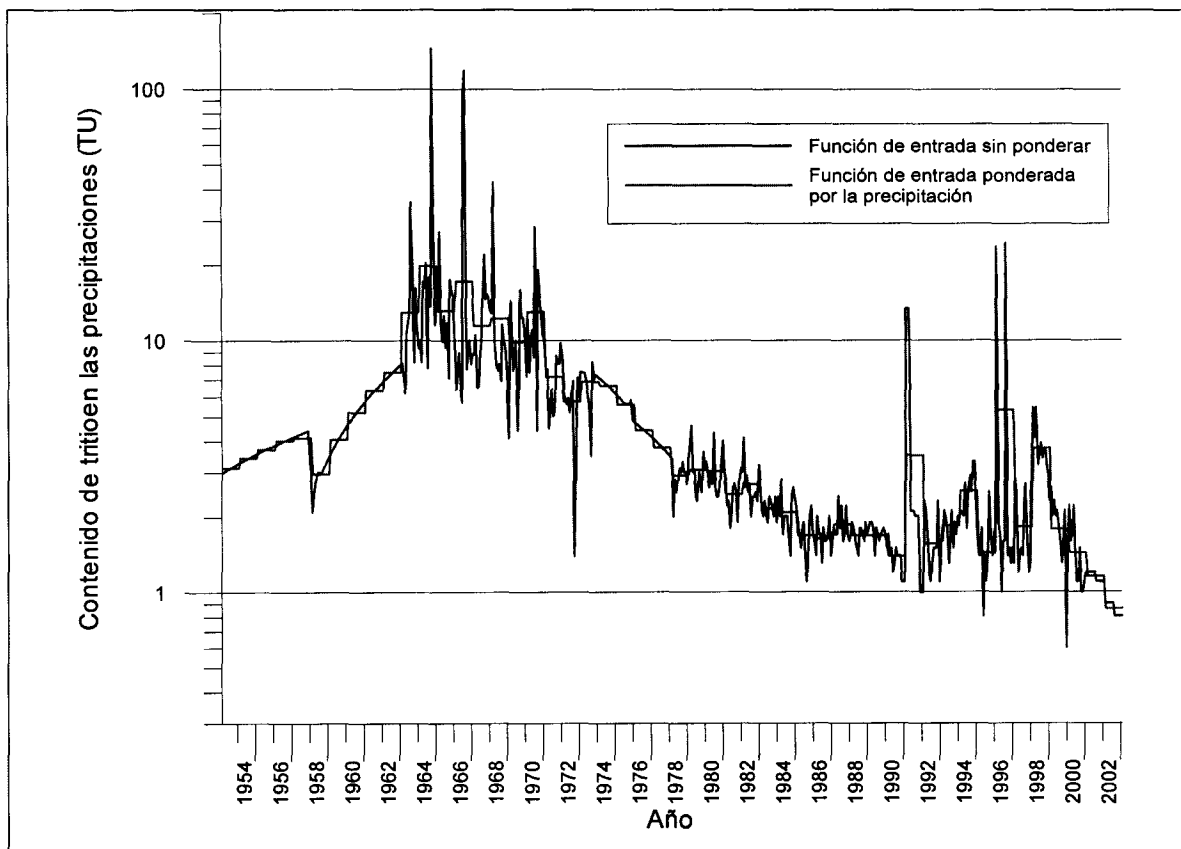


Figura 30. Funciones de entrada para los contenidos de tritio de las lluvias de Isla de Pascua

Se observa como al ponderar la función de entrada original esta es suavizada (disminución de lo picos de tritio). Sin embargo, mantiene una buena correspondencia producto de que las lluvias de isla de pascua son relativamente homogéneas.

3.4.3. Modelos (matemáticos) de Flujo

En la utilización del código MULTIS, lo primero que se debe realizar es una conceptualización del problema, de acuerdo a las características del área de estudio. Según el planteamiento que se haga, se escoge un modelo de flujo.

Un modelo matemático de flujo, consiste en una fórmula o ecuación que expresa una serie de principios físicos, cuyos valores o parámetros, explican el comportamiento de un sistema. Los modelos de flujo básicos son:

a) Modelo Exponencial (EM) o de mezcla total.

La figura 31 muestra un diagrama que representa el modelo de flujo exponencial. En él se establece que la superficie de recarga es infinita sobre el acuífero, lo que implica que el agua subterránea resultante contiene infinitas proporciones de aguas recargadas en todos los tiempos. La sección del acuífero es constante, mientras que la velocidad del flujo aumenta hacia el pozo de bombeo. La distribución exponencial del tiempo de residencia implica que las componentes más jóvenes muestran un mayor peso, de forma exponencial, en la composición del agua mezclada.

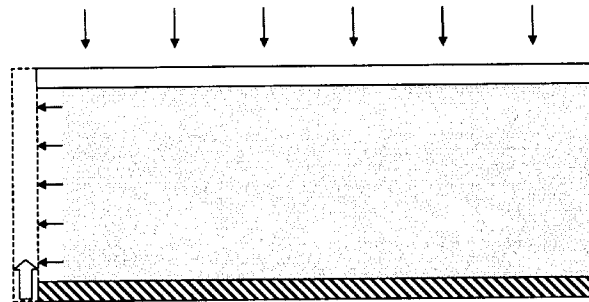


Figura 31. Diagrama de bloque para el modelo de flujo exponencial (EM).

b) Modelo de flujo lineal (LM)

El diagrama de la figura 32, representa el modelo de flujo lineal (LM). La superficie de recarga también se presenta infinita, lo que implica que el agua subterránea resultante contiene infinitas proporciones de aguas recargadas en todos los tiempos. La sección del acuífero aumenta en dirección del pozo de bombeo, mientras que la velocidad del flujo es constante. Se produce una mezcla lineal del agua recargada, lo que causa que todos los componentes de la mezcla tengan el mismo peso en cuanto a edad.

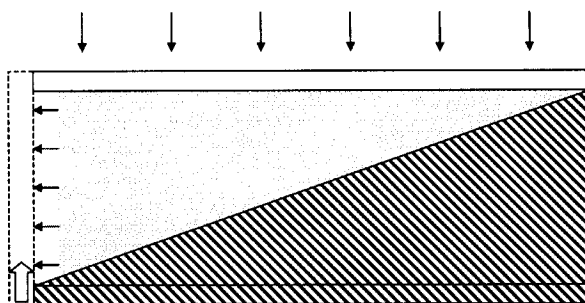


Figura 32. Diagrama de bloque para el modelo de flujo lineal (LM)

C) Modelo de Flujo Pistón (PM)

Este modelo presenta una pequeña superficie de recarga. La evolución de la concentración del trazador (en este caso tritio) sólo depende de su periodo de desintegración. No se produce mezcla (no hay dilución). El flujo es puramente por advección. La figura 33 presenta el diagrama esquemático del flujo pistón.

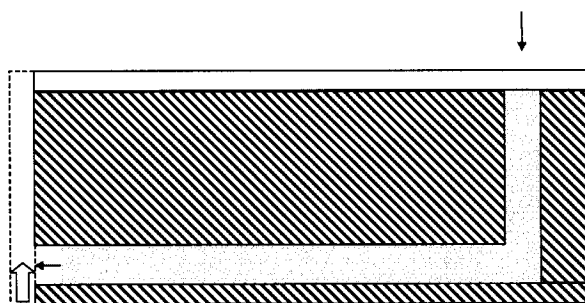


Figura 33. Diagrama de bloque para el modelo de flujo pistón (PM)

En todos los modelos descritos, el parámetro necesario para obtener una función de salida es el tiempo medio de residencia. La combinación en serie o en paralelo de estos modelos en distintas proporciones genera numerosos modelos que pueden representar con mayor fidelidad, distintas situaciones hidrogeológicas. Por ejemplo, en la figura 34 se presenta a) una conexión en serie de un EM con un PM. (EPMs) y b) una conexión en serie de un LM con un PM (LPMs).

La figura 35, en tanto, muestra un ejemplo de las características que presentan las distintas funciones de salida obtenidas mediante la aplicación del problema directo en los tres modelos de flujo básicos, para un tiempo medio de residencia de las aguas de 20 años, considerando la función de entrada para Isla de Pascua con base anual.

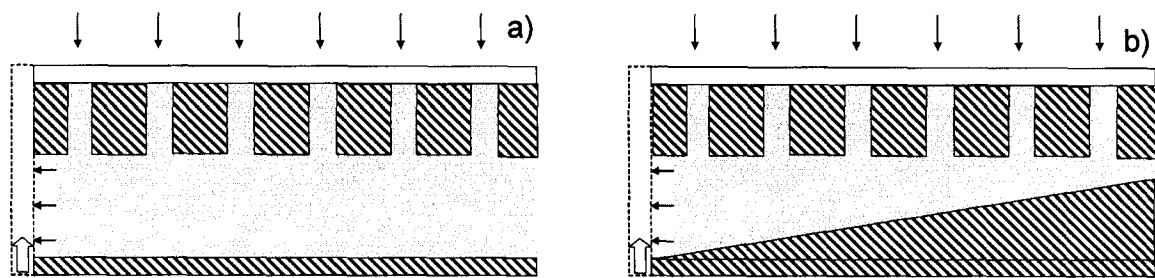


Figura 34. a) Conexión en serie de un EM con un PM (EPMs) y b) Conexión en serie de un LM con un PM (LPMs)

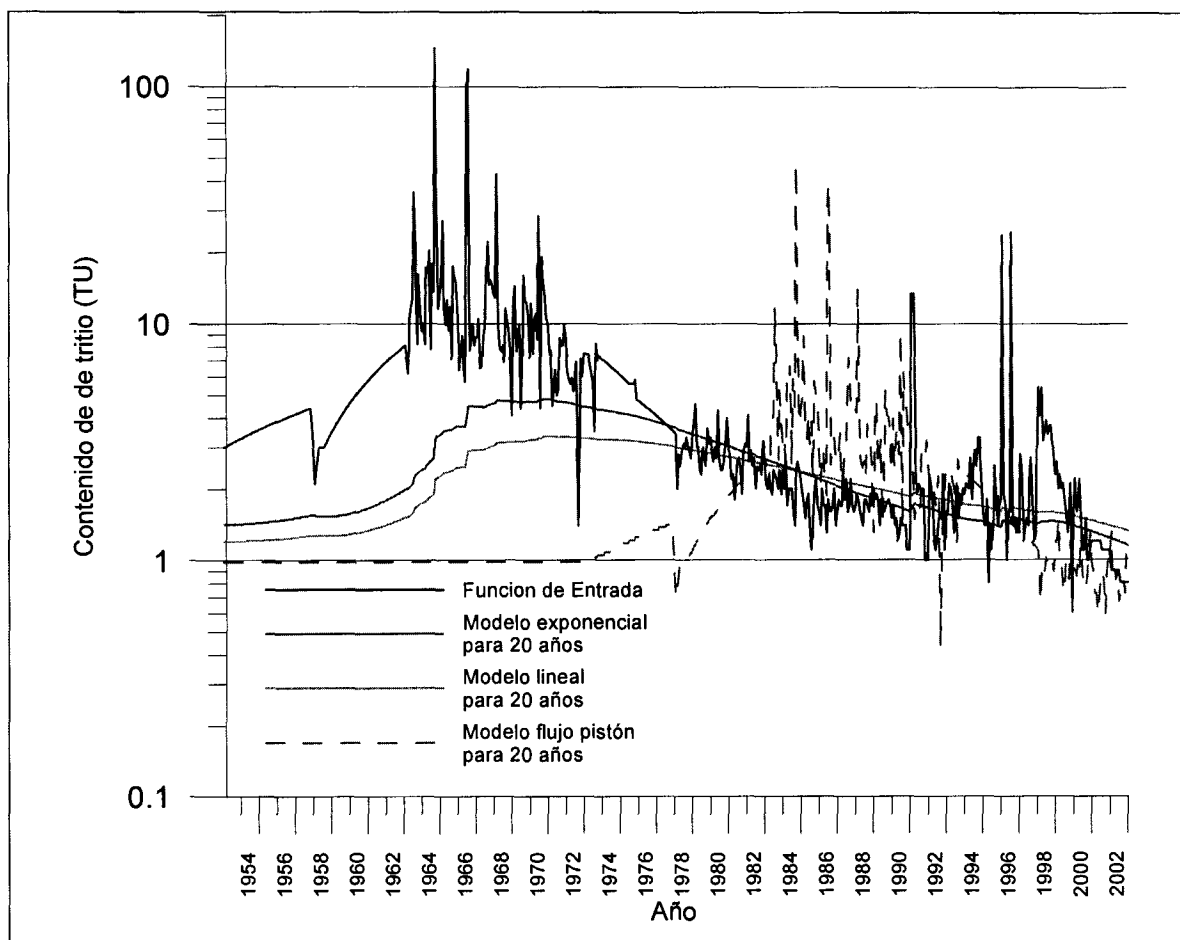


Figura 35. Relación curvas función de entrada- función de salida para los modelos de flujo utilizados.

En los tres modelos se resolvió el problema directo para una tiempo de residencia de 20 años.

En primer lugar se observa que la curva del PM mantiene la forma original de la función de entrada, sin embargo, se produce un descenso en los contenidos de tritio producto de la desintegración radioactiva. Para el caso del EM y del LM ambas curvas presentan un comportamiento similar. No obstante, el descenso de

los contenidos de tritio, que es más marcado en un principio para el LM, tiende a estabilizarse y es el EM el que sufre una disminución mayor, producto de la mezcla tota de las aguas (Se produce mezcla de aguas mas jóvenes con un menor contenido de tritio y aguas antiguas con mayor contenido de tritio).

3.4.4. Resultados

La aplicación del Código MULTIS se efectuó considerando tanto el problema directo como el inverso para las funciones de entrada con y sin ponderar. Los modelos de flujo utilizados corresponden a los modelos básicos. Las soluciones obtenidas para cada modelo (que pueden ser más de una), entregan el tiempo medio de residencia de las aguas en el acuífero más un error expresado como la desviación cuadrática media de los datos respecto a la curva de mejor ajuste. junto con el índice de dilución y el porcentaje de mezcla, referidos a la proporción de agua menor a 30 años. La tabla 33 y 34 presenta los resultados obtenidos.

		Función de entrada sin ponderar											
		Modelo Exponencial				Modelo Lineal				Modelo flujo pistón			
Muestra	T.U.	Tiempo	d.m.c	i.d.	%	Tiempo	d.m.c	i.d.	%	Tiempo	d.m.c	i.d.	%
C-1	1,24 ± 0,36	18	0	0,209	81,1	11	0	0	100	27	0	-	100
						18m	0,1	0	100	35	0,01	-	0
C-2	1,77 ± 0,39	54m	0,28	0,001	99,9	48m	0,01	0	100	30,5	0,02	-	0
						19,5	0,039	0,26	76,9	3	0,01	-	100
C-3	1,21 ± 0,37	19	0	0,242	78,5	16	0	0,065	93,8	21,5	0	-	100
						18m	0,07	0	100	35	0,04	-	0
M-13	0,86 ± 0,32	43	0	0,69	49,8	35	0	0,847	42,9	17,5	0,01	-	100
						13,5	0,32	0	100	39,5	0,01	-	0
M-19	1,09 ± 0,37	26,5	0	0,389	67,8	27	0	0,588	55,6	66m	0,01	-	100
		12m	0,01	0	100	18m	0,05	0	100	26,5	0,02	-	100
M-21	0,70 ± 0,34	61	0	0,946	38,8	43,5	0	1,065	34,5	24	0,01	-	100
										17	0	-	100
M-24	1,07 ± 0,36	28	0	0,419	65,7	27,5	0	0,606	54,5	26,5	0	-	100
		12m	0,01	0	100	12m	0,06	0	100	12m	0,03	-	100
M-23	1,07 ± 0,32	28	0	0,419	65,7	27,5	0	0,606	54,5	26,5	0	-	100
		12m	0,01	0	100					12m	0,03	-	100
M-25	0,72 ± 0,34	58	0	0,907	40,4	42,5	0	1,041	35,3	14,5	0,01	-	100
										40,5	0,02	-	0
M-26	0,77 ± 0,34	52	0	0,825	43,8	39,5	0	0,968	38	36	0	-	0
										15	0,01	-	100
M-27	0,61 ± 0,33	74	0	1,099	33,3	50	0,00	1,204	30	14,0	0,01	-	100
										19	0,01	-	100
M-7	0,69 ± 0,35	62	0	0,958	38,4	44,5	0	1,087	33,7	24	0,02	-	100
										17	0,01	-	100
V-3	1,00 ± 0,35	32,5	0	0,506	60,3	30	0,01	0,693	50	25,5	0,01	-	100
		12m	0,08	0	100	13,5	0,18	0	100	20,5	0,01	-	100
L-2	0,95 ± 0,35	36	0	0,57	56,5	31,5	0	0,742	46,6	25	0,01	-	100
						13,5	0,23	0	100				

Tabla 33. Resultados aplicación código MULTIS para La función de entrada sin ponderar.
 Para todos los modelos el número de la columna *Tiempo* expresa años, excepto cuando se encuentra seguido por una m que señala meses. d.m.c. = desviación cuadrática media de los datos frente a la función de salida teórica. i.d. = índice de dilución. % = porcentaje de aguas con edades inferiores a 30 años.

Muestra	T.U.	Función de entrada ponderada											
		Modelo Exponencial				Modelo Lineal				Modelo flujo pistón			
		Tiempo	d.m.c	i.d.	%	Tiempo	d.m.c	i.d.	%	Tiempo	d.m.c	i.d.	%
C-1	1,24 ± 0,36	16	0	0,166	84,7	10	0	0	100	24m	0,01	-	100
C-2	1,77 ± 0,39	54m	0,30	0,001	99,9	18m	0,08	0	100	26,5	0,01	-	100
C-3	1,21 ± 0,37	17	0	0,199	82	36m	0	0	100	36,5	0,06	-	0
M-13	0,86 ± 0,32	40,5	0	0,648	52,3	10,5	0,01	0	100	11	0,07	-	100
M-19	1,09 ± 0,37	24,5	0	0,348	70,6	18m	0,05	0	100	24m	0,04	-	100
M-21	0,70 ± 0,34	12m	0,02	0	100	33,5	0	0,803	44,8	27	0,01	-	100
M-24	1,07 ± 0,36	57	0	0,893	40,9	13,5	0,29	0	100	10	0	-	100
M-23	1,07 ± 0,32	25,5	0	0,369	69,2	25,5	0,01	0,531	58,8	39,5	0,04	-	0
M-25	0,72 ± 0,34	12m	0	0	100	12m	0,03	0	100	29,5	0,01	-	100
M-26	0,77 ± 0,34	55	0	0,866	42,0	42	0	1,030	35,7	12m	0,05	-	100
M-27	0,61 ± 0,33	49	0	0,781	45	26	0,01	0,550	57,7	11,5	0,02	-	100
M-7	0,69 ± 0,35	70	0	1,054	34,9	40,5	0	0,993	37	40,5	0,04	-	0
V-3	1,00 ± 0,35	0	0	0,459	63,2	38	0	0,930	39,5	30	0	-	100
L-2	0,95 ± 0,35	12m	0,07	0	100	13	0,38	0	100	12m	0,03	-	100
		33,5	0	0,525	59,2	48	0	1,163	31,2	30	0	-	0
						42,5	0	1,041	35,3	19	0,01	-	100
						28,5	0	0,642	52,6	40,5	0,06	-	0
						30	0	0,693	50	20,5	0	-	100
						13,5	0,2	0	100	40	0,03	-	0
										17	0,01	-	100
										41	0,03	-	0
										11,5	0,01	-	100
										40,5	0,03	-	0
										26	0,03	-	100
										39,5	0,18	-	0
										24,5	0,01	-	100
										25	0,03	-	100

Tabla 34. Resultados aplicación código MULTIS para la función de entrada ponderada.

Para todos los modelos el número de la columna *Tiempo* expresa años, excepto cuando se encuentra seguido por una m que señala meses. d.m.c. = desviación cuadrática media de los datos frente a la función de salida teórica. i.d. = índice de dilución. % = porcentaje de aguas con edades inferiores a 30 años.

Considerando que la zona no saturada en Isla de Pascua tiene un espesor mucho mayor al de la zona saturada, un modelo que puede ser aplicado corresponde al modelo de conexión en serie de un EM con un PM (EPM), como el representado en el esquema a) de la figura 34. El agua circularía, en los primeros metros con un predominio de flujo pistón, y al entrar en contacto con el nivel freático se produciría el flujo exponencial. También se realizaron los cálculos para un modelo en serie de un LM y PM (LPMs) (figura 34b), que tiene un comportamiento parecido al anterior; y de esa forma establecer otro parámetro de comparación.

La tabla 35 presenta los resultados calculados para los modelos EPMs y LPMs, mediante el problema inverso según la función de entrada ponderada, para las muestras de los sondeos. El código MULTIS automáticamente determina el

porcentaje de EM y LM, que arroja una menor desviación cuadrática media de los datos.

Muestra	Función de entrada ponderada									
	EPMs					LPMs				
	Tiempo	% EM	d.m.c	i.d.	%	Tiempo	% LM	d.m.c	i.d.	%
M-13	38	86	0	0,635	53	37,5	52	0	1,179	30,8
	13	14	0,01	0	100	14	29	0	0	100
M-19	34	33	0	0,745	47,5	40	18	0	-	0
	42	15	0,01	-	0	13,5	65	0	0	100
M-21	54	55	0	1,745	17,5	44,5	22	0	-	0
	18	9	0	0	100	15	11	0	0	100
M-24	42,5	29	0	-	0	35	40	0	1,135	32
	84m	8	0,01	0	100	84m	8	0,03	0	100
M-23	42,5	29	0	-	0	35	40	0	1,135	32,1
	10	9	0	0	100	30	1	0	0,693	50
M-25	55	100	0	0,866	42	45	44	0	2,11	12,1
	19	1	0,01	0	100	17,5	15	0	0	100
M-26	45	58	0	1,060	34,6	39	59	0	1,189	30,4
	19,5	12	0	0,004	99,6	14,5	2	0	0	100
M-27	70	97	0	1,088	33,7	46,5	26	0	-	0
	17,0	1	0,01	0	100	17	1	0,01	0	100
M-7	55	55	0	1,837	15,9	45	28	0	-	0
	17,5	10	0	0	100	17,5	3	0	0	100
V-3	30	38	0	0,459	63,2	33	51	0	0,88	41,1
	84m	4	0,01	0	100	24,5	19	0	0	100

Tabla 35. Resultados para EPMs y LPMs, para sondeos, según función de entrada ponderada.

Tiempo expresa años, excepto cuando se encuentra seguido por una m que señala meses. % EM = porcentaje de modelo exponencial utilizado. %LM = porcentaje de modelo lineal utilizado d.m.c. = desviación cuadrática media de los datos frente a la función de salida teórica. i.d. = índice de dilución. % = porcentaje de aguas con edades inferiores a 30 años.

De acuerdo a las tablas, se puede observar que en general, las edades de residencia media arrojan valores ligeramente más antiguos para la función de entrada sin ponderar. Esto se produce, como ya se mencionó, producto que al ponderan la función de entrada, los contenidos de tritio sufren una leve disminución en sus valores pico.

Las muestras pertenecientes a los tubos volcánicos, presentan edades de residencia cuyos valores oscilan entre 13 a 17 años para el EM, de 3 a 33 años para el LM y de 2 a 36 años para el PM. Si se consideran las características geológicas del sitio donde se obtuvieron estas muestras, (Ver capítulo 3), se podría considerar que son representantes de la zona no saturada, que alcanzaría aproximadamente de 3 a 4 metros aproximadamente entre el techo del tubo y la superficie. Bajo estas circunstancias el modelo que mejor se adaptaría sería el modelo de flujo pistón.

Las muestras de los sondeos del sector de Hanga Roa (M-7, M-25, M-27 y M-21), presentan tiempos de residencia similares para los modelos EM, con valores entre 55 y 70 años, y de 42 a 45 años, para el LM. En el caso del PM, el rango es más variable con tiempos de 11 a 40 años. Un poco más al norte la muestra M-26 presenta rangos de edades levemente inferiores, con 50 años para el EM, y cerca de 39 para el LM, además de un rango mucho más amplio, de 40 a 15 años para el PM.

Para las muestras del sector este de la Isla (M-19, M-23 y M-24), los tiempos de residencia, en los tres modelos básicos de flujo, se presentan con valores inferiores a los del sector oeste. El EM presenta valores que varían de 25 a 28 años, y como segundo resultado, que se presentó en todas las muestras, fue de un año. El LM arroja valores de 26 y 27 años, y el PM tiempos de residencia de 26,5 a 30 años y de 1 año.

Las muestras V-3 y M-13, de mayor concentración iónica y más cercanas al mar, arrojaron tiempos de residencia distintos al resto de las muestras. Presentando valores intermedios a los de los dos grupos señalados anteriormente.

En el caso de la laguna de Rano Kau (L-2), el único modelo que se puede considerar válido es el de mezcla total (EM), que arrojan tiempos medios de 33,5 a 36 años.

En tanto, los resultados obtenidos para los sondeos, según el EPMS, presentan dos rangos de soluciones. En primer lugar, si se consideran porcentajes menores al 10 % de EM las edades fluctúan entre 17 y 19 años. Y en segundo término, al aumentar el % de EM por sobre el 30 %, los tiempos progresivamente aumentan de cerca de 40 años, a máximos de 70 y 95 años, para un 99% de EM. En el caso del LPMS, se observa que en general las edades obtenidas son algo menores, comparadas con el modelo anterior (a excepción de la M-19 y V-3), y además, el porcentaje asignado al PM es mucho más variable, presentándose algo menor, cuando la edad es más o menos coincidente con la obtenida para el EPMS.

En el capítulo 7, se realiza una discusión más profunda de los resultados obtenidos de la aplicación del código MULTIS.

CAPÍTULO 6. CALIDAD Y CONSERVACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos de Isla de Pascua son un bien indispensable para el desarrollo de la comunidad que la habita. Es por esto que la calidad de las aguas y su conservación es un factor de gran trascendencia.

En el siguiente apartado se realiza una discusión de los aspectos más importantes relacionados con la calidad de las aguas, sus usos recomendados, de posibles fuentes de contaminación y de algunas recomendaciones para el cuidado y conservación de este valioso recurso.

2. CALIDAD DE LAS AGUAS

El agua es uno de los mayores solventes y como tal es capaz de incorporar gran cantidad de sustancias de los terrenos por los cuales circula. Para el caso de las aguas subterráneas este efecto es aún mayor producto de las lentas velocidades de circulación, mayor superficie de contacto y, temperaturas y presiones superiores a las que están sometidas.

La calidad de las aguas para un determinado fin, queda definida por su composición comparada a ciertos estándares y reglamentos definidos por distintas organizaciones. De esta forma, se pueden establecer distintas posibilidades de utilización, como por ejemplo, aguas aptas para la bebida, usos agrícolas, industriales, etc.

2.1. Potabilidad del agua

Se denomina agua potable a aquella que puede ser consumida por el hombre sin peligro alguno para su salud. Para determinar la potabilidad de ésta se deben analizar características físicas, químicas, bacteriológicas y radioactivas, entre otras.

En Isla de Pascua el agua potable se obtiene exclusivamente del agua subterránea. Los sondeos utilizados para este fin corresponden a los números 7, 21, 25 y 27 que se encuentran ubicados en las inmediaciones de Hanga Roa. El

agua obtenida en estos sondeos es tratada y posteriormente derivada a la red de distribución.

La tabla 36 presenta un resumen de las normas de potabilidad para las características físicas y químicas del agua según la Organización Mundial de la Salud (O. M. S.) de acuerdo al "International standard for Drinking Water" de 1963; según los estándares utilizados por la Comunidad Europea; y según el Ministerio de Salud Pública de Chile (M.S.P.).

Sustancia	Organización Mundial de la Salud (1963)		Comunidad Europea	Ministerio de Salud Pública (Chile)
	Concentración máxima aceptable	Concentración máxima permitida	Concentración máxima admisible	Concentración máxima
Turbidez ¹ mg/l	5	25	10	-
SiO ₂	*	*	-	-
Conductividad S/cm a 20 °C	*	*	-	-
Temperatura °C	*	*	25	-
pH	7 – 8,5	6,5 – 9,2	9,5	-
Na ⁺ mg/l	*	*	150	-
K ⁺ mg/l	*	*	12	-
Ca ²⁺ mg/l	75	200	-	-
Mg ²⁺ mg/l	50	150	50	125
NH ₄ mg/l	-	-	0,5	-
Cl ⁻ mg/l	200	600	-	250**
SO ₄ mg/l	200	400	250	250
NO ₃ ⁻ mg/l	-	45	50	10**
NO ₂ mg/l	*	*	0,1	1
Sílice mg/l	*	*	-	-
F mg/l	0,5 - 1	1,5	1,5	1,5
B mg/l	*	*	-	-

Tabla 36. Normas de potabilidad del agua según la O. M. S. (1963), la Comunidad Europea y el Ministerio de Salud Pública de Chile.

El "nivel guía" corresponde a las concentraciones convenientes. Los asteriscos (*) indican que la norma no hace referencia a la sustancia en particular; los guiones (-) indican que no se especifica un valor determinado; Dos asteriscos (**) El ministerio de Salud puede admitir concentraciones mayores. ¹ Turbidez corresponde a una característica organoléptica.

Para los resultados obtenidos en los análisis químicos de la presente investigación se pueden realizar las siguientes observaciones:

1. En cuanto a los contenidos de sílice, como característica organoléptica, tan sólo las muestras de las lagunas y las muestras C-1 y C-2 presentan valores por debajo de las normas. Sin embargo, no se especifica una concentración máxima como característica química.

2. Todas las muestras presentan valores de conductividad eléctrica bajo las normas.
3. En cuanto al pH, sólo se presentan por sobre las normas los valores determinados en terreno para las aguas de las lagunas. Sin embargo el pH medido en laboratorio para estas mismas muestras arrojó valores aptos.
4. Respecto a las concentraciones de Na^+ y K^+ , si bien la O. M. S. y el M. S. P. no hace referencias, los valores obtenidos para casi todas las muestras superan el máximo admisible propuesto por la Comunidad Europea (especialmente en lo referido a las concentraciones de Na^+). Sólo las muestras procedentes de las lagunas, las cavernas y de los sondeos 23 y 25 se encuentran bajo la norma para estos dos elementos.
5. Los contenidos de Ca^{2+} se encuentran dentro de los rangos permitidos para todas las normas.
6. Las concentraciones de Mg^{2+} para las muestras M-13, M19, M-21, V-1 y V-3 presentan valores levemente superiores, tanto para la concentración máxima aceptable de la O. M. S., como para el valor máximo admisible de la Comunidad Europea. Sin embargo, todas las muestras presentan valores bajo los 150 mg/l propuestos por la O. M. S. y bajo los 125 mg/l del M. S. P. como concentración máxima permitida.
7. En cuanto a los contenidos de NH_4 , la muestra L-2 es la única que presenta concentraciones elevadas de este componente, no obstante, el valor está levemente por debajo de la norma establecida por la Comunidad Europea. La O.M.S. y el M.S.P. no especifican un contenido máximo.
8. Las muestras con contenidos de Cl^- que superan la concentración máxima permitida por la O.M.S. y el M.S.P. corresponden a las M-13, M-14, M-19, V-1 y V-2 siendo no potables. Por otro lado, las aguas que están por encima de la concentración máxima aceptada para la O. M. S. corresponden, las muestras M-21, M-24, M-26, M-7 y V-2. El M.S.P. puede permitir concentraciones por sobre la norma.
9. Para los contenidos de SO_4 , tan sólo las muestras V-1 y V-3 presentan concentraciones por sobre las aceptables para la O. M. S. y admisibles

según la Comunidad Europea y el M.S.P.; sin embargo se mantienen por debajo del límite máximo permitido por la O. M. S.

10. Todas las muestras presentan valores de concentración de NO_3^- y NO_2^- aptos, a excepción de la muestra M-27 cuya concentración de NO_3^- de 85 mg/l está por encima de los máximos permitidos para todas las normas. Sin embargo, El M.S.P. puede permitir concentraciones superiores

11. Para las concentraciones de F y B todas las muestras cumplen con las normas.

En resumen, la calidad de las aguas de Isla de Pascua, en lo concerniente a los aspectos físico-químicos, es variable dependiendo de su origen.

Las aguas con la mejor calidad corresponden a las muestras obtenidas de los tubos volcánicos (C-1, C-2 y C-3), cumpliendo con la totalidad de los requisitos estipulados por las normas. Sin embargo, estas muestras representan el agua que se encuentra en circulación por la zona no saturada, por lo que no tiene sentido pensar en ellas para el abastecimiento y uso masivo.

En el caso de las muestras provenientes de las lagunas, si bien también cumplen con las normas, su potabilidad se ve restringida por los bajos valores de pH que presentan, y además, para el caso de la muestra L-2 (Rano Kau), por los altos contenidos de NH_4 .

Las aguas provenientes de los sondeos utilizados actualmente para abastecer a la población presentan distintas calidades. En el caso de la muestra M-25, ésta cumple con todas las normas de potabilidad y sería la mejor de todas. Las muestras recolectadas de los sondeos 7 y 21 presentan contenidos de Cl^- superiores al máximo aceptable, pero al mismo tiempo inferiores al máximo permitido según las normas de la O. M. S. Éstas también presentan problemas en los contenidos de Na^+ y K^+ de acuerdo a las normas europeas. Por último, la muestra recolectada en el sondeo 27, si bien cumple con todas las normas, presenta un valor anómalo de NO_3^- que le quita el carácter de potable.

Para los demás sondeos distribuidos en la isla, el agua de mejor calidad es la muestra M-23. En segundo término las aguas de los sondeos 24 y 26 con valores de Na^+ algo superiores respecto a la norma europea. El resto de las muestras (M-

13, M-14 y M-19) presenta problemas en los contenidos de Na^+ y K^+ , según la norma europea y en los contenidos de Cl^- según las normas de la O.M.S y el M.S.P.

Para el caso de las muestras V1, V-2 y V-3, éstas no cumplen con las normas establecidas para el Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4 , especialmente en lo referido por la norma europea, por lo que carecen de potabilidad.

Por último, cabe recordar que basta con que sólo un parámetro no cumpla con las normas para que el agua deje de ser potable; sin embargo, los límites de concentración permitidos pueden variar de un país a otro, poniendo mayor o menor énfasis en distintos aspectos dependiendo de la sustancia considerada y de los efectos que ésta produce en la salud humana.

Otra condición importante en la calidad de las aguas lo constituyen los aspectos bacteriológicos que se basan en la determinación de aquellos microorganismos que puedan afectar directamente a la salud del hombre o que por su presencia puedan señalar la existencia de contaminación por aguas residuales o vertederos. Se bien en la presente investigación no se realizaron análisis de la calidad bacteriológica de las aguas, existen antecedentes de 10 análisis realizados en abril de 1975 para aguas extraídas de los sondeos 2, 7 y 21 más cuatro lugares de la matriz de distribución. Los resultados de estos estudios indicaron una baja calidad bacteriológica (Alamos, 1979).

No obstante lo anterior, hay que considerar que una sola muestra de agua no es suficiente para dictaminar sobre su uso, por lo tanto, es necesario establecer un registro continuo de mediciones, que permita disminuir los errores producidos por circunstancias del momento y/o errores de muestreo, que puedan alterar la composición y por ende su calidad.

2.2. Usos agrícolas y ganaderos.

Si bien la agricultura y la ganadería en la actualidad no son actividades muy difundidas Isla de Pascua, es importante conocer el potencial que poseen sus aguas para su desarrollo.

a) Usos agrícolas:

Entre las clasificaciones más comunes para las aguas destinadas a riego se encuentran el índice SAR, desarrollado por la U. S. Salinity Laboratory Staff. Esta clasificación considera la concentración de sales solubles expresada mediante la conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$, y lo relaciona con la concentración relativa del sodio con respecto al calcio y al magnesio (índice SAR). El valor SAR se obtiene de la ecuación:

$$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{rCa + rMg}{2}}} \quad r = \text{meq/l}$$

De esta forma, al combinar las distintas características de conductividad (C1 a C4) y los distintos valores SAR (S1 a S4) se obtienen 16 categorías de agua. La categoría para una muestra se determina por el campo que ocupa en el diagrama propuesto por la U. S. Salinity Laboratory Staff.

La tabla 37 presenta los valores SAR y el peligro de salinización del suelo para las muestras de agua de Isla de Pascua. Cabe señalar que para un mismo valor SAR el peligro de alcalinización de un suelo aumenta cuanto mayor es la conductividad.

Muestra	SAR	Peligro de alcalinización del suelo*	Peligro de salinización del suelo**
M-13	9,50	S3	C4
M-14	18,39	S4	C4
M-19	12,11	S3	C4
M-21	7,97	S2	C3
M-24	8,79	S2	C4
M-23	2,00	S1	C1
M-25	4,65	S1	C2
M-26	8,74	S2	C3
M-27	4,24	S1	C2
M-7	5,91	S2	C3
C-1	1,10	S1	C1
C-2	1,51	S1	C1
C-3	0,94	S1	C1
L-1	1,03	S1	C1
L-2	1,58	S1	C1
V-1	22,63	S4	C4
V-2	9,82	S3	C3
V-3	16,56	S4	C4

Tabla 37. Categorías de las aguas según índice SAR y conductividades.

*Los límites entre las categorías son variables y dependen de la conductividad

** Los límites entre las categorías son: C1 < 250 < C2 < 750 < C3 < 2250 < C4 ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$)

De acuerdo a los valores SAR y de conductividad de las muestras se indica lo siguiente:

1. Las muestras L-1, L-2 y M-23 (también las C-1, C-2 y C-3), presentan categoría C1-S1. Estas aguas pueden usarse para regadío de cualquier tipo de cultivo en casi todos los suelos con muy poco peligro de desarrollar salinidad y escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio.
2. Las aguas de las muestras M-27 y M-25 de categoría C2-S1 pueden ser usadas de igual forma que las anteriores, pero en cultivos con mayor tolerancia a las sales.
3. Las muestras M-7, M-21, M-24 y M-26 presentan categoría C3-S2. Estas aguas no pueden usarse en suelos de drenaje deficiente, y se recomiendan sólo para plantas muy tolerantes a las sales. Presentan, además, un contenido de sodio algo mayor que las dos categorías anteriores.
4. La muestra V-2 de categoría C3-S3 presenta altos contenidos de sodio que en la mayor parte de los suelos puede alcanzar límites de toxicidad. Esta categoría de agua se recomienda para zonas con buen drenaje y para plantas muy tolerantes a las sales.
5. Las muestras M-13 y M-19 caen en la categoría C4-S3 y no son apropiadas para el riego en condiciones ordinarias. Al igual que las aguas anteriores, también pueden alcanzar límites de toxicidad en lo referente a sus contenidos de sodio.
6. Las aguas de las muestras M-14, V-1 y V-2 de categoría C4-S4 no son aptas para el riego por los altos contenidos de sales y por un muy alto contenido de sodio.

Otro aspecto que considera el índice SAR es el contenido de boro en las aguas. De esta manera, se definen cinco clases numeradas del 1 al 5 cuyos límites (en ppm de B) varían según la sensibilidad de los cultivos a este elemento. En lo referente a las aguas recolectadas en Isla de Pascua, todas presentan muy bajos contenidos de boro y por lo tanto son de clase 1, aptas para cualquier tipo de cultivo.

b) Usos ganaderos:

No existen clasificaciones concretas referidas a la calidad del agua para los distintos tipos de animales, sin embargo, éstas deben cumplir normas similares a las destinadas al consumo humano especialmente en lo referido a las características bacteriológicas.

3. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**3.1. Tipos y fuentes de contaminación en las aguas**

Las actividades humanas producen gran cantidad de desechos que provocan perturbaciones en el ciclo hidrológico y en la circulación de las aguas afectando de esta forma su calidad.

Como se vio en el apartado anterior los principales contaminantes que afectan la calidad de las aguas corresponden a contaminantes denominados de tipo mineral, como Na^+ , K^+ y Cl^- , que afectan en general a casi todas las muestras, y contaminación por compuestos del tipo nitrogenados (NO_3^- y NH_4) que afecta específicamente a las aguas de las muestras M-27 y L-2.

Los contaminantes minerales provienen en general de la alteración natural de los terrenos basálticos que incorporan al agua el Na^+ . Sin embargo, también pueden tener su origen en procesos de contaminación por aguas más salinas, especialmente en áreas costeras como es el caso de las muestras V-1, V-2 y V-3 que son las que presentan la mayor concentración de estos iones. Los contaminantes de origen mineral casi no interfieren con el terreno y se desplazan a la misma velocidad que el agua subterránea. Este tipo de contaminación puede considerarse como irreversible (Custodio y Llamas, 1986).

La contaminación por compuestos nitrogenados esta normalmente relacionada a los desechos humanos y/o animales y también relacionado con abonos, con cultivos de leguminosas y procesos de descomposición orgánica.

En el sector donde fue recolectada la muestra M-27 no se observaron terrenos de cultivos ni de crianza de animales; por lo que el origen de la contaminación por NO_3^- no está del todo clara.

Para la muestra obtenida del cráter de Rano Kau (L-2), ésta puede deber su alta concentración de NH_4 a los procesos de descomposición de materia orgánica, favorecidas por un ambiente reductor con un pH bajo.

3.2. Contaminación asociada a los vertederos de basura.

Como consecuencia de las actividades humanas se producen residuos sólidos de distintos tipos y que es necesario evacuar. Isla de Pascua no escapa este proceso, adquiriendo un carácter especial por la situación geográfica especial que posee. Si a esto sumamos que gran parte de la isla es Parque Nacional y toda ella es patrimonio mundial cultural y natural, la ubicación apropiada de un vertedero que proteja sus recursos hídricos y turísticos es fundamental.

A continuación se presenta una discusión sobre los aspectos hidrogeológicos básicos más importantes a considerar para el establecimiento de un vertedero en Isla de Pascua.

En la actualidad el vertedero de la Isla, que lleva en funcionamiento un poco más de dos años, se encuentra ubicado aproximadamente unos 5 kilómetros al este de Hanga Roa, al costado sur del camino que lleva al fundo Vaitea, entre los sectores conocidos como Maunga Punapau y Maunga Orito. En las coordenadas U.T.M. 6.994.897.N y 658.058.E (Figura 8).

Corresponde a una excavación de forma más o menos elipsoidal con una profundidad de 30 a 35 metros y un diámetro de 100 a 150 metros, cuya superficie se encuentra a una cota topográfica de 100 m.s.n.m.

El sector del vertedero está constituido principalmente por material piroclástico y flujos escoriáceos, ambos fuertemente alterados, y donde se ha formado un suelo arcilloso de color rojizo de unos pocos cm de potencia.

Los efectos que este vertedero puede producir en el acuífero dependen de dos factores a considerar:

a) Características de los residuos

Los residuos sólidos pueden ser clasificados en tres grupos (Custodio y Llamas, 1986):

1. Residuos inertes, tales como tierras, que no ofrecen peligrosidad.

2. Residuos domésticos y comerciales (basuras) y escombros, que son potencialmente contaminantes, y que deben ser vertidos con precaución.
3. Residuos industriales generales, como cenizas tóxicas, sustancias solubles y sustancias químicas que los impregnan, que presentan un elevado potencial contaminante y cuyo vertido requiere de grandes precauciones o no puede hacerse sin un tratamiento previo.

Para el caso específico de Isla de Pascua, los principales residuos producidos corresponden a los de los grupos uno y dos.

En medio aerobio la materia orgánica se transforma en agua e iones NO_3^- y SO_4^{2-} y se produce CO_2 y N_2 que escapan, pero el primero de ellos aumenta mucho su pH y contribuye al aumento de la dureza y a la solubilización de ciertos metales. En ausencia de oxígeno se produce una descomposición a ácidos orgánicos intermedios y finalmente se produce NH_4^- y S^- más otros gases, además de la solubilización de Fe, Mn, Zn y otros metales; el proceso consume agua (Custodio y Llamas, 1986). En el caso del actual vertedero de Pascua se puede señalar que los procesos predominantes son del tipo aeróbicos. Ya que los desechos se encuentran a la intemperie y no son aprisionados, ni recubiertos con capas de tierra.

La cantidad de líquido que puede producir el vertedero, y que finalmente podría contaminar las aguas, depende de la composición de la basura, pero también en gran medida del agua que recibe directamente de la lluvia y escorrentía superficial. Bajo esa perspectiva, se puede esperar que la infiltración de agua contaminada no sea despreciable; considerando la alta permeabilidad del terreno y además, a que las lluvias en la isla son relativamente abundantes.

Finalmente se puede señalar que la composición de los líquidos producidos pueden tener una composición y un grado de contaminación muy variable. En general los sólidos disueltos, la dureza, los contenidos de Cl^- , SO_4 , CO_3H , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se presentan muy elevados. La agresividad de las aguas dependerá del pH. Si es muy reductor tendrá mucho NH_4 , así como Fe^{2+} , Mn^{2+} y a veces Zn^{2+} . Estas características pueden permanecer por mucho tiempo en las aguas, y en ocasiones tardan algunos años en aparecer (Custodio y Llamas, 1986)

b) Ubicación espacial y relación vertedero-acuífero

El efecto sobre el acuífero depende de la conexión vertical y/o lateral con el vertedero. Un caso extremo es aquel en que las basuras entran en contacto directo con el nivel saturado, lo que afortunadamente no es el caso del vertedero de Isla de Pascua.

Como se puede ver en la figura 8, el vertedero de Isla de Pascua se encuentra prácticamente sobre la línea divisoria de aguas subterráneas, que separa los flujos que se dirigen hacia Hanga Roa al oeste y hacia el sector conocido como Vahihu al este. Si se considera además, que la profundidad del vertedero, ubicado aproximadamente a 100 m.s.n.m., es de 30 a 35 metros, la distancia aproximada al nivel saturado en la vertical es de aproximadamente de 65 a 70 metros.

Por otra parte, si se considera la ubicación de los sondeos utilizados para el suministro de agua potable de la población, el vertedero se encontraría ubicado prácticamente en la zona de recarga del agua subterránea que los abastece.

4. PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS

Debido a que la regeneración de un acuífero contaminado, puede ser una tarea difícil y costosa, es que las medidas de protección tienen que apuntar en el sentido de la prevención.

En el caso de Isla de Pascua, la protección del acuífero, si bien se tiene que extender a la totalidad de la isla, se debe centrar en los sectores donde se encuentran ubicados los sondeos y de forma especial aquellas áreas destinadas a la captación de agua potable, que incluyen además su zona de recarga.

Algunos de los aspectos que se deben de considerar para la protección del acuífero son (Custodio y Llamas, 1986):

- Características, disposición y propiedades hidráulicas del terreno.
- Posición y variaciones de la superficie freática del sector
- Consideración de posibles agentes contaminantes.

En el capítulo 7 se exponen algunas recomendaciones, desde el punto de vista hidrogeológico, basadas en los aspectos ya mencionados.

CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se realiza una discusión general de algunos aspectos relacionados con los resultados obtenidos en los distintos temas tratados anteriormente, procurando integrar toda la información obtenida, estableciendo relaciones entre las distintas metodologías y técnicas utilizadas, que pueden ser complementarias entre si, y que permiten explicar de mejor manera, las conclusiones obtenidas sobre el funcionamiento del sistema hidrogeológico de Isla de Pascua.

2. DISCUSIÓN GENERAL

2.1. Aspectos Generales

En primer lugar, cabe señalar que este es el primer estudio de caracterización isotópica de aguas que se realiza en Isla de Pascua, y por lo tanto los datos de trabajos anteriores, que casi en su totalidad corresponden a informes inéditos realizados por empresas consultoras, sólo aportan con información relacionada a algunos aspectos hidráulicos y a algunos datos puntuales de análisis químicos. Otro aspecto a considerar, corresponde a la densidad de la información que es de 18 puntos de control de aguas subterráneas (más 2 para las precipitaciones) para una superficie de 160 km². No obstante lo anterior, por su distribución y por las características geológicas de la isla, se han considerado representativos para los alcances de la presente investigación. También, una limitación importante en el desarrollo del presente estudio lo representan las características propias de los sondeos y de los puntos de control, ya que gran parte de ellos (salvo lo utilizados para el abastecimiento) se encuentra en abandono y/o sin protección, lo que puede incidir en que las aguas obtenidas de ellos no sean 100% representativas del sector.

2.2. Ciclo hidrológico

2.2.1. Precipitaciones

La cantidad de precipitación en la Isla se mantienen relativamente homogénea durante todo el año, con máximos durante los meses de abril y mayo (tabla 6), sin embargo, también presentan una alta variabilidad e intensidad (tabla 7). De esta forma, se tiene que las lluvias máximas del mes alcanzan cerca del 36% del total mensual es decir entre 40 y 60 mm aproximadamente. Esto afectaría directamente a la cantidad de recarga que puede generarse, a la concentración de los iones disueltos y a la concentración del contenido isotópico que es muy sensible a los efectos de evaporación que se pueden producir durante la caída del agua.

En cuanto a la composición química de las aguas de lluvia, éstas presentan una clara variación temporal, exhibiendo en los primeros meses de muestreo una composición clorurada-sódica que posteriormente cambia a bicarbonatada-cálcica, acompañado de un aumento en la conductividad eléctrica.

En los valores de las relaciones iónicas, se tiene que para la relación rCl/rCO_3H+CO_3 , las precipitaciones, tanto de la estación de Hanga Roa como de Vaitea, disminuyen progresivamente el valor con el tiempo. También, pero de forma inversa, la relación rSO_4/rCl presenta un aumento en los valores, pero su distribución es un poco más variable. Las relaciones rCl/rBr y rNa/rCl , se concentran en general levemente por sobre el valor marino, lo que indica una buena correspondencia para este origen, sin embargo, también existen muestras con valores anormalmente altos y bajos, registrados también en los últimos meses de muestreo. Por último, en la relación rMg/rCl , casi la totalidad de las muestras se ubica en una curva, cuyo valor en la relación, se aproxima al valor marino a medida que aumenta el contenido de cloruros, señal de que este ion se mantiene en una relación relativamente constante frente al Cl^- .

Estas variaciones en la composición química de las aguas de lluvia, pueden estar controladas o ser el resultado de la combinación de dos procesos:

1. Variaciones producidas por la acumulación de sales precipitadas por evaporación o por introducción de partículas extrañas en el toma muestras

durante el transcurso de los meses. Procesos que tiene su reflejo en el marcado aumento de la conductividad eléctrica de las muestras.

2. Una variación anual de los contenidos de sales disueltas, que puede tener su origen en factores climáticos como variaciones en la dirección y fuerza de los vientos que transportan el aerosol marino que es incorporado a la gota de lluvia durante su caída.

Para confirmar estas hipótesis, es necesario poseer un ciclo completo de muestras (todo un año) para observar y comparar su variación. Sin embargo, si se considera que en general todas las muestras de agua subterránea presentan un carácter clorurado-sódico, se puede señalar que el primer proceso es el causante de esta variación.

Los contenidos de isótopos estables presentes en estas aguas, como se vio en el capítulo 5, son muy variables. Los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD no muestran una relación clara, ni con la cantidad de precipitación (figuras 22 y 23), ni con la variación mensual de la temperatura. Sin embargo, como se explicó en las tablas 29 y 30, y en las figuras 24 y 25, se observa una ligera tendencia, que es interrumpida sólo por los valores del mes de octubre, en donde los menores contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD (las medias) se presentarían a fines de verano y comienzos de otoño, coincidiendo con las máximas precipitaciones.

Además de la alta variabilidad de los contenidos isotópicos de las muestras obtenidas por la AIEA, se agrega el hecho de que las muestras conseguidas en la presente investigación, no se ajustan claramente a un patrón, presentando valores que escapan totalmente al comportamiento descrito anteriormente, con valores isotópicamente mucho más livianos (como los del mes de Junio), y también mucho más pesados, que se alejan totalmente de las rectas meteórica mundial y local. Esta variabilidad no presenta un origen claro, pero puede estar relacionada además de los factores climáticos, a evaporación de la muestras desde los toma muestras durante su manipulación.

2.2.2. Recarga

La recarga y sus características, se han considerado representadas en la presente investigación, por las muestras provenientes de los tubos volcánicos, ya que como se ha mencionado, estas aguas aparecen tras haber circulado por la zona no saturada sólo algunos metros, desde la superficie al interior de las cavernas.

El cálculo de la cantidad de recarga se realizó por balance de cloruros en estado estacionario. La falta de datos en la cantidad de precipitación diaria, impidió efectuar un balance hidrometeorológico, sin embargo, si se consideran los valores de las lluvias medias mensuales (tabla 6) y los resultados del cálculo de la evapotranspiración (tablas 13 y 14), se obtiene una relación simple de esta medida.

De esta forma, la estimación de la recarga a partir del balance de cloruros, indica que la mayor cantidad de recarga, que alcanza aproximadamente a un 74%, se produce en la zona de Vaitea, lo que concuerda con antecedentes que señalan una mayor cantidad de precipitaciones en ese sector, este porcentaje de recarga disminuye a medida que se desciende en cota y los contenidos de cloruros aumentan, hasta alcanzar valores cercanos a un 2%. Por otra parte, el balance hidrometeorológico (su simplificación), entrega más bien información sobre la variación mensual de la cantidad de recarga a lo largo de año, presentándose casi nula o inexistente en los meses de verano, a valores máximos de casi el 50% en los meses de mayor cantidad de precipitación. Sin embargo, un factor que hay que considerar, es que estos balances están referidos a unidades anuales para el primero, y unidades mensuales para el segundo. Y desde este punto de vista, no toman en cuenta las intensidades con que se producen las precipitaciones. De esta forma, si el total de las precipitaciones mensuales se propusieran en un número pequeño de eventos de lluvia, pero de gran intensidad, como los expresados en las precipitaciones máximas en 24 horas de la tabla 7, y se comparan con los valores de la evapotranspiración potencial diaria (tabla 13), se puede establecer que la infiltración alcanzaría porcentajes superiores al 90% de la cantidad de precipitación, cantidad muy superiores a la obtenida por los dos primeros métodos.

Químicamente, las aguas de los tubos volcánicos, de composición cloruradasódicas, presentan una buena correlación con la composición química de las aguas de lluvia (a excepción de los contenidos de Ca^{2+}), como se puede apreciar en los gráficos de las relaciones iónicas, donde generalmente estos dos tipos de muestras aparecen agrupadas. Sin embargo, en la relación $r\text{Cl}/r\text{Br}$, esta característica no se cumple, presentando valores que sitúan a estas muestras por debajo del valor de la relación marina. Situación que señalaría algún proceso que no se ha podido determinar, y no tendría una explicación clara, ya que el resto de las aguas subterráneas, se presentan sobre o muy cercanos al valor presente en el agua de mar.

Para establecer los tiempos de residencia de estas aguas, se ha considerado que ellas se infiltran, con una circulación preferentemente vertical, a través del escaso suelo y del material rocoso que presenta una alta permeabilidad y un fuerte fracturamiento. Según lo anterior, el modelo de flujo de mejor ajuste correspondería al de flujo pistón (PM). Y como ya se señaló, la aplicación del código MULTIS, generó para este modelo resultados que varían de 2 a 36 años, considerando ambas funciones de entrada.

Los valores obtenidos para el tiempos de residencia media (t), pueden ser acotados aún más considerando la ecuación $t = (H \cdot m)/Q$, que involucra los valores de la recarga (Q) en mm/año, de la porosidad de la roca (m) en %, y del espesor del acuífero (H) en metros. Y que de acuerdo a las características de los tubos volcánicos, arrojaría valores que irían de algunos meses a no más de 5 años.

2.2.3. Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas presentan un comportamiento general clorurado-sódico y se sitúan en un rango comprendido entre las características de las muestras de agua lluvia y tubos volcánicos, a características más bien propias del agua de mar. En el estudio de las relaciones iónicas, los valores obtenidos para las relaciones $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3+\text{CO}_3$, $r\text{Mg}/r\text{Cl}$, $r\text{Cl}/r\text{Br}$ y $r\text{Mg}/r\text{Ca}$, ponen de manifiesto que al aumentar el grado de mineralización y de la proximidad a la línea de costa, el valor de dichas

relaciones se aproxima al obtenido para el agua de mar. En las relaciones rSO_4/rCl y rNa/rCl , si bien se observa el mismo comportamiento, las muestras presentan una mayor dispersión.

La creciente similitud con las características químicas del agua de mar de estas muestras, puede ser explicada en parte por dos procesos:

1. Producto de la aportación del aerosol marino, que es transportado por el viento tierra adentro, hasta las zonas de los sondeos, y/o también, producido por otros fenómenos, como por ejemplo, marejadas y/o tsunamis (González-Ferrán, 1978) que se han producido constantemente en el tiempo y que aportan con su contenido salino en los sectores costeros, especialmente en el sector este de la Isla.
2. producto de fenómenos de intrusión marina, inducida por bombeos, que modifican la posición de la interfase agua dulce-salada, produciendo una cuña de agua salada que incrementa la salinidad de las aguas del sector.

Este último factor, de acuerdo con el estudio de mezclas de aguas del capítulo 4, alcanzaría valores de casi un 5% para el sondeo 19 y de 4,3 a 2,3, Para los sondeos 21 y 13. La mezcla teórica obtenida en el cálculo, tendría una muy buena correspondencia con el agua de mezcla real, en el primer caso. Mientras que en los otros dos casos, la composición del agua teórica con la real, presenta variaciones algo mayores. En otros puntos de la isla como los pozos y especialmente el sondeo 14, aunque el cálculo de mezcla de aguas no se realizó, es claro que el fenómeno de intrusión marina existe, ya que es una de las aguas con una de las conductividades más altas, y además, se encuentra en el mismo sector que la muestra 13, pero aún más cerca del mar.

Las aguas de la recarga, como se mencionó, se infiltran con una circulación preferentemente vertical. En su descenso por la zona no saturada comienzan a ganar mineralización hasta alcanzar el nivel de saturación. Desde este punto, el agua busca la descarga hacia el mar y cambia el flujo de vertical a aproximadamente horizontal. Existen, sin embargo, algunos indicios en el sentido de que este comportamiento puede ser afectado por la existencia de obstáculos,

como los paleosuelos formados durante los períodos de inactividad volcánica, y que dificultan el descenso vertical del agua a través de la zona no saturada.

Así, al contrastar los distintos modelos de flujo utilizados para obtener el tiempo medio de residencia de las aguas subterráneas, con el modelo de circulación planteado en el párrafo anterior, se puede señalar que excluyendo los posibles obstáculos que se pueden presentar en el recorrido de las aguas, y considerando la profundidad a la que se encuentra la superficie piezométrica graficada en la figura 8, los modelos de flujo que mejor describen el sistema, corresponderían a los modelos de flujo EPMs y LPMs (figura 34 a y b), con un predominio del PM sobre el EM y el LM, especialmente en los sondeos ubicados a mayor cota topográfica. Si además, los valores obtenidos para estos modelos (Tabla 35), se comparan con la ecuación discutida anteriormente en el apartado de la recarga, se tiene que las edades más representativas serían las comprendidas hasta tiempos de 30 a 35 años.

2.2.4. Lagunas

El comportamiento químico de las aguas de las dos lagunas estudiadas, si bien es clorurado-sódico para ambas, es bastante distinto entre si.

Para el caso de la laguna de Rano Aroi (muestra L-1), presenta características químicas con clara afinidad a las muestras de las aguas lluvias y de los tubos volcánicos, presentándose muy cercanas a ellas en los gráficos de las relaciones iónicas. La muestra de la laguna Rano Kau (L-2), sin embargo, no muestra afinidad a ningún otro tipo de agua, presentando características muy particulares. Así por ejemplo, se observa que aunque es una de las de menor conductividad, sus proporciones iónicas se asemejan más a las muestras de mayor concentración como se observa en la figura 12. Por otra parte, en algunas de las relaciones iónicas, como por ejemplo rCl/rBr , presenta valores que se aproximan a la relación marina. Todas estas características, apuntan en el sentido de que esta laguna conforma un micro sistema hidrológico, con características que se alejan del comportamiento general del resto de la isla. Esto producido por factores como el fuerte confinamiento producido por las paredes de la caldera, una de las cuales

está severamente erosionada por el mar y que permite la interacción con él (figura 4), y por otra parte, características como su abundante vegetación.

Según los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , que se presentan muy pesados (figura 28), se puede establecer que esta laguna sufriría de una fuerte tasa de evaporación. Para el caso de Rano Aroi, si bien no se poseen datos isotópicos, se presume que la evaporación estaría presente de igual forma, aunque en una tasa algo menor, ya que se encuentra a una mayor altura y las temperaturas en ese sector de la isla son menores.

3. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados por la presente memoria, y como resultado de la aplicación de distintas metodologías y técnicas isotópicas e hidrogeoquímicas se pueden señalar las siguientes conclusiones:

1. El nivel piezométrico de la isla presenta las siguientes características:
 - Se encuentra a muy pocos metros por sobre el nivel del mar en cualquier punto de la isla, no superando los 3 metros sobre el nivel del mar en los sondeos centrales a un valores casi nulos en los bordes de la isla.
 - Su punto más alto coincidiría aproximadamente con el centro del volcán Terevaka considerando que tiende a adoptar la forma de la topografía.
 - Presenta un sentido de flujo centrífugo, que se orienta principalmente hacia los tres vértices de la isla.
2. La composición química de las aguas de Isla de Pascua, presentan una clara evolución en su recorrido por el ciclo hidrológico desde las precipitaciones hasta las aguas de los pozos en la costa.
 - Esta evolución comienza, en las aguas de lluvia, con una composición iónica clorurada-sódica a bicarbonatada-clásica, para luego generar las aguas de mineralización un poco mayor, reconocidas en los tubos volcánicos y que son representativas del agua de recarga, y que presentan una composición marcadamente clorurado-sódica con valores de las relaciones iónicas más próximos a los valores de la precipitación que a los valores de las muestras de aguas subterráneas recolectadas

en cotas inferiores. Esta mayor semejanza con la composición química del agua de lluvia, se debe al corto tiempo de residencia de estas aguas en el acuífero, sumado a una baja solubilidad de los materiales que componen las lavas, que incidiría en una escasa aportación iónica. Las aguas subterráneas, también son de composición clorurada-sódica, y muestran un aumento significativo de su concentración iónica a medida que están más cerca del mar, hasta alcanzar valores máximos en las aguas de los pozos, que son las representantes de la descarga.

3. La recarga al sistema se produce exclusivamente por la precipitación, ya que no existen, otros mecanismos de recarga, como ríos o embalses artificiales. El aporte de las lagunas no se considera significativo ya que en el caso de Rano Aroi es de un tamaño muy pequeño en comparación con todo el edificio volcánico que constituye el acuífero; y en el caso de Rano Kau, sus posibles aportes estarían restringidos solamente al cono homónimo.
4. La zona de recarga del acuífero, según las rectas altitudinales generadas por los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las aguas subterráneas y de los tubos volcánicos, estaría comprendida entre una cota mínima equivalente a aproximadamente al punto en superficie del sondeo, es decir entre los 30 y 100 metros y un máximo de 225 a 300 metros. Estos valores implicarían que una proporción importante de la recarga de la lluvia se produciría principalmente en las zonas de cota intermedia de la isla, donde las precipitaciones son mayores; y que además, las precipitaciones caídas en las partes más altas escurrirían superficialmente hacia sectores más bajos y con menor pendiente para infiltrarse.
5. La recarga en la isla presenta un promedio anual que alcanza un valor de aproximadamente un 74% de la cantidad de precipitación. Esta cantidad, depende en gran medida de la intensidad con que se produzcan las precipitaciones.
6. La recta meteórica local (LML) de Isla de Pascua esta definida por la expresión $\delta\text{D} = 7,6 * \delta^{18}\text{O} + 9,2$. Calculada a partir de los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las muestras de precipitación, una vez descartadas aquellas muestras que

presentan fraccionamiento isotópico por evaporación. Y que presenta una pendiente levemente inferior a la recta meteórica mundial.

7. El tiempo de residencia de las aguas comprende rangos de edades que van de 2 a 30 años. Dependiendo de la naturaleza de las aguas involucradas y el modelo de flujo empleado.
 - Así, los tiempos de residencia media para los tubos volcánicos sería de 2 años para la C-1 y C-3 y 3 años para la C-2.
 - Las aguas de los sondeos del sector de Hanga Roa (M-7, M-21, M-25, M-26 y M-27) presentarían edades de residencia en torno a los 19 y 18 años.
 - Para las aguas del sector este los tiempos de residencia serían más variables con 13 a 14 años para las muestras M-13, y M-19, y de 7 años para la muestra M-24.
 - La muestra del sondeo 23 presentaría edades de 30 años, si se considera que su recorrido es 100% PM en su recorrido a la zona saturada; a 10 años con un 10% de EM.
 - Por último, la edad de residencia media del agua en las lagunas se aproximaría a los 33 o 36 años para Rano Kau.

4. RECOMENDACIONES

Las presentes recomendaciones apuntan principalmente a medidas de cuidado y prevención del acuífero (y de su zona de recarga), frente a posibles agentes contaminantes. Junto con analizar algunos aspectos sobre la ubicación de un vertedero en la isla.

En primer lugar, si se consideran las características de los sondeos de la isla (capítulo 3), se puede observar que, a excepción de los utilizados para el abastecimiento de agua potable, la mayoría de ellos se encuentra abandonado o sin una adecuada protección, especialmente los ubicados en el sector este (13, 14 y 19). Este hecho, es un factor de potencial peligro, ya que por ellos pueden entrar cualquier tipo de sustancia directamente al acuífero.

Debido a la alta permeabilidad propia de las rocas volcánicas, tanto por la porosidad como por el fracturamiento, el acuífero es en general, muy vulnerable a la contaminación por vertidos de residuos sólidos o líquidos. Aspecto que adquiere mayor importancia en lo referente a la zona de recarga. Donde se debiera evitar la instalación de todo tipo de fábricas o industrias que no adopten las medidas de seguridad correspondientes.

Desde este punto de vista, y considerando la localización actual del vertedero y su relación espacial con la zona de recarga, se recomienda el traslado de este a un lugar cuya cota no exceda al de la zona de recarga, o al menos no se encuentre en la línea de flujo de ningún sondeo.

La elección del sector apropiado, depende de muchos factores a considerar, como económicos, o simplemente al hecho de que gran parte de la Isla es parque y monumento nacional y en toda ella es posible encontrar valiosos registros arqueológicos. Sin embargo, basándose exclusivamente en las características hidrogeológicas, los mejores sitios corresponderían a los ubicados en el sector costero, entre unos 15 o 30 m.s.n.m, donde el agua es rápidamente descargada y los líquidos percolados expulsados fuera del sistema.

Para la situación actual del vertedero, se recomienda la instalación de un sondeo de monitorización de aguas, entre el vertedero y los sondeos de agua potable, con el fin de detectar a tiempo cualquier signo de contaminación o cambios en la composición normal.

Por último, cabe señalar que el peligro de intrusión marina en los sondeos producto de un excesivo bombeo, es mayor para aquellos sondeos que se ubican a cotas cercanas al nivel del mar, disminuyendo progresivamente hacia el interior de la isla.

BIBLIOGRAFÍA

- **Alamos, F.** 1979. Proyecto de racionalización, mejoramiento y ampliación de la red de agua potable, pozos de captaciones y estanques acumuladores. Informe Inédito. Hanga Roa. 69 p.
- **Alamos y Peralta. Ingenieros Consultores,** 1992. Recursos hídricos de Isla de Pascua, Estudio del regadío de Isla de Pascua, I etapa: Estudio Hidrogeológico. Informe Inédito. Comisión Nacional de Riego. Secretaria Ejecutiva. 130 p.
- **Alcayaga, S.; Narbona, M.** 1970. Características hídricas de los suelos de Isla de Pascua. Informe inédito. CORFO. Gerencia Agrícola. División de Agricultura. Departamento de desarrollo Agrícola. Sección estudios de suelos. 18 p.
- **Ball, J. W.; Nordstrom, D. K.** 1991. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters: U.S. Geological Survey Open-File Report 91-183, 6 pp.
- **Baker, P. E.; Buckley, F.; Holland, J. G.** 1974. Petrology and geochemistry of Easter Island. Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 44, p. 85-100.
- **Bonatti, E.; Harrison, C. G. A.; Fisher, D. E.; Honnorez, J.; Schilling, J. G.; Stipp, J. J.; Zentilli, M.** 1977. Easter volcanic chain (Southeast Pacific): a mantle hot line. Journal of geophysical research. Vol. 2, No. 17, p. 2457-2478.

- **Castilla, J.; Olivia, D.** 1987. Islas Oceánicas Chilenas: Aspectos descriptivos y potencialidades. *In Islas Oceánicas Chilenas: Conocimiento científico y Necesidades de Investigaciones* (Castilla, J. C.; editor). Ediciones Universidad Católica de Chile, p.15-35. Chile
- **Clark, J.; Dymond, J.** 1977. Geochronology and petrochemistry of Easter and Sala y Gomez Islands: implications for the origin of the Sala y Gomez Ridge. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 2, p. 29-48.
- **Custodio, E.** 1986: Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains. *In Isotope Techniques in the Study of the Hydrology of Fractured and Fissured Rocks*. International Atomic Energy Agency. Vienna. p. 87-137.
- **Custodio E.; Llamas, M. R.** 1986. Hidrología Subterránea. Editorial Omega. Vol 1-2, 2350 p. Barcelona
- **Custodio, E.; Herrera, C.** 2000. Utilización de la relación Cl/Br como trazador hidrogeoquímico en hidrología subterránea. *In Bol. Geol. Min. de España*. Madrid. 111: 49-67.
- **Drever, J. I.** 1997. The Geochemistry of natural waters. Surface and Groundwater Environments. Third Edition. Prentice Hall: 1-146.
- **González-Ferran, O.** 1987. Evolución geológica de las Islas Chilenas en el Océano Pacífico. *In Islas Oceánicas Chilenas: Conocimiento científico y Necesidades de Investigaciones* (Castilla, J. C.; editor). Ediciones Universidad Católica de Chile, p.37-54. Chile
- **Haase, K. M.; Stoffers, P.; Garbe-Schönberg, C. D.** 1997. The petrogenetic evolution of lavas from Ester Island and neighbouring

seamounts, near-ridge hotspot volcanoes in the SE Pacific. *Journal of petrology*. Vol. 38, No. 6, p. 785-813

- **Hajek, E.; Espinoza, G. A.** 1987. Meteorología y Bioclimatología de las Islas Oceanicas Chilenas. *In Islas Oceánicas Chilenas: Conocimiento científico y Necesidades de Investigaciones* (Castilla, J. C.; editor). Ediciones Universidad Católica de Chile, p.55-83. Chile
- **Hauser, A. Y.**, 1986. Una alternativa de abastecimiento de agua para Hanga Roa, Isla de Pascua, Quinta Región, Chile. Miscelánea N° 5. Informe Inédito. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- **Hoffmann, A. J.; Marticorena, C.** 1987. La vegetación de las Islas Oceánicas Chilenas. *In Islas Oceánicas Chilenas: Conocimiento científico y Necesidades de Investigaciones* (Castilla, J. C.; editor). Ediciones Universidad Católica de Chile, p.127-165. Chile.
- **Mammerickx, J.; Anderson, R. N.; Menard, H. W.; Smith, S. M.** 1975. Morphology and tectonic evolution of the East-Central Pacific. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 86, p. 111-118.
- **Ministerio de Salud Pública.** 1969. Reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano. Ministerio de Salud Pública, Subdepto. De Protección De La Salud Servicio Nacional De Salud Sección Higiene Ambiental. Diario Oficial N°27.525 del 19 de diciembre de 1969.
- **Schmidt, R.** 1981. Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the International Union of geology sciences (I.U.G.S.). Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, *Geology*, 9, p. 41 - 43.

- **Streckeisen, A. 1967.** Clasificación y nomenclatura recomendada por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (I.U.G.S.), Subcomisión en Sistemática de Rocas Igneas. Traducción de Neues Jahrb. Miner, Abh. 107, pp. 144-240.

- **Zuber, A. 1986.** Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. *In* Handbook of environmental isotope geochemistry Volumen 2 (Fritz, P.; Fontes, J.Ch.; Editores). Elsevier, p 1-59. Ámsterdam.

ANEXO 1

**Tabla resultados análisis AIEA estación Isla de Pascua
(Período del 15/01/1964 al 15/12/2000)**

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-01-1964					22,7	65	23,2
15-02-1964					20,3	100	22,4
15-03-1964			17,2	0,8	24	113	23,5
15-04-1964			16,3	0,7	20,7	89	21,5
15-05-1964			20,4	0,9	18,9	190	19,8
15-06-1964					15,7	82	17,5
15-07-1964			17,9	0,9	17,1	209	18
15-08-1964					17,3	37	18,2
15-09-1964			145	6,9	16,2	43	18,2
15-10-1964					17,5	95	19
15-11-1964					19,3	220	20
15-12-1964					22	59	22,1
15-01-1965			14,7	0,7	25,7	99	25,3
15-02-1965					20,9	76	24,2
15-03-1965					19,7	53	23,1
15-04-1965			9,9	0,5	22,2	64	22,4
15-05-1965			12,6	0,7	18,5	224	19,9
15-06-1965			9,4	0,6	17,1	53	18,8
15-07-1965			11,8	0,6	18,5	55	19,1
15-08-1965			7,1	0,9	16,9	100	18,6
15-09-1965	3		17,5	1,1	17,4	50	18,7
15-10-1965			15,7	0,9	16	32	19,2
15-11-1965	2,8		15	1,1	18,8	93	20,5
15-12-1965			10,7	0,7	18,8	155	20,5
15-01-1966					17,5	125	19,6
15-02-1966					20,3	44	23,3
15-03-1966					20,4	90	22,5
15-04-1966					21,9	222	21,4
15-05-1966					20	103	20,7
15-06-1966			96,4	3,9	15,8	40	18,6
15-07-1966			119	4,7	17,2	76	18,9
15-08-1966					12,9	90	14,6
15-09-1966					15,3	59	18,3
15-10-1966					17,2	77	18,7
15-11-1966					17,8	282	19,7
15-12-1966					20,7	36	21,7
15-01-1967					21,6	71	23,9
15-02-1967					21,9	85	23,9
15-03-1967					22,2	61	23,7
15-04-1967					19	70	21,6
15-05-1967					17,3	36	19,4
15-06-1967					17,3	159	18,6

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-07-1967					16,5	57	18,3
15-08-1967					16,3	31	18,3
15-09-1967			14,6	0,8	16	82	19
15-10-1967					20	48	21,3
15-11-1967			14,6	0,9	22,5	50	22,8
15-12-1967			13,3	0,8	18,4	66	20,8
15-01-1968			12,9	1	21,1	92	23,5
15-02-1968			42,7	2,2	21,9	35	23,7
15-03-1968					21,2	23	22,7
15-04-1968			7,9	0,9	20,9	22	21,5
15-05-1968			7,6	0,8	18,5	20	20
15-06-1968			8,1	0,9	18	19	19
15-07-1968			6,9	0,8	17,6	19	18,6
15-08-1968					17,4	58	18,3
15-09-1968			10,2	0,7	16,9	152	17,9
15-10-1968					16,5	19	19,2
15-11-1968			7,4	0,8	18,9	21	20,7
15-12-1968			4,1	8,2	20,8	23	22,9
15-01-1969			11,9	0,8	22,7	85	23,6
15-02-1969	-5,2	-28,8	14,4	1	21,9	67	22,8
15-03-1969	-1,4	1,8	7,6	0,9	21,6	61	22,5
15-04-1969	-2,5	-1,3	8,6	0,8	20,6	85	21,8
15-05-1969	-3,6	-21,3	10	0,8	18	65	20,1
15-06-1969	-3	-15,1	4,4	0,4	18,9	85	19,5
15-07-1969	-2,8	-7,6	6,7	0,9	14,7	160	16,7
15-08-1969					15,5	82	17,8
15-09-1969	-1,6	-0,7	12,5	0,9	16,7	88	18,2
15-10-1969	-5,9	-34,4	12,3	0,7	16,2	64	19,3
15-11-1969					18,2	6	20,6
15-12-1969	-1,9	-1,9	7,2	0,4	20,1	69	22,3
15-01-1970	-0,8	-4,6	12,2	1,1	22,2	53	23,3
15-02-1970					23,9	94	23,4
15-03-1970	-2,5		10,4	0,6	23,6	96	23,4
15-04-1970			11	1	20,4	129	21,6
15-05-1970					18,2	64	19,9
15-06-1970		-20,6	28,4	1,9	16,5	111	18,5
15-07-1970		-3,8	4,4	3,5	16,3	23	18,3
15-08-1970					16,5	98	18
15-09-1970			15	1	15,1	31	17,2
15-10-1970			13,1	2,4	16,3	37	18,4
15-11-1970			10,6	3,3	16,8	39	20,4
15-12-1970			10	0,5	21,7	227	21,8
15-01-1971					19,9	44	23
15-02-1971			7,7	0,4	23,8	84	23,3
15-03-1971					21	48	22,8
15-04-1971			5,4	0,3	20,9	97	21,7
15-05-1971			6,4	0,3	20,9	119	21,5
15-06-1971	-1,8		5	0,4	17,8	41	18,9

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-07-1971	-0,8		5,3	0,4	17,6	43	19,2
15-08-1971	-0,7		8,7	0,6	16,7	93	18
15-09-1971			8,1	0,4	15,1	61	17,9
15-10-1971	-2,9		8,1	0,4	18,7	108	19,6
15-11-1971			9,8	0,5	19,6	46	21,2
15-12-1971	-2,5		8,7	0,5	22,1	59	20,5
15-01-1972	-3,6		6,3	0,3	23,9	89	24,2
15-02-1972					22,5	117	23,1
15-03-1972	-1,2		5,6	0,3	22,8	73	23,1
15-04-1972		28,9	5,9	0,4	21,9	57	22,2
15-05-1972	-2,5		5,2	0,4	18,2	98	20,3
15-06-1972	1,7		6	0,4	20,3	152	19,7
15-07-1972			6,9	0,5	16,5	118	18,2
15-08-1972	-2,3		1,4	0,3	16,5	79	18,3
15-09-1972			2,9	0,3	16,1	28	18,2
15-10-1972			7,1	0,7	17,6	55	19,5
15-11-1972			6	4,9	23,6	21	24,1
15-12-1972			7,5	0,6	22,2	77	21,7
15-01-1973					22,5	46	24,3
15-02-1973					22,7	57	23,3
15-03-1973			7,4	0,6	23	47	23,1
15-04-1973					23,2	95	22,3
15-05-1973					21,4	34	21,1
15-06-1973		30,1	5,6	0,6	17,4	67	19,1
15-07-1973	1,5	13,2	3,5	0,3	18,2	92	18,5
15-08-1973			8,2	0,5	16,1	186	17,9
15-09-1973	1,5	12,7	7	0,5	16,3	50	18
15-10-1973			7,3	0,6	17,8	53	19,7
15-11-1973					19,6	81	20,6
15-12-1973					21,1	48	21,7
15-01-1974						64	
15-02-1974						61	
15-03-1974						145	
15-04-1974						130	
15-05-1974						61	
15-06-1974						39	
15-07-1974						73	
15-08-1974						196	
15-09-1974						77	
15-10-1974						45	
15-11-1974						40	
15-12-1974						70	
15-01-1975					21,9	68	24,1
15-02-1975					22,5	44	23,3
15-03-1975					22,9	36	22,9
15-04-1975					23,1	162	22,4
15-05-1975					20,4	111	20,5
15-06-1975			5,6	0,3	17,1	35	19,2

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-07-1975					17	127	18
15-08-1975					16,9	105	18,1
15-09-1975			5,6	0,3	16,2	100	18,1
15-10-1975	-1,9	-7,5	5,8	0,3	15,7	107	18,2
15-11-1975			4,8	0,3	21,4	57	20,9
15-12-1975					22,6	127	21,7
15-02-1988						104	
15-03-1988						168	
15-04-1988						104	
15-05-1988						67	
15-06-1988						33	
15-07-1988						33	
15-08-1988						96	
15-09-1988						87	
15-10-1988						78	
15-11-1988						23	
15-12-1988						32	
15-01-1989						31	
15-02-1989						80	
15-04-1989						214	
15-05-1989						134	
15-06-1989						77	
15-07-1989						27	
15-08-1989						36	
15-09-1989						181	
15-10-1989						45	
15-11-1989						155	
15-12-1989						50	
15-01-1990						70	22,7
15-02-1990					23,5	110	23,1
15-03-1990					23,6		23,2
15-04-1990					21,6	38	21,9
15-05-1990					18,8	198	20,3
15-06-1990					18,8	206	20,1
15-07-1990					16,9	174	18,2
15-08-1990					17	66	18,3
15-09-1990	-0,5	-1			18,5	48	19,4
15-10-1990	-2,8	-15	1,1	0,3	17	18	19,5
15-11-1990	-1,3	-11	1,1	0,3	17,7	33	20,1
15-12-1990	-1	3	1,1	0,3	20,1	61	21,2
15-01-1991	-1,7	-10	13,4	0,6	21,1	75	22,5
15-02-1991	-2,2	-11	13,4	0,6	22	26	23,1
15-03-1991	0,1	-2	13,4	0,6	17,5	77	23,3
15-04-1991	-3,8	-27	2,1	0,2	21,9	351	22
15-05-1991	-4,7	-26	2,1	0,2	19	154	20,6
15-06-1991	-5,4	-36	2,1	0,2	17,4	145	19
15-07-1991	-1,9	-10	2	0,4	16,1	42	17,9
15-08-1991	-4	-22	2	0,4	15,3	52	17

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-09-1991	-4,4	-25	2	0,4	17	229	18,1
15-10-1991	-3,8	-20	1	0,4	16,1	68	18,6
15-11-1991	-0,9	-4	1	0,4	18,9	37	20,4
15-12-1991	-2,7	-16	1	0,4	21,8	48	22,1
15-01-1992	-2	-1,9	2,3	0,6	22,2	35	22,8
15-02-1992	-5,3	-27,7	2,1	0,6	23,3	140	23,6
15-03-1992	-3,4	-17,7	1,7	0,6	22,6	128	22,7
15-04-1992	-4,7	-24,1	1,2	0,6	21,6	190	21,7
15-05-1992	-3,2	-14,6	1,1	0,6	18	65	19,6
15-06-1992	-5,2	-25,2	1,3	0,6	18,6	69	18,9
15-07-1992	-2,5	-12,3	1,5	0,6	16,1	117	17,4
15-08-1992	-2,5	-12,3	1,5	0,6	17,6	125	18,4
15-09-1992	-2,5	-12,3	1,5	0,6	16,8	76	18,5
15-10-1992	0,2	4,2	2,3	0,6	18,3	40	19,8
15-11-1992	-0,2	5	1,1	0,6	18,7	25	20,6
15-12-1992	-2	-3,5	1,6	0,3	20,8	71	21,9
15-01-1993	-4,6	-28,5	1,6	0,4	26,4	33	23,5
15-02-1993	-2,6	-4,6	2,1	0,4	23,2	70	23,3
15-03-1993	-1,2	-3,1	2	0,4	23	179	22,4
15-04-1993	-0,6	3,2	1,8	0,4	23,6	48	22,6
15-05-1993			1,3	0,4	20,9	26	21,2
15-06-1993	-2,6	-1,7	1,6	0,4	18	152	19
15-07-1993	-1,7	-7,4	2,1	0,4	17,9	263	18,3
15-08-1993	-0,4	6,7	1,5	0,4	15,5	182	17,4
15-09-1993	-5	-30,6	1,9	0,4	15,9	357	17,4
15-10-1993	-6,5	-44,3	1,7	0,4	17,7	194	18,1
15-11-1993	1,2	10,6	2	0,4	18	11	20,2
15-12-1993	1,3	5,9	1,9	0,4	22,2	132	21,8
15-01-1994	-1,5	-3,6	2,1	0,3	25,5	67	23,7
15-02-1994					25,1	54	23,8
15-03-1994	-2,9	-10,8	2	0,4	23,6	171	22,6
15-04-1994	-2,7	-7	2,7	0,4	20,6	43	20,8
15-05-1994	-4,7	-22,5	1,8	0,3	18,8	157	19,3
15-06-1994			2,4	0,4	18,2	77	18,6
15-07-1994	-4,8	-26,8	2,9	0,3	18,4	121	18,2
15-08-1994	-3,6	-16,6	2,5	0,4	17,3	104	17,4
15-09-1994	-1,6	-10,4	3,3	0,4	17,8	169	18
15-10-1994	-3,2	-21,1	3,3	0,4	16	173	17,7
15-11-1994	-4,3	-24,2	2,4	0,4	18,9	34	20,1
15-12-1994	-1,2	-4,1	1,7	0,4	19,3	61	21,2
15-01-1995	-1,9	-3,8	1,4	0,4	20,8	79	22,8
15-02-1995	-1,9	-4	1,4	0,4	25,1	52	23,9
15-03-1995	-3,9	-18,8	1,8	0,4	25,5	122	23,5
15-04-1995	-2,9	-12,5	0,8	0,4	24	165	22,6
15-05-1995	-0,9	-2,4	1,4	0,4	20,6	191	20,3
15-06-1995	0,2	8,3	1,1	0,4	18,6	54	18,8
15-07-1995	-2,8	-12,4	1,5	0,4	18,3	238	18,4
15-08-1995	0,5	6,2	2,5	0,4	17,1	14	17,8

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-09-1995	-0,5	7,8	1,7	0,3	17,4	12	18,1
15-10-1995	-1,1	-0,7	1,4	0,3	17,5	157	18,4
15-11-1995	-0,1	5,8	1,7	0,3	19,9	46	19,8
15-12-1995	-3	-11	1,8	0,3	22,5	126	21,6
15-01-1996	3,2	21	23,6	2,6	24,2	27	22,9
15-02-1996	-1,9	-2,7	1,9	0,3	24,9	74	23,1
15-03-1996	-1,9	-9,8	1,7	0,5	23,3	19	23
15-04-1996	-2,5	-6,2	1	0,3	23,2	105	21,7
15-05-1996	1,1	10,3	1,6	0,3	20,8	120	20,1
15-06-1996	2,5	16,2	1,6	0,3	17,1	171	18
15-07-1996	3,3	17,9	24,4	2,2	15,6	142	17,1
15-08-1996	-5	-27,9	1,4	0,3		142	17,1
15-09-1996	-3,5	-18,1	1,5	0,3	17,7	76	17,9
15-10-1996	-0,1	4,3	1,3	0,3	17,9	52	19
15-11-1996	-0,1	3,2	1,5	0,3	19,3	29	20,6
15-12-1996	1,3	12,6	1,3	0,3	21,8	55	22,6
15-01-1997	2	19,2	2,8	0,6	23,2	42	23,8
15-02-1997	-3,3	-11,2	2,5	0,4	23,6	54	23,9
15-03-1997	-4,9	-32,7	1,2	0,4	23,9	175	23,3
15-04-1997	-5,4	-27,3	1,4	0,4	22,5	319	21,2
15-05-1997	-5,5	-27,9	1,5	0,4	16,8	44	19,4
15-06-1997	0,4	6,6	1,4	0,4	18,1	96	18,6
15-07-1997	0,7	11,8	2,2	0,3	16,7	142	17,5
15-08-1997	-6,9	-48	2,7	0,4	18,2	194	18,4
15-09-1997	0,4	4,7	1,6	0,3	15,7	134	17,7
15-10-1997	-2,7	-5,9	1,2	0,3	16,9	39	18,4
15-11-1997	-0,6	7,3	1,3	0,3	18,9	39	20,4
15-12-1997					18,9	42	20,7
15-01-1998	-0,5	7,5	5,4	0,4	20	12	21,6
15-02-1998	1	8,9	4,1	0,3	22,3	78	22,6
15-03-1998	1,5	18,8	5,4	0,4	21,6	76	22,4
15-04-1998	1,4	12,9	3,2	0,3	19,9	108	20,9
15-05-1998	2	11,8	3,5	0,3	18,8	184	18,8
15-06-1998	-3,1	-11,8	3,9	0,3	17,9	172	17,6
15-07-1998	-2,2	-6,7	3,4	0,3	15,2	55	16,3
15-08-1998	-1,3	-2,2	3,7	0,3	16,5	75	17,2
15-09-1998	0,1	7,5	3,7	0,3	16,6	66	18,2
15-10-1998	-2,4	-6,4	3,1	0,3	17,6	31	19,2
15-11-1998	1,3	6,3	2,9	0,3	18,7	44	20,4
15-12-1998	0,3	3,8	2,3	0,3	20,4	18	22
15-01-1999	-0,8	1,8	2,6	0,3	23,2	120	23,2
15-02-1999	-0,2	5,8	2	0,3	24,1	62	23,5
15-03-1999	-1,8	-0,4	2,3	0,3	22,6	28	23,1
15-04-1999	-2,5	-5,3	2	0,3	19,9	162	21,7
15-05-1999	-2,2	-3,5	2,1	0,3	16,4	98	19,6
15-06-1999					17,1	61	19,2
15-07-1999					16,9	85	18,2
15-08-1999	-1,4	2,2	1,3	0,3	15,5	90	18,2

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-09-1999	3,5	22,2	1,6	0,3	15,8	40	18,6
15-10-1999	-0,1	9,3	2,1	0,2	16,2	27	19,4
15-11-1999	-2	-2,2	0,6	0,3	18,5	95	21,2
15-12-1999	-1,9	-3,6	1,6	0,3	19,5	141	22,2
15-01-2000	-3,4	-16,4	2,2	0,4		171,2	19,9
15-02-2000	1,8	15,4	1,6	0,5		80,4	28
15-03-2000	-1,9	-1,4	1,7	0,4		115	23,7
15-04-2000	-0,5	3,3	2,2	0,4		128,2	22
15-05-2000	-2,1	-2,8	1,4	0,3		75,4	20
15-06-2000	1,5	12,9	1,1	0,3		19,8	19,5
15-07-2000	-5,1	-23,6	1,1	0,3		168,4	19,3
15-08-2000	1,6	11,2	1,5	0,3		169,4	17,8
15-09-2000	-0,8	4,8	1	0,3		43,2	18,8
15-10-2000	-1,2	-1	1	0,3		343,7	19,5
15-11-2000	-1,8	-4,3	1,1	0,3		95	21,4
15-12-2000	-1,1	2,5	1,2	0,3		56,2	22,7
Total	144	135	198	198	250	297	264

ANEXO 2

Programa AIEA/OMM sobre la composición isotópica de la precipitación: Global Network Of Isotopes In Precipitation (GNIP)

I. Introducción

El Organismo Internacional de Energía Atómica, en cooperación con la Organización Meteorológica Mundial ha establecido desde hace muchos años una red mundial de estaciones para la colección de muestras mensuales de precipitación, con objeto de determinar la composición isotópica. La información isotópica y meteorológica obtenida a través de esta red de estaciones meteorológicas y redes nacionales se encuentra almacenada en una base de datos, que está disponible a través de INTERNET. Los isótopos, cuyas variaciones de contenido se determinan son los estables de oxígeno-18 y de hidrógeno-2 (deuterio), así como el isótopo radiactivo de hidrógeno-3 (tritio). Estos datos se utilizan como base para las investigaciones de hidrología isotópica y para estudios meteorológicos y climatológicos.

Para obtener datos isotópicos fiables es indispensable observar en detalle el procedimiento que se describe mas adelante. Ante todo se debe evitar la evaporación, porque el proceso de evaporación afecta notablemente la composición isotópica del agua de la muestra.

Por consiguiente, es indispensable utilizar frascos herméticos para conservar, expedir y almacenar las muestras de precipitación recogidas para su análisis isotópico. Es aconsejable utilizar los frascos facilitados por el OIEA, cuyo hermetismo ha sido comprobado. Igualmente, durante la recolección, se debe retirar el agua del depósito colector de lluvia inmediatamente después de haberse producido la precipitación, o se debe proteger la muestra contra la evaporación con aceite de parafina medicinal.

II. Procedimiento técnico para el muestreo de precipitación para análisis isotópicos

1. Cada muestra debe representar la precipitación integrada de un período de un mes, a partir del primer día del mes hasta el último del mismo.
2. Los frascos provistos por el OIEA tienen un volumen de medio litro (para análisis de tritio) y de 50 ml (para el análisis de isótopos estables), cantidades de agua que se consideran el óptimo necesario para los análisis isotópicos. Se necesita un mínimo de 300 ml de agua para efectuar los análisis de tritio, deuterio y oxígeno-18. Cuando solo se disponga de cantidades menores (por ejemplo, debido a que la precipitación haya sido escasa), se debe enviar de todos modos el agua recogida al laboratorio encargado de los análisis isotópicos, que en tal caso solo efectuará algunos de los mismos. Si el tritio y los

isótopos estables se analizan en diferentes laboratorios, se llenará un frasco de 50 ml para el análisis de isótopos estables y con el resto del agua se llenará el frasco de medio litro (o parte del mismo, si la muestra es insuficiente) para el análisis del tritio.

3. El agua de lluvia se recoge en un pluviómetro normal, haciéndose una lectura del volumen recogido y vaciándose el pluviómetro tan pronto como sea posible después de cada precipitación, de ser factible, o cada mañana. Después de la lectura del pluviómetro se debe verter la precipitación en un recipiente de plástico de 5 litros con un buen tapón para evitar la evaporación. Guárdese este recipiente en un lugar fresco y oscuro. Es muy importante que el tapón esté siempre bien cerrado: en efecto, la evaporación modifica la composición isotópica del agua, y por lo tanto se deben tomar todas las precauciones posibles para evitarla.

4. Es absolutamente indispensable transferir el agua después de cada precipitación, o cada día, y secar cada vez el colector del pluviómetro con un trapo limpio y seco antes de volver a instalarlo en la posición de recolección

5. Si el agua de lluvia debe permanecer varios días en el colector del pluviómetro (que puede consistir sencillamente en una botella de plástico con un embudo) antes de transferirlo a un recipiente hermético, es necesario poner aceite de parafina medicinal, que se adquiere fácilmente en una farmacia, en el recipiente colector del pluviómetro, para impedir la evaporación. La película flotante de parafina sobre el agua debe tener un espesor de 0,5 cm aproximadamente. El agua de lluvia con el aceite de parafina se puede transferir periódicamente al recipiente hermético. Al cabo de un mes se puede separar el agua del aceite con un embudo separador o sencillamente retirando el aceite con un sifón.

6. Al cabo del mes, se debe agitar toda el agua contenida en el recipiente hermético antes de llenar los frascos que se han de enviar al laboratorio. Si el aceite de parafina medicinal se encuentra presente, no se debe agitar el recipiente, sino que se lo debe dejar en reposo durante una semana antes de llenar los frascos. Con esto se obtiene una mezcla conveniente y se evita que el aceite se emulsione con el agua, lo que haría más difícil la separación.

7. Si la cantidad de agua recogida en un mes cualquiera excediera de 5 litros, se puede utilizar una segunda botella de 5 litros para acumular el agua excedente. Al final del mes se debe mezclar toda el agua de los dos recipientes antes de llenar los frascos con las muestras. Las operaciones descritas en los párrafos 3 a 7 se deben efectuar lo más rápidamente posible, a fin de reducir el tiempo durante el cual la muestra quede expuesta a la atmósfera y corra por lo tanto el riesgo de evaporación.

8. Si se utiliza el aceite de parafina medicinal y no se lo puede separar del agua en el lugar de la recogida esta separación se hará en el laboratorio encargado del análisis isotópico. En tal caso, se tratará de minimizar la cantidad de aceite presente en el frasco de medio litro que se expide al laboratorio, cerciorándose de que la cantidad de agua enviada excede en gran medida a la del aceite. Se debe recordar que se necesita por lo menos una cantidad de 300 ml de agua para el análisis del tritio, del deuterio y del oxígeno-18.

9. Al cabo del mes, cuando se hayan llenado los frascos de muestras, se debe secar el recipiente de 5 litros antes de utilizarlo para acumular la precipitación del mes siguiente.

10. En ningún caso se llenará completamente un recipiente de plástico. Déjese siempre un pequeño espacio de aire (más o menos el 5% del volumen del frasco) para permitir la expansión del agua resultantes de posibles aumentos de temperatura, o de descensos por debajo del punto de congelación. Se deberá procurar utilizar en todos los casos los frascos facilitados por el OIEA, y se verificará que el tapón queda herméticamente cerrado.

11. Se marcará claramente en las etiquetas facilitadas por el OIEA la información relativa a la estación de observación, al mes y a la cantidad de la precipitación total. Los frascos se marcarán inmediatamente después de llenados.

12. Conviene cerciorarse de que no existan objetos agudos en la caja (por ejemplo, tornillos, clavos, astillas de madera) de expedición de los frascos. Dichos objetos pueden perforar las botellas de plástico.

Viena, Septiembre de 1996

ANEXO 3

**Tabla resultados análisis AIEA estación Islas Cook (Nueva Zelanda)
(Período del 15/01/1957 al 15/12/1994)**

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-01-1957					29	306	25,8
15-02-1957					28,5	241	25,4
15-03-1957					26,5	122	25,2
15-04-1957					27,5	431	25,1
15-05-1957					21,8	42	22,8
15-06-1957					24,2	143	23,5
15-07-1957					20,2	86	21,7
15-08-1957					18,6	71	21,4
15-09-1957					19,4	105	22,1
15-10-1957			4,4	0,5	21,5	135	22,2
15-11-1957					23,5	348	23,8
15-12-1957					26,4	41	24,8
15-01-1958			2,1	1,1	21,4	162	22
15-02-1958					26,9	66	25,6
15-03-1958					29,2	177	25,6
15-04-1958			3	0,3	27,3	182	25,1
15-05-1958					23,8	164	23,6
15-06-1958					20,2	147	20,9
15-07-1958			3	0,4	22,8	76	21,7
15-08-1958					20	195	21,1
15-09-1958					18,9	183	20,8
15-10-1958					20,8	80	22
15-11-1958					25,1	60	23,3
15-12-1958					23,8	262	23,4
15-01-1959					31,9	514	27,1
15-02-1959					29,5	239	25,8
15-03-1959					30,5	306	25,6
15-04-1959					27	192	25,3
15-05-1959					22,3	217	24
15-06-1959					22,3	241	23,3
15-07-1959					20,8	126	21,6
15-08-1959					20,2	13	21,3
15-09-1959					20	103	21,3
15-10-1959					20,7	42	23
15-11-1959					22,7	378	22,8
15-12-1959					27,7	294	24,9
15-01-1960					28	419	25,3
15-02-1960					26,4	313	24,9
15-03-1960					27,5	271	24,8

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire $^{\circ}\text{C}$
15-04-1960					29	77	25,9
15-05-1960					23,5	259	23,2
15-06-1960					21,2	43	21,7
15-07-1960					21	82	22,1
15-08-1960					21,4	167	21,6
15-09-1960					22,7	116	23
15-10-1960					20	91	22,4
15-11-1960					24	140	24,1
15-12-1960					26,9	245	25,6
15-01-1961					28,5	120	25,6
15-02-1961					31,1	112	26,9
15-03-1961					29,4	228	26,1
15-04-1961					27,5	114	25
15-05-1961					25,3	96	23,8
15-06-1961					20,9	67	22,3
15-07-1961					23,6	88	22,1
15-08-1961					20,8	106	21,4
15-09-1961					22,4	93	22,8
15-10-1961					21,6	186	23
15-11-1961					22,1	108	23,6
15-12-1961					27	419	24,7
15-01-1962					27,4	342	25,3
15-02-1962					28,8	290	25,2
15-03-1962					29,5	157	25,8
15-04-1962					27,2	314	25,2
15-05-1962					24	181	23,3
15-06-1962					19,7	90	21,3
15-07-1962					20,8	110	21,8
15-08-1962					19,1	171	21,2
15-09-1962					21,8	209	22,1
15-10-1962					20,2	16	22,8
15-11-1962					23,2	157	23,6
15-12-1962					23,8	252	24
15-01-1963			8,1	0,6	27,8	200	25,2
15-02-1963			7,1	0,5	29,2	207	25,8
15-03-1963			6,2	0,4	27,2	343	25,2
15-04-1963			10,6	0,7	25,8	129	24,5
15-05-1963					23,8	131	23,2
15-06-1963			12,9	0,8	20,7	24	22,3
15-07-1963			35,6	2,2	19	48	20,3
15-08-1963			20,9	1,3	19,1	101	20,8
15-09-1963			8,2	0,5	19,2	136	21,3
15-10-1963			16,2	1	20,2	209	21,7
15-11-1963			11,6	0,7	24	113	23,9

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-12-1963			9,3	0,6	25,1	113	24,7
15-01-1964			10	0,6	29,7	332	25,9
15-02-1964			8,2	0,5	26	182	26,1
15-03-1964					28,2	391	25,6
15-04-1964			9,1	0,6	27,7	157	24,9
15-05-1964					25	201	24,4
15-06-1964			7,8	0,5	21,5	125	22,3
15-07-1964			9,5	0,6	21,7	84	21,5
15-08-1964			13,7	0,8	21,2	25	22,3
15-09-1964			18,2	1,1	22,3	192	22,9
15-10-1964			27,1	1,6	24	141	23,7
15-11-1964			11,6	0,7	24,1	124	24,4
15-12-1964					22,3	86	23,8
15-01-1965			14,4	0,9	26,1	260	24,7
15-02-1965			10	0,6	27	105	25,3
15-03-1965			12,5	0,8	25,6	145	24,4
15-04-1965			10,5	0,6	25,3	247	24,4
15-05-1965					24,4	267	23,6
15-06-1965			8,6	0,5	20,1	127	21,8
15-07-1965					18,7	24	21,1
15-08-1965			19,8	1,2	18,1	29	20,8
15-09-1965			27,8	1,7	17,5	53	20,7
15-10-1965			12	0,7	21	110	22,1
15-11-1965			12	0,7	23	43	23,6
15-12-1965			10,4	0,6	25,6	62	25
15-01-1966			6,4	0,4	25,9	185	25,4
15-02-1966					24,7	77	24,2
15-03-1966			8,9	0,5	26,1	91	25,1
15-04-1966			6,5	0,4	25,8	266	24,7
15-05-1966			5,7	0,3	24,9	218	23,9
15-06-1966			5,6	0,3	19,1	61	21,9
15-07-1966			7,9	0,5	20,8	58	21,8
15-08-1966			7,7	0,5	21,1	99	22
15-09-1966			8,8	0,5	20,6	71	21,4
15-10-1966			10	0,6	21,7	80	22,9
15-11-1966			8,1	0,5	24,3	381	23,7
15-12-1966			8,8	0,5	22,9	103	24
15-01-1967			8,8	0,7	26,5	395	25,8
15-02-1967			10,5	0,8	27,8	314	26
15-03-1967			6,5	0,5	28	208	25,7
15-04-1967			6,6	0,4	27,3	373	24,9
15-05-1967			8,8	0,5	22,7	693	23
15-06-1967			9,8	0,6	23	99	23
15-07-1967			15,6	1	19,6	166	21,4

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire $^{\circ}\text{C}$
15-08-1967			22	0,3	18,8	61	21,6
15-09-1967			11,3	0,7	21,9	33	22,8
15-10-1967			15,3	0,9	19,7	137	22,2
15-11-1967			10,3	0,6	24,1	231	23,8
15-12-1967			32,6	2	23,4	311	23,7
15-01-1968			8,1	0,5	28,2	24	26,2
15-02-1968			7,3	0,5	28,2	319	26
15-03-1968			9,6	0,6	25,8	406	24,9
15-04-1968			6,5	0,4	25,5	106	24,7
15-05-1968			8,4	0,5	25	175	24
15-06-1968			7,3	0,5	19,9	39	22,3
15-07-1968			5,7	0,4	22,1	58	22,8
15-08-1968			11,6	0,7	20,6	291	21,6
15-09-1968			9,7	0,6	21,9	134	22,4
15-10-1968			9,4	0,6	21,6	50	23
15-11-1968			11	0,7	23	68	24
15-12-1968			7	0,4	26,2	61	26
15-01-1969			8,7	0,5	27,7	153	26
15-02-1969					26,6	42	27
15-03-1969					28,4	84	27
15-04-1969					25	358	25
15-05-1969			10,8	0,7	20,5	90	22
15-06-1969			11	0,8	10,1	72	22
15-07-1969			16,1	1	20,2	72	22
15-08-1969			16	1	19,6	178	21
15-09-1969			13,9	0,9	21,5	190	22
15-10-1969			17,2	1,1	21,7	67	23
15-11-1969			10,7	0,7	23,1	135	24
15-12-1969			10,3	0,6	26,6	453	25
15-01-1970			6,7	0,4	29,6	269	26
15-02-1970			7,5	0,5	28	157	26
15-03-1970			5,4	0,4	27,8	285	26
15-04-1970			6,3	0,5	27,3	265	24,5
15-05-1970			8,6	0,5	24,2	114	22,8
15-06-1970			9,8	0,6	22,3	18	22,6
15-07-1970			8,4	0,5	20,2	139	20,8
15-08-1970			19,1	1,2	21,1	475	21,7
15-09-1970			21,7	1,3	27,1	99	22,5
15-10-1970			12,9	0,8	24,8	132	23,6
15-11-1970			19,4	1,2	27,3	113	25,1
15-12-1970			15,9	1	26,9	463	25,2
15-01-1971			7,4	0,5	27,6	258	25,7
15-02-1971			3,4	0,2	27,4	454	25,7
15-03-1971			4,5	0,3	27,2	169	26,2

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire $^{\circ}\text{C}$
15-04-1971			4,7	0,3	27,1	100	26,3
15-05-1971			3,4	0,2	24,2	232	24,5
15-06-1971			4,6	0,3	21,2	250	23,3
15-07-1971			3,7	0,2	24,2	66	21,3
15-08-1971			3,6	0,2	20,7	1440	21,2
15-09-1971			4,8	0,3	21,8	69	23
15-10-1971			5	0,3	19,3	78	23,6
15-11-1971			4,7	0,3	23,3	38	24,2
15-12-1971			5,2	0,3	24,6	135	25,6
15-01-1972			5,2	0,3	28,4	220	26,2
15-02-1972					30,4	145	27,7
15-03-1972					27,1	226	25,3
15-04-1972					27,5	36	25,8
15-05-1972					25	269	24,4
15-06-1972					21,3	84	22,9
15-07-1972					18,8	28	21,7
15-08-1972					21,2	118	21,7
15-09-1972					20,8	84	21,6
15-10-1972					19,4	45	22,4
15-11-1972					21	75	23,1
15-12-1972					23,7	47	25,5
15-01-1973					28,3	465	25,2
15-02-1973					30,2	83	27,3
15-03-1973					31	319	27
15-04-1973					26,6	121	26,7
15-05-1973					24,7	111	24,4
15-06-1973					22,6	148	23,3
15-07-1973			4,7	0,3	21,5	435	22,7
15-08-1973			5,7	0,4	23,1	218	22,8
15-09-1973			4,3	0,3	23,1	669	24
15-10-1973			4,9	0,3	21,3	131	22,5
15-11-1973					25,9	100	25,3
15-12-1973					27,6	257	26,3
15-01-1974					21,3	206	26,9
15-02-1974					27,7	229	25,9
15-03-1974					27,9	322	25,9
15-04-1974					27,6	246	25,1
15-05-1974					25,4	201	24,1
15-06-1974					22,2	168	22,7
15-07-1974					25,2	31	25,1
15-08-1974					21,9	47	22,8
15-09-1974					20,8	34	22,8
15-10-1974					22,8	38	23,8
15-11-1974					24,8	121	24,6

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire $^{\circ}\text{C}$
15-12-1974					19,9	265	24,6
15-01-1975					26,8	248	25,1
15-02-1975					27,4	165	25,9
15-03-1975					28,9	229	25,6
15-04-1975					25,3	140	24,2
15-05-1975					21,7	59	23,2
15-06-1975					13,9	98	22,4
15-07-1975					21,8	37	22,8
15-08-1975					20,6	112	22,4
15-09-1975					23,2	109	23,3
15-10-1975					22,2	122	23,3
15-11-1975					25,8	253	24,7
15-12-1975					27,3	193	25,6
15-01-1976					26,9	243	25,4
15-02-1976					27,3	388	25,9
15-03-1976					26,4	184	24,8
15-04-1976					26,8	370	24,9
15-05-1976					24,5	151	24,2
15-06-1976					26,8	260	24,5
15-07-1976					20	43	20,5
15-08-1976					18,1	156	21,4
15-09-1976					19,8	74	22,2
15-10-1976					22,2	61	23,6
15-11-1976					25,7	254	24,7
15-12-1976					25,4	188	25
15-01-1977					28	165	25,7
15-02-1977					29,6	209	26,2
15-03-1977					33,5	307	27,7
15-04-1977					29,2	194	26,2
15-05-1977					24,7	212	23,8
15-06-1977					22,5	46	22,6
15-07-1977					20,8	92	19,7
15-08-1977					18,3	58	20,4
15-09-1977					21,3	268	21,1
15-10-1977					18,4	142	22,4
15-11-1977					21	39	23,5
15-12-1977					23,5	47	24,3
15-01-1978			3,4	0,2	31	260	26,8
15-02-1978			2	1,1	31,7	106	26,4
15-03-1978			2,8	0,3	29,5	228	26,2
15-04-1978			2,5	0,3	27,5	238	25,4
15-05-1978			2,8	0,3	26,6	149	24,4
15-06-1978			3,1	0,3	23,9	98	23,4
15-07-1978			3	0,3	20,3	95	21,7

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire $^{\circ}\text{C}$
15-08-1978			3,3	0,3	23	334	22,6
15-09-1978			3	0,2	22,9	216	22,7
15-10-1978			3	0,2	21,6	72	23
15-11-1978			2,7	0,3	24,6	319	24,1
15-12-1978			3,4	0,3	26,7	38	24,8
15-01-1979			3,9	0,3	26,9	84	25,6
15-02-1979			4,6	0,4	30,2	118	26,7
15-03-1979			3	0,3	28,6	303	26
15-04-1979	-4,2	-28,7	3	0,3	28,7	207	25,5
15-05-1979	-3,7	-19,2	2,4	0,3	27,2	33	25,4
15-06-1979	-2,6	-9,2	2,3	0,3	24,2	127	23,5
15-07-1979	-1,7	1,7	3	0,3	20,9	104	21,7
15-08-1979	-3,9	-20,1	2,7	0,3	21,7	141	21,8
15-09-1979	-4	-25,5	2,5	0,3	27,9	101	22,9
15-10-1979	-2,6	-5,7	3,6	0,3	29,5	53	23,8
15-11-1979	-1,3	0,6	3,1	0,3	28,5	98	23,2
15-12-1979	-5,2	-31,9	3,3	0,3	24,2	273	24
15-01-1980	-6,6	-41,9	2,9	0,3	29,7	590	26
15-02-1980	-4,8	-29	2,6	0,3	29,2	220	25,9
15-03-1980	-5,2	-30,6	3	0,3	30	348	26,3
15-04-1980	-3,5	-18,5	2,7	0,3	26,6	98	25,4
15-05-1980	-5	-31,1	4,3	0,3	23,9	261	23,4
15-06-1980	-2,7	-10,9	2,7	0,3	22	113	22
15-07-1980	-2,7	-9,1	2,4	0,2	21,4	155	22
15-08-1980	-3	-13,4	2,4	0,2	23	119	22,4
15-09-1980	-1,1	6,6	2,6	0,2	21,8	42	23,1
15-10-1980	-1,5	-2,8				64	
15-11-1980	-4,8	-28,6	4	0,3		130	
15-12-1980	-3,7	-16,6	3	0,3		540	
15-01-1981	-5,6	-38,3	2,8	0,3	26,9	214	26,6
15-02-1981			2,2	0,2	29,6	258	26,8
15-03-1981	-5,7	-39,4	2,3	0,2	27,3	71	26,3
15-04-1981	-4,8	-29	1,8	0,2	27,8	256	24,2
15-05-1981	-3,3	-12,6	2,1	0,3	21,3	79	22
15-06-1981	-2	-1,1	2,6	0,3	22,5	300	22,2
15-07-1981	-3,3	-15,4	2,7	0,3	20,5	216	20,9
15-08-1981	-1,9	-3,1	2,5	0,3	21	120	21,1
15-09-1981	-3,2	-15,1	1,9	0,2	23,7	213	22,1
15-10-1981	-1,9	-4,8	2,8	0,3	22,2	131	23,4
15-11-1981	-3,4	-16,3	3,1	0,3	25,9	151	25
15-12-1981	-4,9	-29,3	3	0,3	25,9	217	25
15-01-1982	-2,9	-11,9	4,1	0,3	29,5	70	26,7
15-02-1982	-5,1	-25	2,6	0,4	28,4	234	26,3
15-03-1982	-2,4	-5,3	2,9	0,4	31,4	72	26,8

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire $^{\circ}\text{C}$
15-04-1982	-3,2	-11,9	2,5	0,4		213	
15-05-1982	-1,8	0,4	2,7	0,1		151	
15-06-1982	-1,8	-1,2	2	0,2		65	
15-07-1982	-3,1	-12,7	2,4	0,1	22	107	22,1
15-08-1982	-2	-1,8	2,4	0,1	20,5	76	21,3
15-09-1982	-1,5	3,3	2,5	0,2	19,3	59	20,9
15-10-1982			2,3	0,2		23	
15-11-1982	-0,2	4,7	3,2	0,3		13	
15-12-1982	-1,6	-7,9	2,7	0,2		20	
15-01-1983	-3,1	-21,8	2,1	0,2		38	
15-02-1983	-9,9	-72,6	2	0,2		141	
15-03-1983	-0,5	4,2	2,3	0,2		23	
15-04-1983	-2,1	-6,6	2	0,2		83	
15-05-1983	-4,3	-26,2	1,9	0,2		100	
15-06-1983	-1,6	-1,1	2,4	0,2		43	
15-07-1983	-1,7	-1,3	2,3	0,2		89	
15-08-1983	-0,5	7	2,2	0,2		89	
15-09-1983	-2,4	-8,6	2	0,2		72	
15-10-1983	-3,1	-16,2	2,4	0,2		308	
15-11-1983	-1,1	-3,7	1,9	0,2		22	
15-12-1983	-7,6	-48,5	2,4	0,1		280	
15-01-1984	-7,1	-44,9	2	0,2	28	188	25,8
15-02-1984	-5,2	-28,3	2,8	0,2	30,3	326	26,7
15-03-1984	-7,3	-47,6	1,7	0,2	27,8	196	26,1
15-04-1984	-4,4	-22,4	2	0,2	27,8	237	25,7
15-05-1984			2	0,2		143	
15-06-1984			2	0,2		37	
15-07-1984			1,6	0,2		19	
15-08-1984			1,4	0,2		146	
15-09-1984			2,4	0,2		76	
15-10-1984			2,6	0,2		164	
15-11-1984			2,4	0,2		159	
15-12-1984			2,2	0,2		350	
15-01-1985			1,9	0,1		356	
15-02-1985			1,7	0,1		131	
15-03-1985			1,5	0,1		89	
15-04-1985			1,8	0,1		327	
15-05-1985			1,9	0,2		171	
15-06-1985			1,3	0,1		140	
15-07-1985			1,1	0,1		95	
15-08-1985	-2,3	-7,5	1,5	0,1	20,9	105	22,1
15-09-1985	-5,9	-34,3	2	0,1	19	123	21,3
15-10-1985	-1,9	-12,3	2,2	0,1	19,9	64	23,2
15-11-1985	-4	-24,6	1,7	0,1	24,8	144	24,3

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire $^{\circ}\text{C}$
15-12-1985	-5,3	-32,4	1,6	0,1	27,5	330	25,5
15-01-1986	-5,5	-35,6	1,4	0,1	28	270	26,3
15-02-1986	-6,9	-43,7	2	0,1	28,7	177	26,4
15-03-1986	-3,2	-20,2	1,7	0,1	28,9	62	26,4
15-04-1986			1,7	0,1	27	344	25,8
15-05-1986	-6,7	-48,7	1,3	0,1	22,6	219	23,6
15-06-1986	-5	-27,8	1,8	0,1	24,1	181	23,2
15-07-1986	-2,2	-8,9	1,6	0,1	22	124	22,5
15-08-1986	-2,3	-6,3	1,6	0,1	19,7	130	21,6
15-09-1986	-3,2	-10,3	1,7	0,2	21,9	239	22,8
15-10-1986	-7,7	-55,6	2	0,2	23,5	139	23,5
15-11-1986	-3,2	-16,1	1,4	0,1	23,2	265	24
15-12-1986	-3,8	-24			26,8	65	25,6
15-01-1987	-3,8	-20,8	1,8	0,1	27,5	355	25,9
15-02-1987	-10,3	-74,5	1,7	0,1	28,3	158	26,3
15-03-1987	-3,8	-21,5	1,7	0,1	27,2	92	25,7
15-04-1987			2,4	0,2	25,2	24	25,9
15-05-1987	-3,1	-21	1,8	0,1	22,9	213	23,3
15-06-1987	-5,4	-33,5	2,2	0,2	19,8	105	21,6
15-07-1987	-3,2	-16,3	1,6	0,1	17,8	34	20,5
15-08-1987	-1,6	1,9	1,7	0,1	18,2	94	20,7
15-09-1987	-1,2	-4,1	2,2	0,2	19,1	25	21,4
15-10-1987			1,7	0,1	19,4	70	22,1
15-11-1987	-3,1	-17,6	1,6	0,1	23,1	52	24,2
15-12-1987	0,8	11,8	1,7	0,1	24,5	25	25,6
15-01-1988	-5	-29,5	1,9	0,1		421	26,1
15-02-1988	-6,4	-45,2	1,8	0,1		224	27
15-03-1988	-2,5	-13,7	1,6	0,1		42	27,2
15-04-1988	-6,2	-41,1	1,5	0,1		364	25,9
15-05-1988	-1,9	-11,4	1,4	0,1		42	25,4
15-06-1988	-6,1	-37,7	1,8	0,1		279	23
15-07-1988	-3,3	-11,1	1,8	0,1		127	22,6
15-08-1988	-3,5	-18	1,7	0,1		93	22,4
15-09-1988	-0,7	1,6	1,6	0,1		135	23,7
15-10-1988	-3	-11,7	1,9	0,1		12	24,3
15-11-1988	-6,3	-38	1,7	0,1		316	24,6
15-12-1988	-5,4	-34,2	1,8	0,1		271	25,3
15-01-1989	-7	-48,6	1,9	0,1		221	25,8
15-02-1989	-1,2	-3,3	1,9	0,1		38	26,8
15-03-1989	-4,5	-27,3	1,8	0,1		810	26,7
15-04-1989	-4,9	-31,8	1,4	0,1		197	26,7
15-05-1989	-4,9	-28,4	1,8	0,1		187	24,6
15-06-1989	-3,4	-12,6	1,7	0,1		98	23,5
15-07-1989	-7,2	-47,1	1,6	0,1		123	22,5

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire °C
15-08-1989	-4,1	-20,1	1,7	0,1		160	22,7
15-09-1989	-2,5	-9,7				110	23,1
15-10-1989	-5	-36,1	1,8	0,1		106	24,1
15-11-1989	-8,4	-59,3	1,7	0,1		385	23,9
15-12-1989	-4,4	-37,3	1,5	0,1		81	24,2
15-01-1990	-4,1	-22,4	1,7	0,1		101	26,6
15-02-1990	-8,4	-57,2	1,4	0,1		392	26
15-03-1990	-2,6	-11,9	1,5	0,1		153	26,1
15-04-1990	-4,3	-22,5	1,2	0,1		193	24,9
15-05-1990	-2,4	-10,4	1,3	0,1		159	25,5
15-06-1990	-1,7	-5,2	1,5	0,1		61	24,2
15-07-1990	-3,6	-18,6	1,4	0,1		117	22,9
15-08-1990	-3,3	-11,6	1,4	0,1		21	22,8
15-09-1990	-2,4	-5,5	1,4	0,1		94	22,9
15-10-1990	-2,3	-8,9	1,5	0,1		88	23,9
15-11-1990	-6	-39,6	1,5	0,1		114	24,1
15-12-1990	-5,8	-37,8	1,5	0,1		101	25
15-01-1991	-6,8	-41,9	2,4	0,1		149	26,7
15-02-1991	-3,7	-21,7	2,4	0,1		402	27,1
15-03-1991	-6,8	-41,7	2,4	0,1		98	27,3
15-04-1991	-3,4	-16	1,6	0,1		183	26,4
15-05-1991	-5,1	-25,5	1,6	0,1		254	24,2
15-06-1991	-4,3	-24,3	1,6	0,1		103	23,1
15-07-1991	-3,4	-16,3	1,3	0,1		98	22,3
15-08-1991	-1,4	-0,7	1,3	0,1		75	22,5
15-09-1991	-3,5	-15	1,3	0,1		149	21,7
15-10-1991	-2,6	-10,4	1,6	0,1		57	23,1
15-11-1991	-2,6	-10,2	1,6	0,1		91	26,1
15-12-1991			1,6	0,1		132	25,3
15-01-1992			1,4	0,1		333	
15-02-1992			1,4	0,1		12	
15-03-1992			1,4	0,1		165	
15-04-1992			1,4	0,1		96	
15-05-1992			1,4	0,1		58	
15-06-1992			1,4	0,1		9	
15-07-1992			1,3	0,1		94	
15-08-1992			1,3	0,1		80	
15-09-1992			1,3	0,1		17	
15-10-1992			1,3	0,1		248	
15-11-1992			1,7	0,1		27	
15-12-1992			1,7	0,1		137	
15-01-1993			1,7	0,1		98	
15-02-1993			1,3	0,1		243	
15-03-1993			1,3	0,1		217	

Fecha muestra	Oxígeno 18 $\delta^{18}\text{O}$ SMOW	Deuterio δD SMOW	Tritio T.U.	^3H error T.U.	Presión de vapor mb	Precipitación mm	Temperatura del aire $^{\circ}\text{C}$
15-04-1993			1,3	0,1		369	
15-05-1993			1,4	0,1		34	
15-06-1993			1,4	0,1		20	
15-07-1993			1,4	0,1		215	
15-08-1993			1,3	0,1		88	
15-09-1993			1,3	0,1		225	
15-10-1993			1,3	0,1		62	
15-11-1993			1,4	0,1		71	
15-12-1993			1,4	0,1		149	
15-01-1994			1,5	0,1	21,3	435	26
15-02-1994			1,5	0,1	31	250	27,2
15-03-1994			1,5	0,1		158	
15-04-1994			1,5	0,1	25,7	192	25
15-05-1994			1,5	0,1	23,3	164	23,8
15-06-1994			1,5	0,1		68	
15-07-1994			1,7	0,1	21,2	248	22,2
15-08-1994			1,7	0,1		77	21,3
15-09-1994			1,7	0,1	19,7	126	21,2
15-10-1994			1,3	0,1	20,3	55	22,7
15-11-1994			1,3	0,1	22	35	23,8
15-12-1994			1,3	0,1	26	173	24,9

ANEXO 4

Funciones de entrada código MULTIS

a) Función de entrada sin ponderar

Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)
1	1953	3	9	1956	4,08	5	1960	5,08
2	1953	3,02	10	1956	4,11	6	1960	5,17
3	1953	3,05	11	1956	4,13	7	1960	5,27
4	1953	3,07	12	1956	4,15	8	1960	5,36
5	1953	3,1	1	1957	4,18	9	1960	5,46
6	1953	3,12	2	1957	4,2	10	1960	5,55
7	1953	3,15	3	1957	4,23	11	1960	5,64
8	1953	3,17	4	1957	4,25	12	1960	5,74
9	1953	3,2	5	1957	4,28	1	1961	5,83
10	1953	3,22	6	1957	4,3	2	1961	5,93
11	1953	3,25	7	1957	4,33	3	1961	6,02
12	1953	3,27	8	1957	4,35	4	1961	6,12
1	1954	3,29	9	1957	4,38	5	1961	6,21
2	1954	3,32	10	1957	4,4	6	1961	6,31
3	1954	3,34	11	1957	3,63	7	1961	6,4
4	1954	3,37	12	1957	2,87	8	1961	6,49
5	1954	3,39	1	1958	2,1	9	1961	6,59
6	1954	3,42	2	1958	2,4	10	1961	6,68
7	1954	3,44	3	1958	2,7	11	1961	6,78
8	1954	3,47	4	1958	3	12	1961	6,87
9	1954	3,49	5	1958	3	1	1962	6,97
10	1954	3,52	6	1958	3	2	1962	7,06
11	1954	3,54	7	1958	3	3	1962	7,16
12	1954	3,56	8	1958	3,09	4	1962	7,25
1	1955	3,59	9	1958	3,19	5	1962	7,34
2	1955	3,61	10	1958	3,28	6	1962	7,44
3	1955	3,64	11	1958	3,38	7	1962	7,53
4	1955	3,66	12	1958	3,47	8	1962	7,63
5	1955	3,69	1	1959	3,57	9	1962	7,72
6	1955	3,71	2	1959	3,66	10	1962	7,82
7	1955	3,74	3	1959	3,76	11	1962	7,91
8	1955	3,76	4	1959	3,85	12	1962	8,01
9	1955	3,79	5	1959	3,94	1	1963	8,1
10	1955	3,81	6	1959	4,04	2	1963	7,1
11	1955	3,84	7	1959	4,13	3	1963	6,2
12	1955	3,86	8	1959	4,23	4	1963	10,6
1	1956	3,88	9	1959	4,32	5	1963	11,75
2	1956	3,91	10	1959	4,42	6	1963	12,9
3	1956	3,93	11	1959	4,51	7	1963	35,6
4	1956	3,96	12	1959	4,61	8	1963	20,9
5	1956	3,98	1	1960	4,7	9	1963	8,2
6	1956	4,01	2	1960	4,79	10	1963	16,2
7	1956	4,03	3	1960	4,89	11	1963	11,6
8	1956	4,06	4	1960	4,98	12	1963	9,3

Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)
1	1964	10	2	1968	42,7	3	1972	5,6
2	1964	8,2	3	1968	9,6	4	1972	5,9
3	1964	17,2	4	1968	7,9	5	1972	5,2
4	1964	16,3	5	1968	7,6	6	1972	6
5	1964	20,4	6	1968	8,1	7	1972	6,9
6	1964	7,8	7	1968	6,9	8	1972	1,4
7	1964	17,9	8	1968	11,6	9	1972	2,9
8	1964	13,7	9	1968	10,2	10	1972	7,1
9	1964	145	10	1968	9,4	11	1972	6
10	1964	27,1	11	1968	7,4	12	1972	7,5
11	1964	11,6	12	1968	4,1	1	1973	7,47
12	1964	13,15	1	1969	11,9	2	1973	7,43
1	1965	14,7	2	1969	14,4	3	1973	7,4
2	1965	27,1	3	1969	7,6	4	1973	6,8
3	1965	11,6	4	1969	8,6	5	1973	6,2
4	1965	9,9	5	1969	10	6	1973	5,6
5	1965	12,6	6	1969	4,4	7	1973	3,5
6	1965	9,4	7	1969	6,7	8	1973	8,2
7	1965	11,8	8	1969	16	9	1973	7
8	1965	7,1	9	1969	12,5	10	1973	7,3
9	1965	17,5	10	1969	12,3	11	1973	7,22
10	1965	15,7	11	1969	10,7	12	1973	7,13
11	1965	15	12	1969	7,2	1	1974	7,05
12	1965	10,7	1	1970	12,2	2	1974	6,96
1	1966	6,4	2	1970	7,5	3	1974	6,88
2	1966	7,65	3	1970	10,4	4	1974	6,79
3	1966	8,9	4	1970	11	5	1974	6,71
4	1966	6,5	5	1970	8,6	6	1974	6,62
5	1966	5,7	6	1970	28,4	7	1974	6,54
6	1966	96,4	7	1970	4,4	8	1974	6,45
7	1966	118,8	8	1970	19,1	9	1974	6,36
8	1966	7,7	9	1970	15	10	1974	6,28
9	1966	8,8	10	1970	13,1	11	1974	6,19
10	1966	10	11	1970	10,6	12	1974	6,11
11	1966	8,1	12	1970	10	1	1975	6,03
12	1966	8,8	1	1971	7,4	2	1975	5,94
1	1967	8,8	2	1971	7,7	3	1975	5,86
2	1967	10,5	3	1971	4,5	4	1975	5,77
3	1967	6,5	4	1971	5,4	5	1975	5,69
4	1967	6,6	5	1971	6,4	6	1975	5,6
5	1967	8,8	6	1971	5	7	1975	5,6
6	1967	9,8	7	1971	5,3	8	1975	5,6
7	1967	15,6	8	1971	8,7	9	1975	5,6
8	1967	22	9	1971	8,1	10	1975	5,8
9	1967	14,6	10	1971	8,1	11	1975	4,8
10	1967	15,3	11	1971	9,8	12	1975	4,75
11	1967	14,6	12	1971	8,7	1	1976	4,69
12	1967	13,3	1	1972	6,3	2	1976	4,64
1	1968	12,9	2	1972	5,95	3	1976	4,58

Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)
4	1976	4,53	5	1980	4,3	6	1984	2
5	1976	4,48	6	1980	2,7	7	1984	1,6
6	1976	4,42	7	1980	2,4	8	1984	1,4
7	1976	4,37	8	1980	2,4	9	1984	2,4
8	1976	4,32	9	1980	2,6	10	1984	2,6
9	1976	4,26	10	1980	3,3	11	1984	2,4
10	1976	4,21	11	1980	4	12	1984	2,2
11	1976	4,15	12	1980	3	1	1985	1,9
12	1976	4,1	1	1981	2,8	2	1985	1,7
1	1977	4,05	2	1981	2,2	3	1985	1,5
2	1977	3,99	3	1981	2,3	4	1985	1,8
3	1977	3,94	4	1981	1,8	5	1985	1,9
4	1977	3,88	5	1981	2,1	6	1985	1,3
5	1977	3,83	6	1981	2,6	7	1985	1,1
6	1977	3,78	7	1981	2,7	8	1985	1,5
7	1977	3,72	8	1981	2,5	9	1985	2
8	1977	3,67	9	1981	1,9	10	1985	2,2
9	1977	3,62	10	1981	2,8	11	1985	1,7
10	1977	3,56	11	1981	3,1	12	1985	1,6
11	1977	3,51	12	1981	3	1	1986	1,4
12	1977	3,45	1	1982	4,1	2	1986	2
1	1978	3,4	2	1982	2,6	3	1986	1,7
2	1978	2	3	1982	2,9	4	1986	1,7
3	1978	2,8	4	1982	2,5	5	1986	1,3
4	1978	2,5	5	1982	2,7	6	1986	1,8
5	1978	2,8	6	1982	2	7	1986	1,6
6	1978	3,1	7	1982	2,4	8	1986	1,6
7	1978	3	8	1982	2,4	9	1986	1,7
8	1978	3,3	9	1982	2,5	10	1986	2
9	1978	3	10	1982	2,3	11	1986	1,4
10	1978	3	11	1982	3,2	12	1986	1,6
11	1978	2,7	12	1982	2,7	1	1987	1,8
12	1978	3,4	1	1983	2,1	2	1987	1,7
1	1979	3,9	2	1983	2	3	1987	1,7
2	1979	4,6	3	1983	2,3	4	1987	2,4
3	1979	3	4	1983	2	5	1987	1,8
4	1979	3	5	1983	1,9	6	1987	2,2
5	1979	2,4	6	1983	2,4	7	1987	1,6
6	1979	2,3	7	1983	2,3	8	1987	1,7
7	1979	3	8	1983	2,2	9	1987	2,2
8	1979	2,7	9	1983	2	10	1987	1,7
9	1979	2,5	10	1983	2,4	11	1987	1,6
10	1979	3,6	11	1983	1,9	12	1987	1,7
11	1979	3,1	12	1983	2,4	1	1988	1,9
12	1979	3,3	1	1984	2	2	1988	1,8
1	1980	2,9	2	1984	2,8	3	1988	1,6
2	1980	2,6	3	1984	1,7	4	1988	1,5
3	1980	3	4	1984	2	5	1988	1,4
4	1980	2,7	5	1984	2	6	1988	1,8

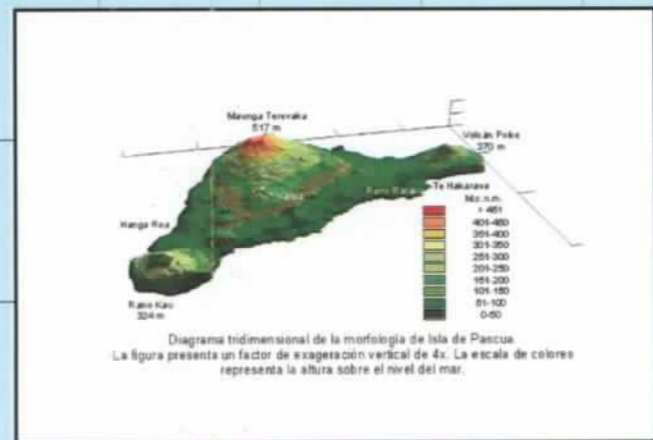
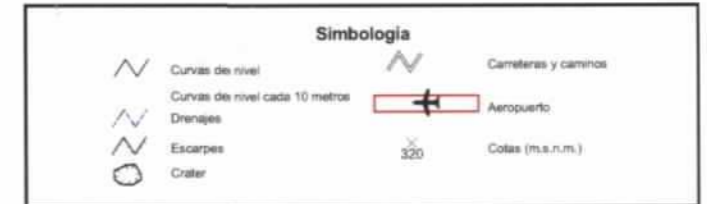
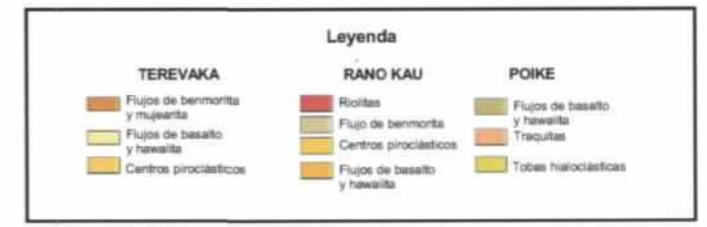
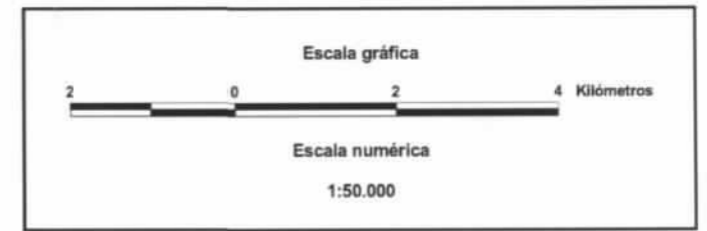
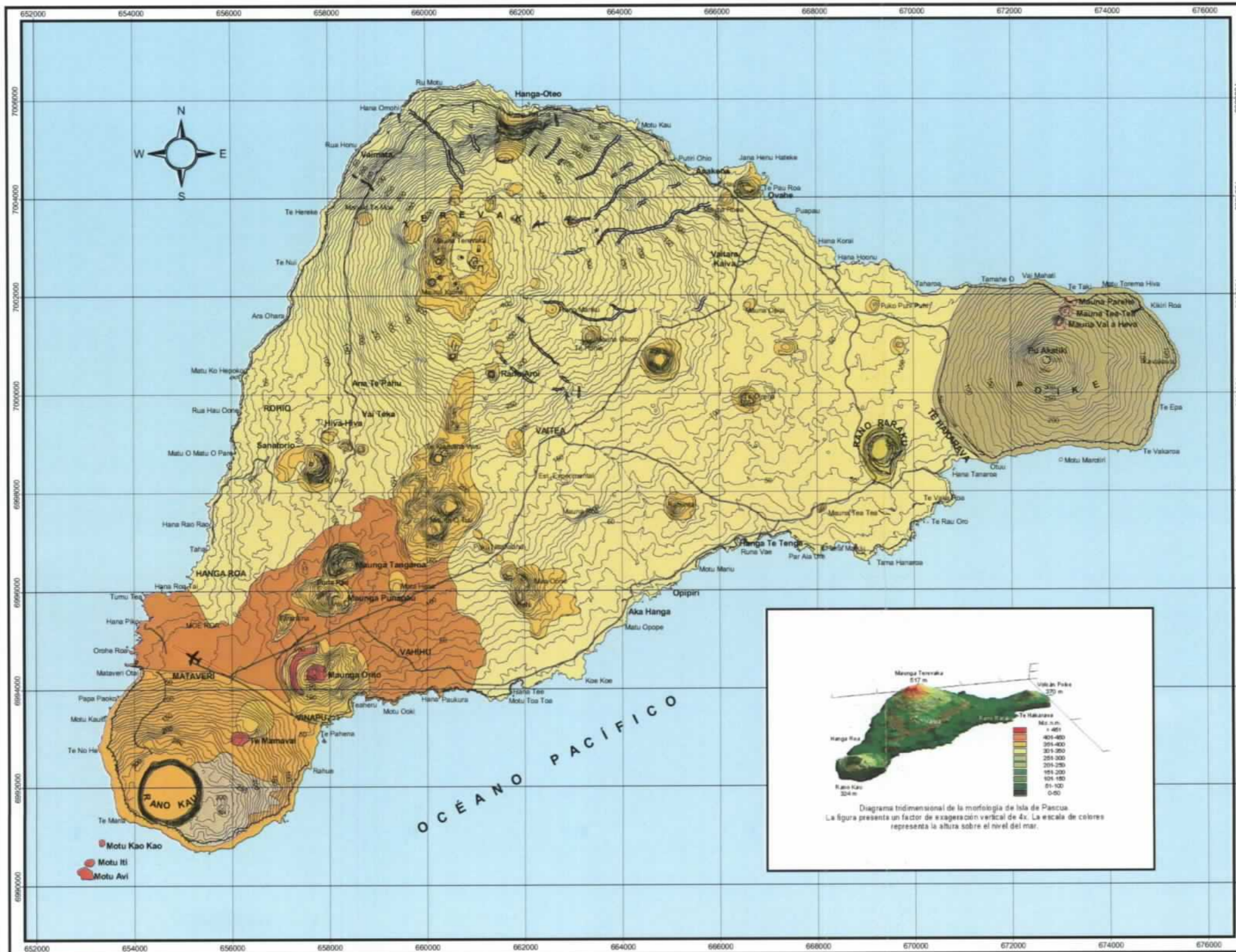
Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)
7	1988	1,8	8	1992	1,5	9	1996	1,5
8	1988	1,7	9	1992	1,5	10	1996	1,3
9	1988	1,6	10	1992	2,3	11	1996	1,5
10	1988	1,9	11	1992	1,1	12	1996	1,3
11	1988	1,7	12	1992	1,6	1	1997	2,8
12	1988	1,8	1	1993	1,6	2	1997	2,5
1	1989	1,9	2	1993	2,1	3	1997	1,2
2	1989	1,9	3	1993	2	4	1997	1,4
3	1989	1,8	4	1993	1,8	5	1997	1,5
4	1989	1,4	5	1993	1,3	6	1997	1,4
5	1989	1,8	6	1993	1,6	7	1997	2,2
6	1989	1,7	7	1993	2,1	8	1997	2,7
7	1989	1,6	8	1993	1,5	9	1997	1,6
8	1989	1,7	9	1993	1,9	10	1997	1,2
9	1989	1,75	10	1993	1,7	11	1997	1,3
10	1989	1,8	11	1993	2	12	1997	3,35
11	1989	1,7	12	1993	1,9	1	1998	5,4
12	1989	1,5	1	1994	2,1	2	1998	4,1
1	1990	1,7	2	1994	2,05	3	1998	5,4
2	1990	1,4	3	1994	2	4	1998	3,2
3	1990	1,5	4	1994	2,7	5	1998	3,5
4	1990	1,2	5	1994	1,8	6	1998	3,9
5	1990	1,3	6	1994	2,4	7	1998	3,4
6	1990	1,5	7	1994	2,9	8	1998	3,7
7	1990	1,4	8	1994	2,5	9	1998	3,7
8	1990	1,4	9	1994	3,3	10	1998	3,1
9	1990	1,4	10	1994	3,3	11	1998	2,9
10	1990	1,1	11	1994	2,4	12	1998	2,3
11	1990	1,1	12	1994	1,7	1	1999	2,6
12	1990	1,1	1	1995	1,4	2	1999	2
1	1991	13,4	2	1995	1,4	3	1999	2,3
2	1991	13,4	3	1995	1,8	4	1999	2
3	1991	13,4	4	1995	0,8	5	1999	2,1
4	1991	2,1	5	1995	1,4	6	1999	1,83
5	1991	2,1	6	1995	1,1	7	1999	1,57
6	1991	2,1	7	1995	1,5	8	1999	1,3
7	1991	2	8	1995	2,5	9	1999	1,6
8	1991	2	9	1995	1,7	10	1999	2,1
9	1991	2	10	1995	1,4	11	1999	0,6
10	1991	1	11	1995	1,7	12	1999	1,6
11	1991	1	12	1995	1,8	1	2000	2,2
12	1991	1	1	1996	23,6	2	2000	1,6
1	1992	2,3	2	1996	1,9	3	2000	1,7
2	1992	2,1	3	1996	1,7	4	2000	2,2
3	1992	1,7	4	1996	1	5	2000	1,4
4	1992	1,2	5	1996	1,6	6	2000	1,1
5	1992	1,1	6	1996	1,6	7	2000	1,1
6	1992	1,3	7	1996	24,4	8	2000	1,5
7	1992	1,5	8	1996	1,4	9	2000	1

Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)	Mes	Año	Tritio (T.U.)
10	2000	1	9	2001	1,1	8	2002	0,8
11	2000	1,1	10	2001	1,1	9	2002	0,8
12	2000	1,2	11	2001	1,1	10	2002	0,8
1	2001	1,2	12	2001	1,1	11	2002	0,8
2	2001	1,2	1	2002	0,9	12	2002	0,8
3	2001	1,2	2	2002	0,9			
4	2001	1,2	3	2002	0,9			
5	2001	1,2	4	2002	0,9			
6	2001	1,2	5	2002	0,9			
7	2001	1,1	6	2002	0,9			
8	2001	1,1	7	2002	0,8			

b) Función de entrada ponderada según la precipitación.

Año	Tritio (T.U.)	Año	Tritio (T.U.)	Año	Tritio (T.U.)	
1953	3,13	1971	7,18	1989	1,68	
1954	3,42	1972	5,73	1990	1,39	
1955	3,72	1973	6,84	1991	3,49	
1956	4,01	1974	6,61	1992	1,56	
1957	4,11	1975	5,56	1993	1,84	
1958	2,96	1976	4,41	1994	2,52	
1959	4,07	1977	3,76	1995	1,43	
1960	5,2	1978	2,91	1996	5,28	
1961	6,34	1979	3,07	1997	1,82	
1962	7,47	1980	3,02	1998	3,73	
1963	12,96	1981	2,45	1999	1,78	
1964	19,79	1982	2,69	2000	1,44	
1965	13,16	1983	2,15	2001	1,16	
1966	17,23	1984	2,08	2002	0,86	
1967	11,47	1985	1,68			
1968	12,26	1986	1,63			
1969	9,84	1987	1,86			
1970	13,05	1988	1,69			

Mapa geológico escala 1:50.000 de Isla de Pascua (Rapa Nui)
(27°09'30" latitud sur; 109°26'14" longitud oeste)



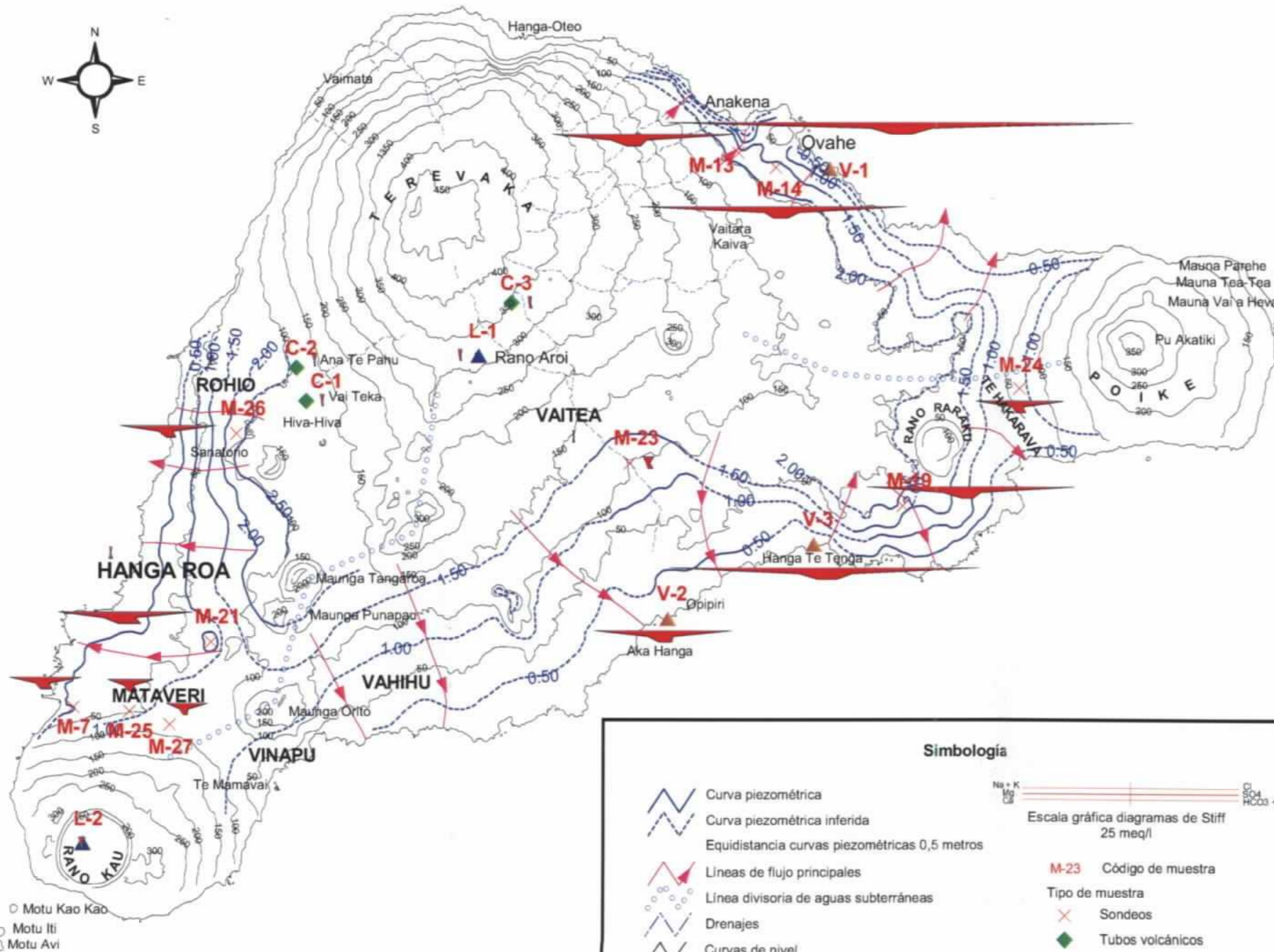
UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS GEOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

MAPA GEOLÓGICO DE ISLA DE PASCUA (RAPA NUI)
ESCALA 1 : 50.000
(Modificado de Baker y otros, 1974)

Profesor Guía: Dr. Christian Herrera Lameli
Memorista: Manuel Pincheira Argandoña

Antofagasta, diciembre de 2003

SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA (1 : 75.000), DIAGRAMAS DE STIFF Y CONTENIDO DE OXIGENO 18, DEUTERIO Y TRITIO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE ISLA DE PASCUA (RAPA NUI)



Simbología

- Curva piezométrica
- Curva piezométrica inferida
- Equidistancia curvas piezométricas 0,5 metros
- Líneas de flujo principales
- Línea divisoria de aguas subterráneas
- Drenajes
- Curvas de nivel
- Curvas de nivel cada 50 metros
- Sector del vertedero

Diagramas de Stiff

$\frac{Na + K}{Ca} = \frac{CO_3}{HCO_3 + CO_2}$

Escala gráfica diagramas de Stiff
25 meq/l

Muestra

- M-23 Código de muestra
- Tipo de muestra: Tubos volcánicos
- Lagunas
- Pozos

Contenidos de isótopos ambientales de las aguas subterráneas de Isla de Pacua (Rapa Nui)

Muestra	δD (‰) SMOW	$\delta^{18}O$ (‰) SMOW	d (δ - 8.8 ‰)	Tritio (T.U.)	Error (T.U.)	Cota m.s.n.m.
M-7	-22,30	-2,95	1,30	0,69	±0,35	30,7
M-13	-11,50	-2,77	10,66	0,86	±0,32	21,3
M-19	-13,80	-2,81	8,68	1,09	±0,37	33,18
M-21	-21,50	-2,93	1,94	0,70	±0,34	61
M-24	-17,70	-2,75	4,30	1,07	±0,36	42,57
M-25	-18,40	-3,16	6,88	1,07	±0,32	95,95
M-26	-19,00	-2,85	3,80	0,72	±0,34	43,09
M-27	-18,80	-3,00	5,20	0,77	±0,34	64,55
M-27	-17,00	-2,97	6,76	0,61	±0,33	65
V-1	-18,30	-3,00	5,70	-	-	2
V-3	-16,70	-2,98	7,14	1,00	±0,35	2
C-1	-8,80	-2,31	9,68	1,24	±0,36	115
C-2	-8,50	-1,92	6,86	1,77	±0,39	110
C-3	-18,90	-3,45	8,70	1,21	±0,37	350
L-1	-14,30	-2,79	8,02	-	-	300
L-2	-2,00	0,85	-8,80	0,95	±0,35	120

Concentraciones de $\delta^{18}O$, δD y tritio en las aguas subterráneas de Isla de Pascua. d = exceso de deuterio

Escala numérica

1 : 75.000

Escala gráfica



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS GEOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS GEOLÓGICAS**

SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA (1 : 75.000), DIAGRAMAS DE STIFF Y CONTENIDO DE OXIGENO 18, DEUTERIO Y TRITIO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE ISLA DE PASCUA (RAPA NUI)

Profesor Guía: Dr. Christian Herrera Lameli
Memorista: Manuel Pincheira Argandoña

Antofagasta, diciembre de 2003