

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> DISUELTO EN FUENTES NATURALES DE AGUA.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y CONTROL

**JORGE ARTURO CÓRDOVA BRAVO**

[jcordova@igepn.edu.ec](mailto:jcordova@igepn.edu.ec)

**DIRECTOR: SILVANA IVONNE HIDALGO TRUJILLO, PhD.**

[shidalgo@igepn.edu.ec](mailto:shidalgo@igepn.edu.ec)

**CO-DIRECTOR: GEOVANNY DANILO CHÁVEZ GARCÍA, PhD.**

[daniilo.chavez@epn.edu.ec](mailto:daniilo.chavez@epn.edu.ec)

Quito, Marzo 2017

## DECLARACIÓN

Yo, Jorge Arturo Córdova Bravo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Jorge Arturo Córdova Bravo

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Arturo Córdova Bravo, bajo nuestra supervisión.

---

Dr. Silvana Hidalgo Trujillo  
DIRECTOR DEL  
PROYECTO

---

Dr. Danilo Chávez García  
CO-DIRECTOR DEL  
PROYECTO

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis más grandes agradecimientos a Dios, por haberme permitido existir y vivir todo lo que ha sido mi vida.

A mis padres, porque a pesar de que el camino fue difícil y estuve a punto de renunciar ellos estuvieron ahí para apoyarme.

A mis hermanos por haber puesto su esperanza en mí, estoy seguro de no haberlos defraudado.

A mis amigos entrañables que también fueron mis compañeros de aulas, con los cuales compartimos momentos buenos y alegres así como también los difíciles; gracias por todo su apoyo y aliento gracias Klever, Eddy, Jaque, Diego, Julio, Patty y Bachy.

A mis tíos que no muy pocas veces estuvieron ahí para darme su apoyo y consejo; en especial a mis tíos Fausto y David y a mis tías Teresa, Rosa, Mariana.

A la Dra. Silvana Hidalgo Trujillo por proponerme este camino y guiarme a través de él y sobre todo por su paciencia.

A todas aquellas personas, que a lo largo del camino y en su transitar tuve la dicha de conocerlos y que enriquecieron mi vida con algo suyo.

Jorge Arturo Córdova Bravo

## DEDICATORIA

A Dios para su gloria.

A mi mamita Alejandrina que con su esfuerzo y sacrificio día tras día, supo encaminarme para convertirme en el hombre que soy ahora, por haber renunciado a sus sueños para que los míos se hagan realidad.

A mi papá Arturo, porque su sangre corre por mis venas y eso hizo que mi pasión sean las carreras técnicas y la aventura.

A mis hermanos, por ser mi apoyo en este camino incierto que es la vida.

A mis sobrinos, Carlita, Mateo, María José y Domenica, espero que esto sea un motivo de inspiración para que hagan de su vida algo grande y maravillosa.

A Rebecca por haber llegado y ser el impulso final para concluir con este trabajo.

A mis abuelitos Carmen y Noe, que aún tengo la dicha de tenerlos y a mi abuelita Cenelia que desde el cielo nos cuida.

Jorge Arturo Córdova Bravo

## CONTENIDO

Índice de tablas .....	x
Resumen .....	xiii
Presentación .....	xv
<b>CAPÍTULO 1 Marco teórico .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 La geoquímica en la vigilancia volcánica .....	2
1.1.1 Geoquímica .....	2
1.2.1 Compuestos químicos de la actividad volcánica .....	2
1.3 Métodos y técnicas de medición de la concentración de CO <sub>2</sub> .....	4
1.3.1 Métodos indirectos .....	4
1.3.2 Métodos directos .....	5
1.4 Principio teórico .....	9
1.4.1 Solubilidad de gases en el agua .....	9
1.4.2 Solubilidad del CO <sub>2</sub> en el agua .....	15
1.4.3 Problemas técnicos de la medición del <i>pH</i> .....	16
1.5 Requisitos del sistema automático de medición de la concentración de CO <sub>2</sub> ..	18
1.5.1 Esquema general .....	18
1.5.2 Subsistema abierto .....	18
1.5.3 Subsistema cerrado .....	19
1.5.4 Circuito electrónico .....	19
1.5.5 Elementos del sistema automático .....	20
<b>CAPÍTULO 2 Diseño e implementación del hardware .....</b>	<b>21</b>
2.1 Introducción y esquema del hardware .....	21
2.1.1 Cámara de equilibrio .....	21
2.1.2 Sensor de CO <sub>2</sub> .....	25

2.1.3	Sensor de temperatura.....	30
2.1.4	Bomba para la circulación del agua.....	31
2.1.5	Bomba para la succión de gas .....	34
2.1.6	Electro válvula .....	35
2.2	Diagrama de bloques del circuito electrónico de control del sistema automático para la medición de la concentración de CO <sub>2</sub> .....	37
2.2.1	Fuente de alimentación y etapa de regulación .....	38
2.3	Microcontrolador PIC18F4550 .....	43
2.4	Etapa de acondicionamiento de señales .....	44
2.4.1	Sensores de temperatura RTD.....	44
2.4.2	Espectrómetro infrarrojo .....	52
2.4.3	Receptor GPS .....	53
2.5	Etapa de presentación, transmisión y almacenamiento de datos .....	58
2.5.1	Presentación local de datos en la pantalla LCD .....	58
2.5.2	Circuito para la operación de la memoria SD .....	59
2.5.3	Puente convertidor serial a ethernet.....	61
2.6	Etapa de opto-acoplamiento y potencia.....	65
2.6.1	Opto-acoplamiento .....	65
2.6.2	Circuito de potencia.....	67
2.7	Circuito impreso .....	71
2.8	Transmisión de datos por radio modem.....	72
2.8.1	Radio modem digital.....	72
1.1.1	Antena Yagi.....	73
1.1.2	Supresor de descargas atmosféricas .....	74
2.9	Ensamblaje y construcción del sistema automático .....	75
2.9.1	Circuito de control.....	75
2.9.2	Montaje de los elementos en la caja contenedora.....	75

CAPÍTULO 3	Desarrollo del software .....	78
3.1	Introducción .....	78
3.2	Firmware del microcontrolador.....	78
3.2.1	Configuración general del microcontrolador .....	78
3.2.2	Recepción de datos desde el modulo GPS .....	80
3.2.3	Conversión analógica-digital .....	86
3.2.4	Inicialización, escritura y lectura de la memoria SD .....	88
3.2.5	Envío de datos por el puerto ethernet .....	93
3.2.6	Modos de operación del sistema automático .....	95
3.3	Configuración del convertidor de protocolo serial a ethernet.....	99
3.3.1	Instalación del utilitario ICHIPCONFIG.....	99
3.3.2	Configuración del convertidor serial a ethernet mediante el utilitario ICHIPCONFIG a través del puerto serial.....	100
3.3.3	Configuración del convertidor serial a ethernet a través de un navegador web.....	102
3.4	Desarrollo de la interfáz gráfica .....	105
3.4.1	Pantalla de inicio .....	105
3.4.2	Modo de operación manual.....	105
3.4.3	Modo de operación automático .....	107
3.4.4	Ventana informativa.....	108
CAPÍTULO 4	Pruebas y resultados .....	109
4.1	Introducción .....	109
4.2	Verificación de la inicialización, lectura y escritura de datos en la memoria sd .....	109
4.2.1	Inicialización .....	109
4.2.2	Lectura y escritura de datos .....	110
4.3	Calibración del sensor de CO <sub>2</sub> .....	112



4.3.1	Introducción .....	112
4.3.2	Comprobación y calibración del cero del instrumento .....	112
4.3.3	Comprobación y calibración del valor máximo del ..... rango del instrumento .....	117
4.3.4	Comprobación de la respuesta del instrumento ..... a escalas intermedias .....	119
4.4	Prueba de los sensores de temperatura .....	127
4.5	Prueba de transmisión de datos mediante el radio enlace .....	131
4.6	Pruebas de campo del sistema automático .....	133
4.6.1	Pruebas en la fuente termal santa ana.....	134
4.6.2	Pruebas de funcionamiento en la fuente termal Palmira .....	135
CAPÍTULO 5	Conclusiones y recomendaciones.....	138
5.1	Conclusiones .....	138
5.2	Recomendaciones .....	140
	Referencias Bibliográficas.....	142
	Anexos .....	A

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Productos de una erupción volcánica [3], [7]- [9].....	2
Tabla 1.2. Valores de la constante de Henry para algunos gases disueltos en agua a 25°C [14], [15]. .....	10
Tabla 2.1. Composición química de los gases disueltos. Los valores están expresados en cm <sup>3</sup> por litro STP [23].....	28
Tabla 2.2. Rangos de medición más comunes para los sensores IR de CO2 comerciales [21], [22]. .....	29
Tabla 2.3. Especificaciones del espectrómetro infrarrojo GASCARD NG [24]. ....	30
Tabla 2.4. Comparación de las características técnicas entre un sensor RTD y un termopar [25], [26]. .....	31
Tabla 2.5. Características técnicas de la bomba peristáltica THOMAS SR25 [29]. .....	33
Tabla 2.6. Características técnicas de la micro-bomba de diafragma para muestreo de gases NPM015M [30].....	34
Tabla 2.7. Características técnicas de la electroválvula K000-303-K22 [31].....	36
Tabla 2.8. Principales componentes del sistema con sus respectivos voltajes y corrientes de operación [21], [29]-[31], [37]-[40], [32]-[36].....	38
Tabla 2.9. Características eléctricas del regulador de voltaje LM317 [42]. .....	39
Tabla 2.10. Características eléctricas del regulador de voltaje LM1117-3.3 [43].	42
Tabla 2.11. Características micro-controlador PIC18F4550 [32].....	43
Tabla 2.12. Distribución de pines GPS 18x LVC Garmin [36]. .....	53
Tabla 2.13. Máximos rangos de operación y características eléctricas dinámicas de la compuerta lógica NAND HCF40107B [38].....	55
Tabla 2.14. Tabla de verdad para la compuerta NAND HCF40101BE con Drain abierto [38]. .....	57
Tabla 2.15. Nueva tabla de verdad para el circuito de acoplamiento del GPS al puerto serial del micro-controlador. ....	57
Tabla 2.16. Distribución de pines pantalla LCD J204A [33]. .....	58
Tabla 2.17. Distribución y descripción de los pines de la memoria SD [35], [45].	59
Tabla 2.18. Características técnicas del conversor serial-ethernet Nano LanReach [34]. .....	62

Tabla 2.19. Descripción de pines del puerto UART (conector J8) [34].	62
Tabla 2.20. Descripción de pines del puerto SPI (conector J9) [34].	63
Tabla 2.21. Rangos de Operación del Opto-acoplador PC817 [40].	66
Tabla 2.22. Especificaciones del MOSFET IRFZ44N [48].	68
Tabla 2.23. Condiciones de operación recomendadas para el integrado L293D [49]. .....	70
Tabla 2.24. Tabla de verdad del circuito integrado L293D [49].	70
Tabla 2.25. Características Radio modem Freewave FGR2-PE [50].	72
Tabla 2.26. Características de la antena YAGI fabricada en el IG-EPN.	74
Tabla 3.1. Sentencias que entrega el GPS GARMIN 18X LVC, [36], [52].	80
Tabla 3.2. Formato del comando para la tarjeta SD en protocolo SPI [45].	89
Tabla 3.3. Comandos del protocolo SPI para el manejo de una memoria SD [45]. .....	90
Tabla 4.1. Características técnicas del multímetro FLUK 179 TRUE RMS [61].	128



## RESUMEN

En el presente proyecto, se presenta un sistema para la medición automática de la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en fuentes naturales de agua, con el objetivo de mejorar la red de vigilancia ante peligros volcánicos. Para ello, se ha implementado un instrumento que está constituido por un sub-sistema abierto para la circulación de la muestra de agua donde se necesita determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto, un sub-sistema cerrado en donde se tomará el gas que escapa del agua y se mezclará con aire, para luego mediante un espectrómetro infrarrojo determinar la concentración de CO<sub>2</sub>.

El sistema dispone de un circuito de control que permite digitalizar y almacenar las señales obtenidas. El circuito de control también contará con un puerto Ethernet para enviar los datos hacia la sala de monitoreo del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), para ello se ha desarrollado una interfaz gráfica mediante la cual se puede controlar el modo de operación del sistema y visualizar la información del mismo.

En primer lugar, se realiza una descripción de los beneficios que se presentan, al disponer de un sistema como el que se desarrolla en este proyecto, así como de los principios que controlan la disolución de los gases en agua y los requisitos que debe cumplir el sistema.

A continuación se implementa el hardware que permitirá controlar todos los elementos del sistema, así como almacenar y transmitir la información.

Luego de que el Hardware del sistema ha sido implementado, se elabora una interfaz gráfica basada en el software de programación gráfica LabVIEW. Mediante esta interfaz gráfica el usuario podrá controlar y operar el sistema según sus requerimientos.

Una vez que se han integrado todos los elementos desarrollados e implementados, se realiza las calibraciones en el laboratorio y las pruebas de campo para validar el funcionamiento del sistema.

Y para concluir, se expresan las conclusiones a las que se ha llegado durante la realización de este proyecto y las recomendaciones necesarias que se deberán implementar para mejorar el funcionamiento y utilización del sistema.

## **PRESENTACIÓN**

Los volcanes y su actividad eruptiva son uno de los más grandes peligros que la humanidad ha enfrentado a lo largo de su historia, esto se debe, a que muchos asentamientos e infraestructura se han desarrollado cerca de ellos. Las comunidades se han establecido cerca de los volcanes motivados por las fuentes de agua que se originan en ellos y por la fertilidad del suelo que es constantemente renovado por los productos volcánicos; dos condiciones que permiten generar bienestar y riqueza para la población.

Los seres humanos con el pasar del tiempo han tratado de comprender y entender este fenómeno natural, con el fin de precautelar su vida y sus bienes; con este objetivo han desarrollado varios campos de estudio basados en la vigilancia de los volcanes.

Mejorar el nivel de la vigilancia volcánica y la comprensión de estos fenómenos por parte del IG-EPN, para el bienestar de la población, es el motivo que ha llevado a la realización de este proyecto.

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 ANTECEDENTES

El Ecuador es un país volcánico, en cual existen al menos 84 edificios volcánicos, de los cuales cinco han entrado en su fase eruptiva en las dos últimas décadas. Los dinamismos eruptivos son altamente variables y dependen en gran medida de los procesos de desgasificación del magma. Estos procesos se investigan desde diferentes perspectivas con el fin de entender que parámetros los controlan. Obtener cada vez más datos sobre el comportamiento de estos fenómenos nos permite crear nuevos modelos o mejorar los existentes, para de esta manera tratar de anticipar la ocurrencia y la potencial magnitud de un evento volcánico y así tratar de disminuir los riesgos asociados.

En el campo de la monitorización volcánica, existen distintos métodos geofísicos y geoquímicos, que permiten medir varios parámetros asociados a una actividad volcánica. Entre los principales parámetros a monitorizar se destacan: la sismicidad, la temperatura, la deformación y la composición de los fluidos volcánicos.

En volcanes de otros países el estudio geoquímico de los fluidos ha arrojado importantes resultados, estableciendo por ejemplo la correlación entre los cambios en las emisiones del CO<sub>2</sub> a través del suelo (desgasificación difusa) o la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en fuentes de agua, con la variación del nivel de actividad de un volcán [1], [2], [3], [4], [5].

Uno de estos proyectos fue el desarrollado por el Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología sección de Palermo y la Facultad de Matemáticas, Física y Ciencias Naturales de la Universidad de Palermo, el mismo que consistió en implementar un sistema automático para la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en fuentes naturales de agua, esto mediante la aplicación del principio de equilibrio dinámico entre el agua como la fuente de CO<sub>2</sub> y el aire como gas de recepción [1].



Debido a los buenos resultados obtenidos y dada la importancia de monitorizar en tiempo real este parámetro, para apoyar los sistemas de vigilancia existentes, se decide el desarrollo y la implementación de un sistema de similares características para así mejorar la evaluación de la actividad volcánica.

## 1.2 LA GEOQUÍMICA EN LA VIGILANCIA VOLCÁNICA

### 1.2.1 GEOQUÍMICA

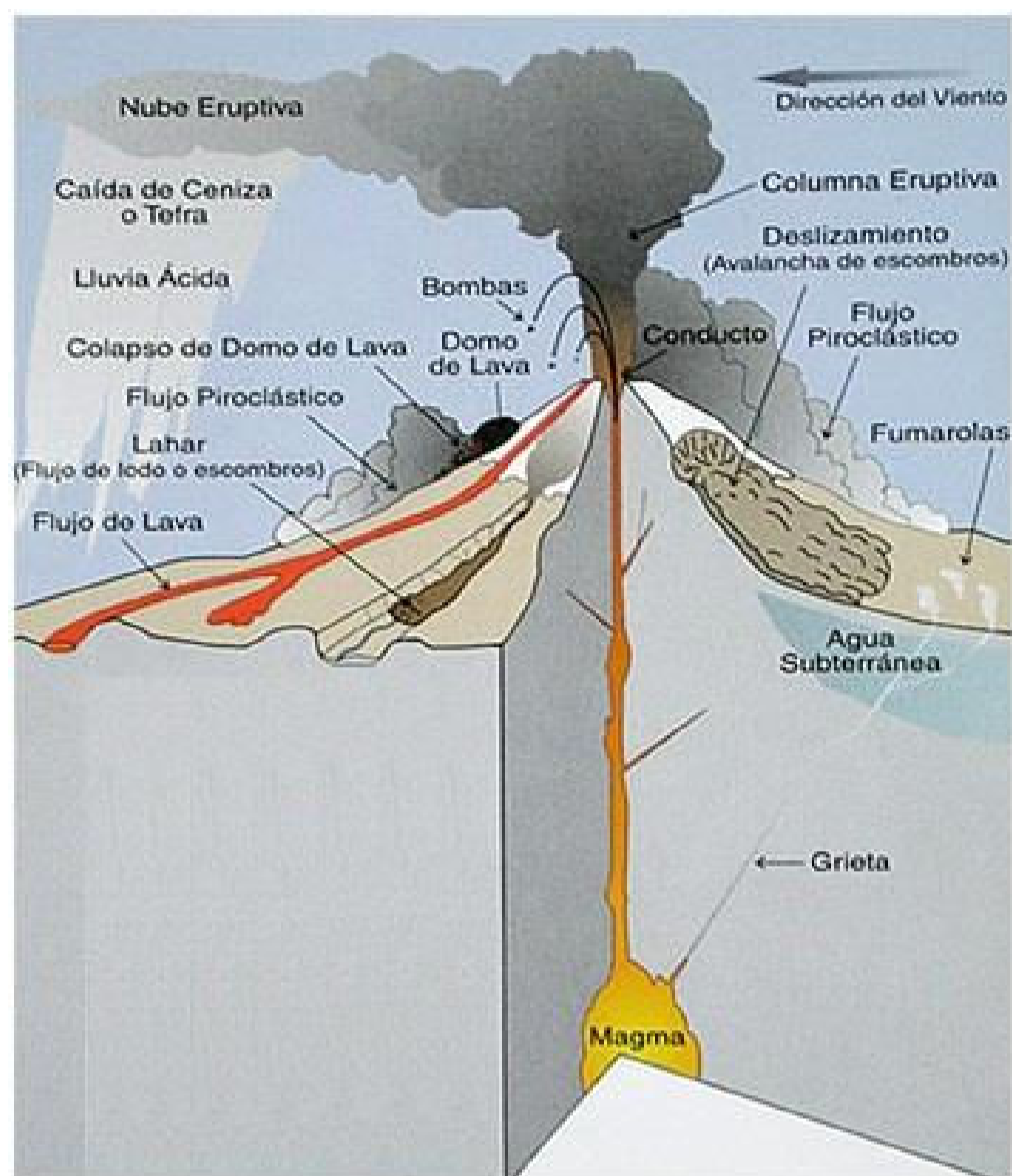
La geoquímica, según la definición del diccionario de la lengua española de la Real Academia Española (RAE), es “*el estudio de la distribución, proporción y asociación de los elementos químicos de la corteza terrestre, y de las leyes que los condicionan*” [6]. A pesar de que en la definición se hace referencia a la corteza terrestre, la geoquímica también se aplica para el estudio de los elementos químicos en los seres vivos, el agua y la atmósfera.

### 1.2.2 COMPUESTOS QUÍMICOS DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

Durante la fase activa, un volcán emite a la superficie terrestre y a la atmósfera productos y compuestos químicos, tanto en estado sólido como gaseoso [3], [7], [8], [9]; como los que se indican en la Tabla 1.1 y en la Figura 1.1:

**Tabla 1.1.** Productos de una erupción volcánica [3], [7]- [9].

PRODUCTOS VOLCÁNICOS	
SOLIDOS	GASES
Ceniza	H <sub>2</sub> O (Vapor)
Rocas	CO <sub>2</sub>
	H <sub>2</sub> S
	H <sub>2</sub>
	N <sub>2</sub>
	NH <sub>4</sub>
	CH <sub>4</sub>
	SO <sub>2</sub>
	HCl
	He
	CO



**Figura 1.1.** Representación de un volcán y los productos de su actividad [10].

Dentro de los productos que se presentan en forma de gas, el principal componente es el vapor de agua, luego el  $\text{CO}_2$ , en menor cantidad el  $\text{SO}_2$  y por último los demás gases presentes en la atmósfera. Como se mencionó todos estos productos se generan en la fase activa del volcán pero hay muchos de estos gases que también se liberan en las fases o períodos de reposo o como premonitores, justo antes de un inicio de una fase de actividad [8].

Este trabajo se centra en las emisiones de  $\text{CO}_2$  durante la fase de reposo principalmente. Como se mencionó, el objetivo es medir las variaciones en las emisiones y concentraciones de  $\text{CO}_2$  y determinar si una reactivación o un incremento de la actividad del volcán están por ocurrir. Durante la fase de reposo, las emisiones de  $\text{CO}_2$  se producen a través de los cráteres en forma de plumas o fumarolas, en los flancos del volcán en forma de emisiones difusas a través del suelo y en fuentes hidrotermales [8].

### 1.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>.

Una vez entendida la importancia de la relación entre las variaciones de los niveles de CO<sub>2</sub> en las emisiones gaseosas, así como en las fuentes de agua que están asociadas a los volcanes, los científicos han desarrollado métodos y técnicas para tratar de conocer o estimar el valor de dichas variaciones.

En lo que respecta a la medición de los niveles de CO<sub>2</sub>, existen tanto métodos directos como indirectos. Los métodos directos también pueden ser activos o pasivos; los métodos directos activos implican un mayor riesgo para las personas que lo realizan y los equipos que se utilizan, ya que la persona que realice la medición debe estar directamente sobre la fuente CO<sub>2</sub>, que en muchos casos puede ubicarse en las fumarolas del edificio volcánico o en su cráter activo. Dependiendo de cuál sea la ubicación, se puede acceder a pie o se debe volar sobre la fuente, lo cual como se había mencionado implica mayores riesgos y logística.

#### 1.3.1 MÉTODOS INDIRECTOS

Los métodos indirectos para medir la concentración de CO<sub>2</sub> ( $C_{CO_2}$ ), están basados principalmente en determinar la concentración en los gases que emanan del suelo a diferentes profundidades. Si se desprecia las interferencias que puedan producirse en la interacción de los gases con las capas del suelo, el flujo total  $\varphi_{total}$  está compuesto por la suma del flujo por advección en mayor valor y por el flujo por difusión en menor valor [8].

Si el transporte del gas a través de un medio estacionario se produce por difusión, el flujo difusivo  $\varphi_d$  en estado estable es proporcional al gradiente de concentración  $dC/d\lambda$  y puede ser expresado mediante la primera ley de Fick [8]:

$$\varphi_d = -vD\left(\frac{dC}{d\lambda}\right) \quad (1.1)$$

Donde  $v$  representa la porosidad del suelo y  $D$  el coeficiente de difusión, el signo menos indica que las partículas se mueven desde los puntos de alta concentración hacia los puntos de baja concentración.

Entonces, para la medición de la  $C_{CO_2}$  por métodos indirectos la mayor limitación es la dificultad para poder determinar los valores de  $v$  y  $D$  [8].

### 1.3.2 MÉTODOS DIRECTOS

Los métodos directos para determinar el flujo de  $CO_2$  pueden ser dinámicos o estáticos.

#### 1.3.2.1 Métodos directos dinámicos

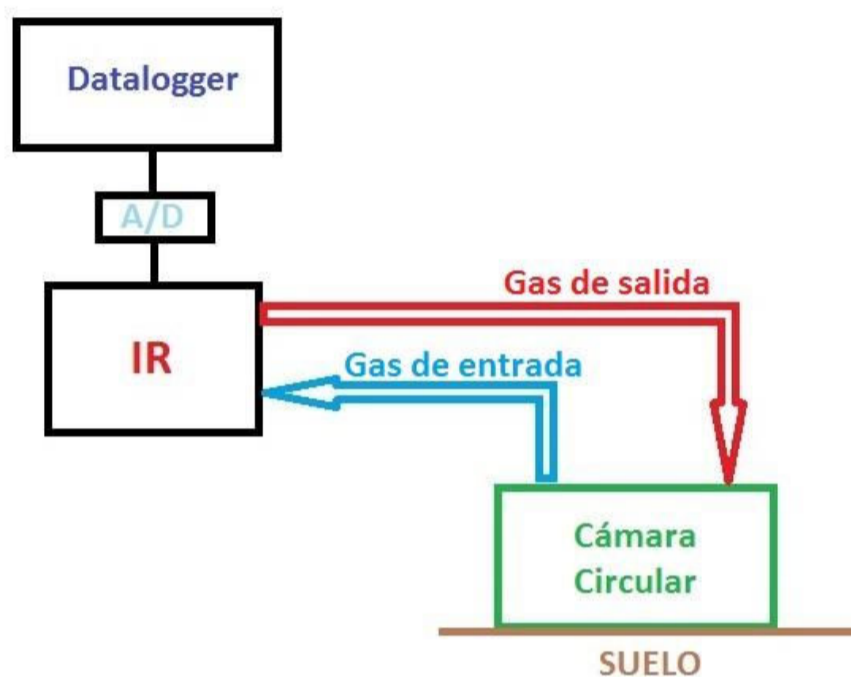
Los métodos directos dinámicos consisten en medir la concentración de  $CO_2$  ( $C_{CO_2}$ ) en un flujo de aire conocido a través de una cámara invertida y colocada transversalmente a una superficie conocida del suelo [8]. Por ejemplo, en 1988 Gurrieri y Valenza insertaron en el suelo un tubo abierto en la base, por donde un flujo conocido de gas es bombeado desde la base del tubo y la  $C_{CO_2}$  en el gas es constantemente medido [8]. El gas succionado es reemplazado por aire atmosférico que ingresa por la parte superior del tubo; después de un tiempo dado, la  $C_{CO_2}$  alcanza un valor constante llamado "Concentración Dinámica" ( $C_d$ ) la misma que es proporcional al  $\varphi_{soil CO_2}$ . Sin embargo para poder calcular el valor real de  $\varphi_{soil CO_2}$ , se debe multiplicar la  $C_d$  por un factor, que depende del dispositivo experimental, las condiciones de trabajo así como las características físicas del suelo en cada punto de medición. Además de lo antes mencionado, los procedimientos dinámicos pueden verse afectados por sobre presurización o despresurización dentro de la cámara de medición dependiendo del diseño instrumental del aparato y de la magnitud de flujo de aire que elija el operador [8].

#### 1.3.2.2 Métodos directos estáticos

Muchas investigaciones sobre la medición de  $\varphi_{soil CO_2}$  se han realizado mediante el uso de técnicas estáticas tales como:

- a) **Técnica "solid soda lime"**: Esta técnica usa la "soda lime sólida" (una mezcla de óxido de calcio e hidróxido de sodio) para absorber dentro de un contenedor cerrado el  $CO_2$  que es liberado desde el suelo; la sensibilidad de esta técnica es muy alta pero los tiempos de medición son muy largos, aproximadamente 24 horas [8].

b) **Técnica de la cámara de acumulación:** Otra técnica estática de medición del  $\varphi_{soil CO_2}$  consiste en determinar la tasa de incremento en la concentración de  $CO_2$  dentro de una cámara invertida, ubicada en la superficie del suelo, esta técnica es conocida como el método de cámara de acumulación y su esquema se muestra en la Figura 1.2.



**Figura 1.2.** Esquema del método de la cámara de acumulación [8].

En esta técnica el gas es continuamente extraído de la cámara, se lo envía a un espectrofotómetro infrarrojo a través de un filtro, que contiene  $Mg(ClO_4)_2$  para evitar el paso de vapor de agua que pueda alterar las mediciones y provocar daños en el espectrofotómetro y luego es reinyectado a la cámara; los valores de  $C_{CO_2}$  son adquiridos y almacenados por un datalogger [8].

En estudios realizados para verificar si la técnica de la cámara de acumulación es válida, para rangos de trabajo entre  $1.7$  a  $11.4 \text{ gm}^{-2}d^{-1}$  no se observaron diferencias significativas en las medidas obtenidas con la técnica de la soda lime; pero una de las desventajas de este método, es que si la cámara de acumulación no es colocada de manera apropiada en la tierra para evitar el ingreso de aire de la atmósfera, esto puede causar errores significativos, especialmente en días donde haya mucho viento [8]. Otra desventaja de este método, se debe a que puede ser afectado por el error que introduce la actividad de los organismos (bacterias, materia en descomposición, etc.) que se encuentran en la tierra, así como por las actividades humanas como son la producción industrial, uso de vehículos, quema de pastizales, etc.



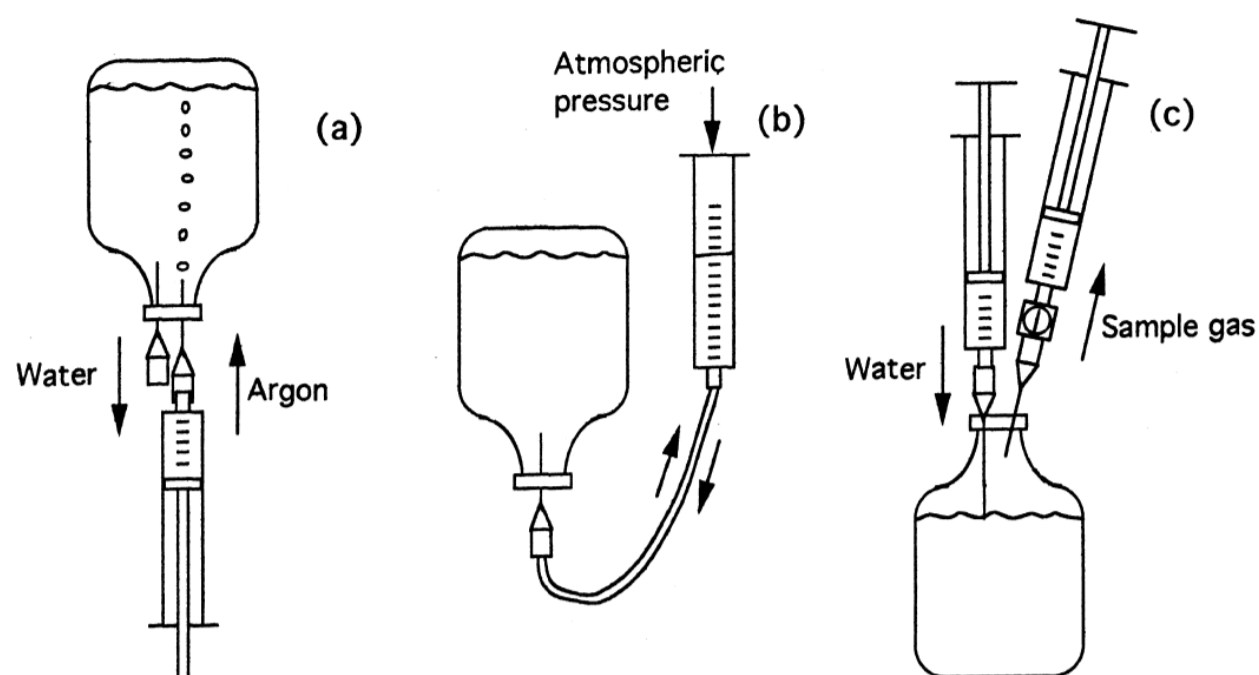
**Figura 1.3.** Instrumento para la medición de la  $C_{CO_2}$ , que utiliza la técnica de cámara invertida propiedad del IG-EPN.

El instrumento mostrado en la Figura 1.3, corresponde al equipo que se utiliza en el método de la cámara invertida, el cual a pesar de ser un método diseñado para medir el flujo de  $CO_2$  a través del suelo, también ha sido usado para medir el flujo de  $CO_2$  disuelto en el agua ( $\varphi_{water\ CO_2}$ ) de lagos volcánicos como Cuicocha, Kwai Jen (Indonesia), entre otros.

- c) Técnica de medición de la concentración de  $CO_2$  disuelto en agua:** Dentro de esta técnica se tiene algunos métodos, pero en este caso solo se hará referencia al método que se basa en el equilibrio de reparto del gas entre la fase líquida y la fase gaseosa.

Este método consiste en hacer circular agua a través de extractores, en los cuales se introduce un gas receptor, el mismo que puede ser aire (o cualquier otro dependiendo de la especie gaseosa que se quiera determinar). Al finalizar el proceso, las presiones parciales de los diferentes gases dentro de los extractores serán las mismas que las de los gases disueltos en agua [11].

Luego al analizar la fase gaseosa, por cromatografía, detección infrarroja, etc., es posible establecer la concentración inicial de gas disuelto en el agua [11]. En la Figura 1.4 se presenta un ejemplo de procedimiento que se sigue durante la utilización de uno de estos métodos.



**Figura 1.4.** Ejemplo de uno de los métodos para determinar la concentración de un gas disuelto en agua: a) Introducción del gas receptor en la botella que contiene la muestra; b) Restauración de la presión atmosférica dentro del recipiente; c) extracción de la fase gaseosa después del equilibrio para ser analizado en un cromatógrafo de gases [11].

Una de las ventajas de esta técnica respecto de las anteriores se debe a que la muestra de agua puede ser tomada directamente desde la fuente o vertiente, con lo que la probabilidad de que se produzca una contaminación es bastante baja. Otra de las ventajas y talvez la más importante es que, la concentración de gas que se va a determinar, es sobre el gas que se encuentra disuelto en el agua, por lo que este se verá casi nulamente afectado por la influencia de factores externos tales como la actividad industrial, orgánica, etc.

Por el contrario, la desventaja es que hasta ahora el análisis del gas contenido en las muestras de agua, se lo debe realizar en el laboratorio, por tal motivo cada vez que se requiera realizar una medición de la  $C_{CO_2}$ , para evaluar su variación, se deberá ir al lugar de la fuente, tomar nuevas muestras y trasladarlas al laboratorio para su análisis, además de disponer de personal que realice la toma de muestras continuamente. Esto implica costos y logística y acceso a un laboratorio certificado. Los cambios en la concentración de los gases disueltos en el agua pueden ser de corta duración y por lo tanto en función de la periodicidad del muestro, estos pueden pasar desapercibidos. Adicionalmente, el tiempo entre la toma de la muestra y el resultado del

análisis puede tardar días a semanas, limitando el potencial del método para un seguimiento continuo de la actividad volcánica.

Una vez expuestos los diferentes métodos y técnicas con las que se puede medir la concentración de CO<sub>2</sub> en las emisiones de áreas volcánicas y geotermales, se puede determinar claramente que la técnica de medición de  $C_{CO_2}$  disuelto en agua es una de las mejores opciones para la vigilancia de la variación de la actividad volcánica, si se obtienen los datos en tiempo real.

## 1.4 PRINCIPIO TEÓRICO

### 1.4.1 SOLUBILIDAD DE GASES EN EL AGUA

En 1803 el químico inglés William Henry formuló una ley, la cual enuncia que a una temperatura constante, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido (Ley de Henry). Matemáticamente la ley de Henry se expresa de la siguiente manera [1], [11], [12], [13]:

$$M_i = k_H * P_i \quad (1.2)$$

Donde:

- $M_i$  es la concentración molar del gas disuelto.
- $K_H$  es la constante de Henry, la misma que depende de la naturaleza del gas, la temperatura y el tipo de líquido.
- $P_i$  es la presión parcial del gas.

Para entender mejor lo antes expuesto, se puede tomar como ejemplo la solubilidad del Oxígeno en el agua:



De [14]-[15] se conoce que a 25°C la constante de Henry para el oxígeno es:



$$K_H = [O_2(d)]/P_{O_2} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ mol}/(\text{atm} \cdot \text{L}) \quad (1.4)$$

Ya que el oxígeno se encuentra presente en la atmósfera en un 21%, entonces su presión parcial será de 0,21 atmósferas, por lo tanto la concentración molar del oxígeno en el agua a 25°C será de:

$$M_{O_2} = K_H \cdot P_{O_2} = [1,3 \times 10^{-3} \text{ mol}/(\text{atm} \cdot \text{L})] \cdot 0,21 \text{ atm} = 2,73 \times 10^{-4} \text{ mol/L} \quad (1.5)$$

En la Tabla 1.2, se muestran valores para la constante de Henry para algunos gases disueltos en agua a 25°C, [14], [15] :

**Tabla 1.2.** Valores de la constante de Henry para algunos gases disueltos en agua a 25°C [14], [15].

GAS	$K_H[\text{mol}/(\text{atm} \cdot \text{L})]$
Argón (Ar)	$1,4 \times 10^{-3}$
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	$1,3 \times 10^1$
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	$3,4 \times 10^{-2}$
Helio (He)	$3,7 \times 10^{-4}$
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	$7,8 \times 10^{-4}$
Neón (Ne)	$4,5 \times 10^{-4}$
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	$6,1 \times 10^{-4}$
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	$1,3 \times 10^{-3}$

Dado que la constante de Henry depende de la temperatura, la ecuación para calcular esta constante en función de la temperatura es [15]:

$$K_H = K_{Ho} \left[ c^* \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) \right] \left[ \frac{\text{mol}}{\text{atm} \cdot \text{L}} \right] \quad (1.6)$$

Donde:

$K_{Ho}$  = Constante de Henry en condiciones estandar

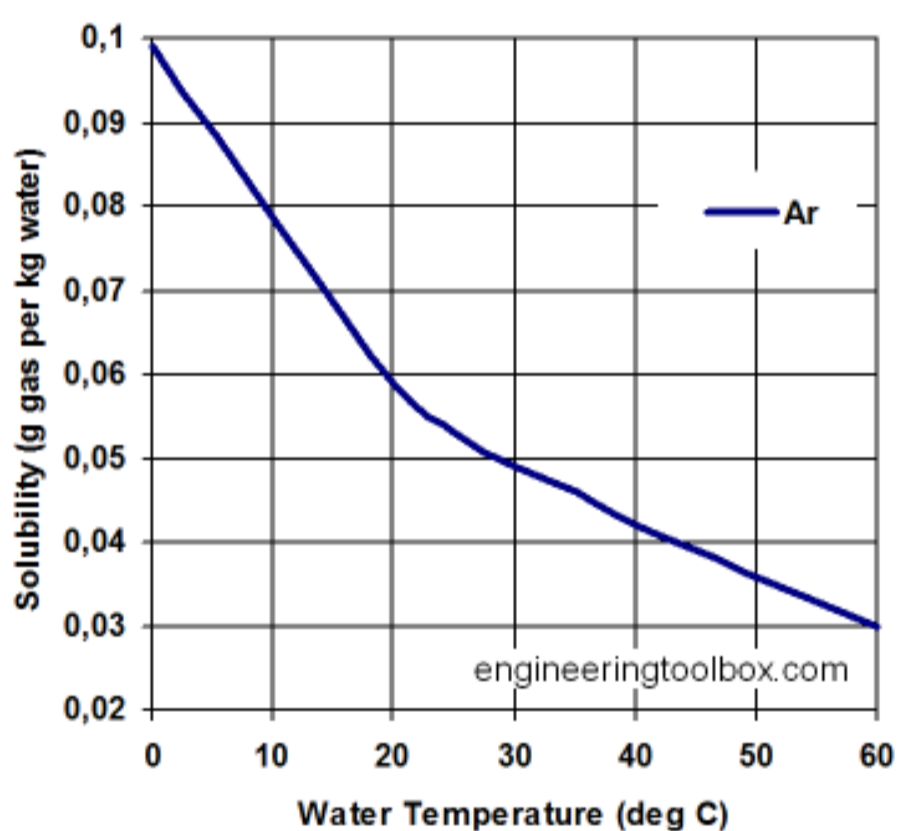
$C$  = Una constante de temperatura en °K (para el  $CO_2 \rightarrow C = 2400^\circ K$ )

$T$  = La temperatura en °K a la que queremos calcular la constante de Henry

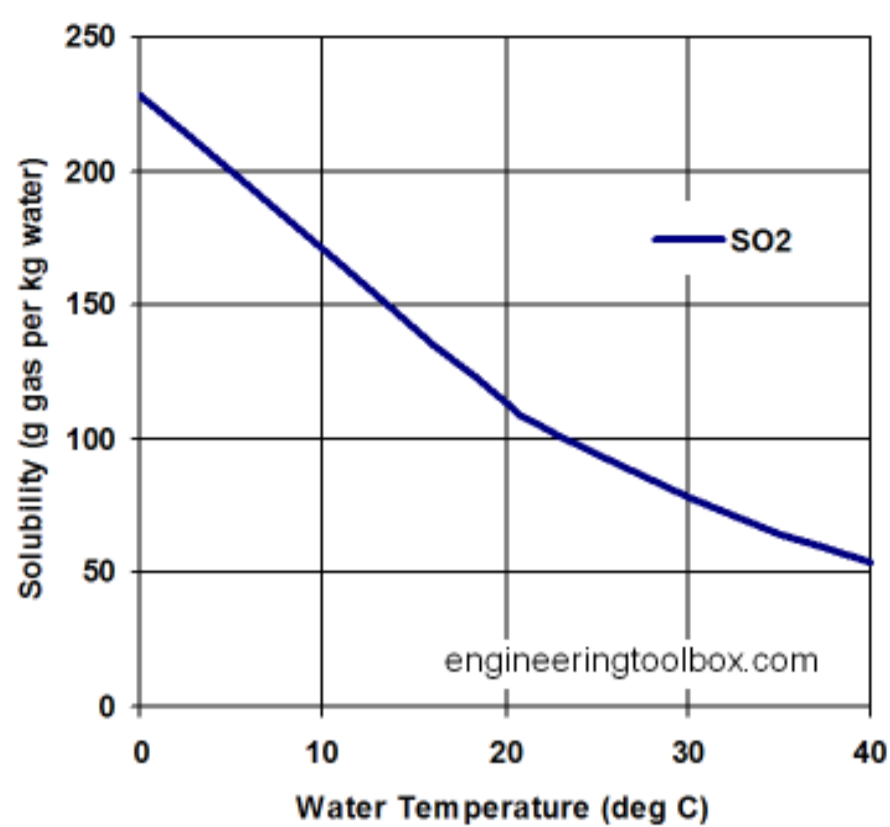
$T_o$  = Temperatura estandar  $298^\circ K$

Las condiciones estándar son: una atmósfera de presión a  $25^\circ C$  ( $298^\circ K$ ).

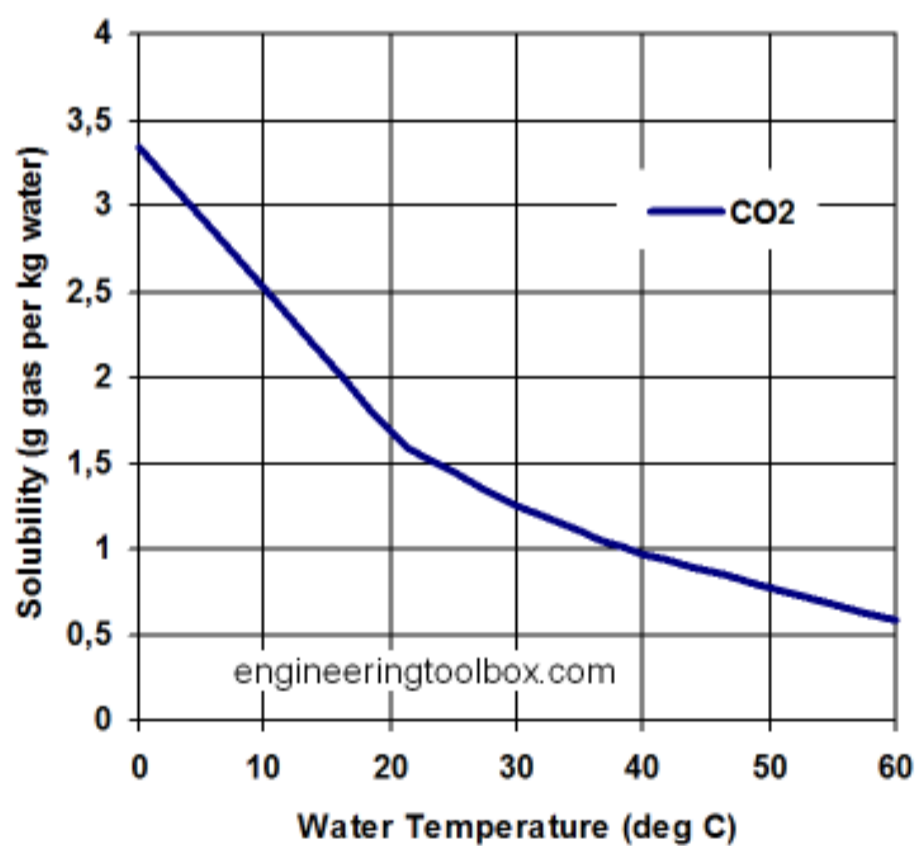
En la Figura 1.5, Figura 1.6, Figura 1.7, Figura 1.8, Figura 1.9, Figura 1.10 y Figura 1.11, tomadas de [16], se muestra la variación de la solubilidad de los gases de la Tabla 1.2 en agua pura, en función de la temperatura, manteniendo la presión constante de una atmósfera.



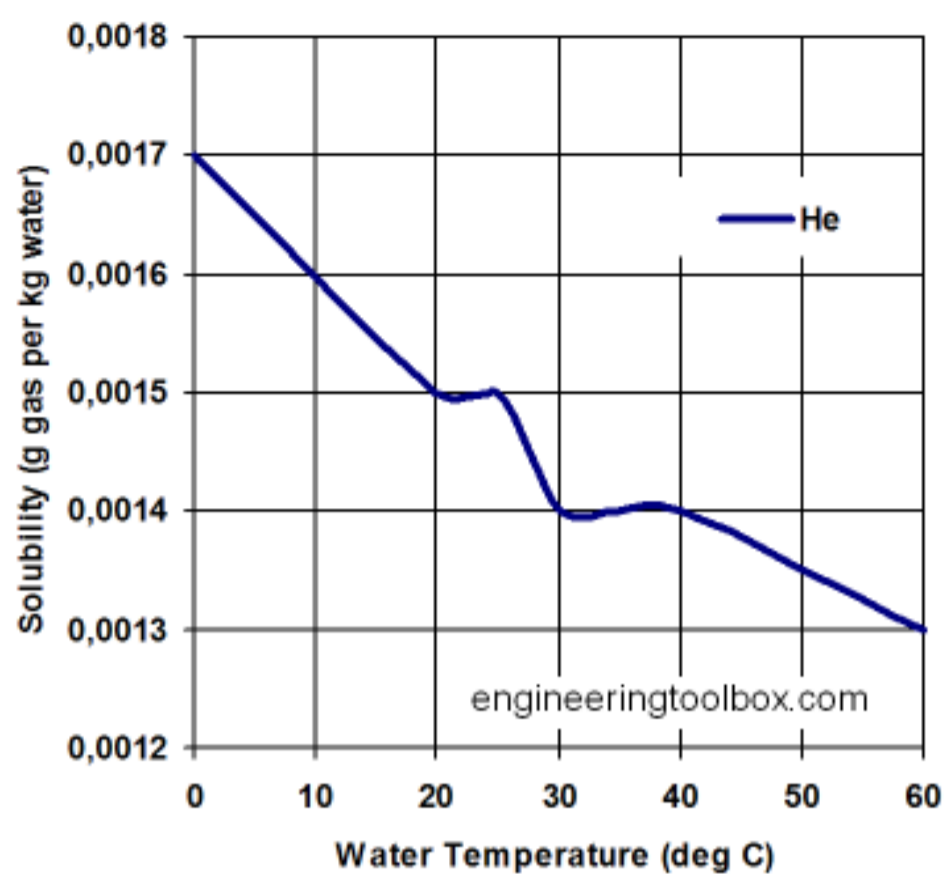
**Figura 1.5.** Diagrama de solubilidad del Argón en agua pura en función de la temperatura a una atmósfera de presión [16].



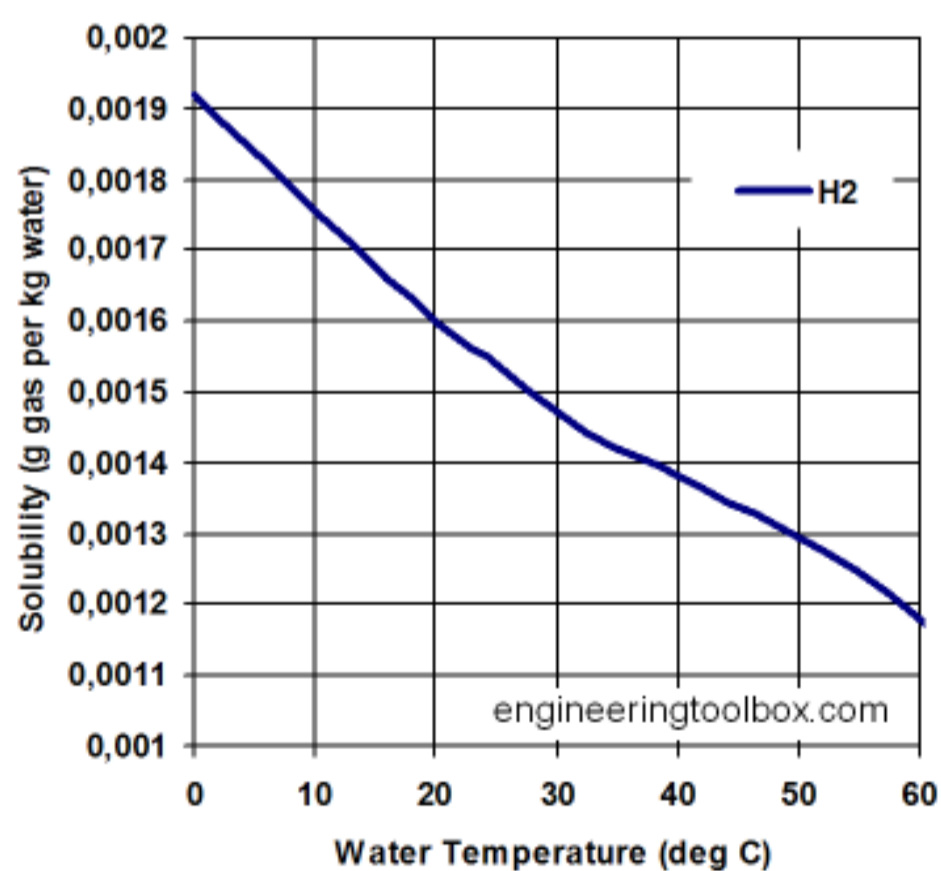
**Figura 1.6.** Diagrama de solubilidad del Dióxido de Azufre en agua pura en función de la temperatura a una atmósfera de presión [16].



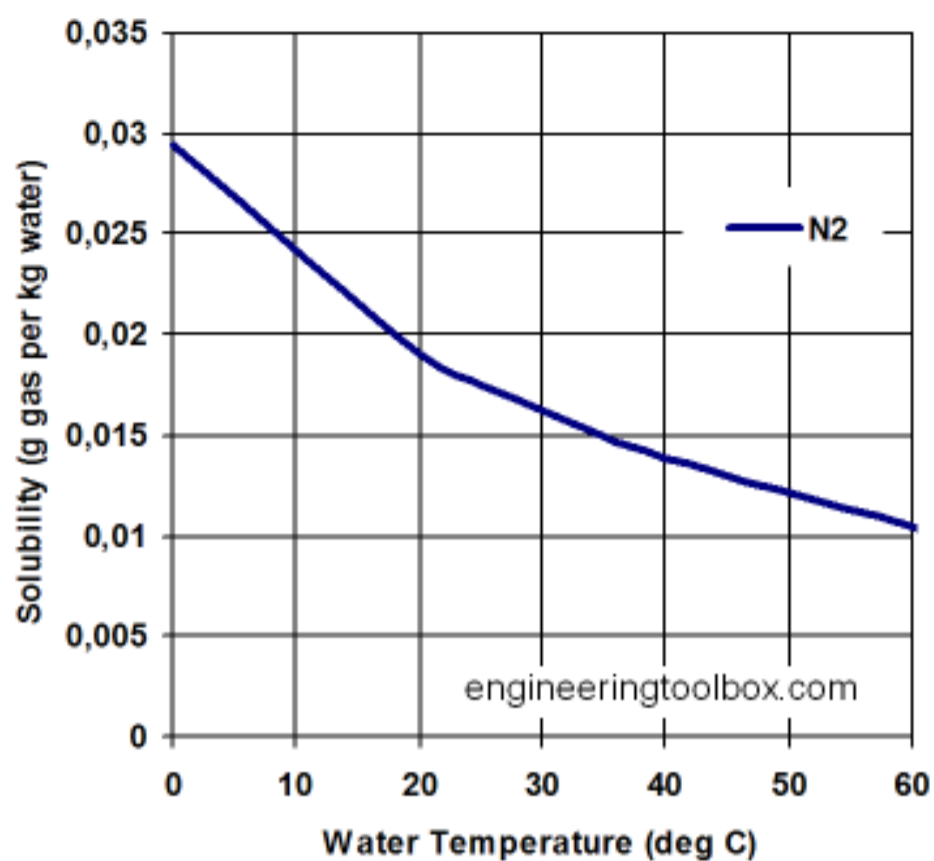
**Figura 1.7.** Diagrama de solubilidad del Dióxido de Carbono en agua pura en función de la temperatura a una atmósfera de presión [16].



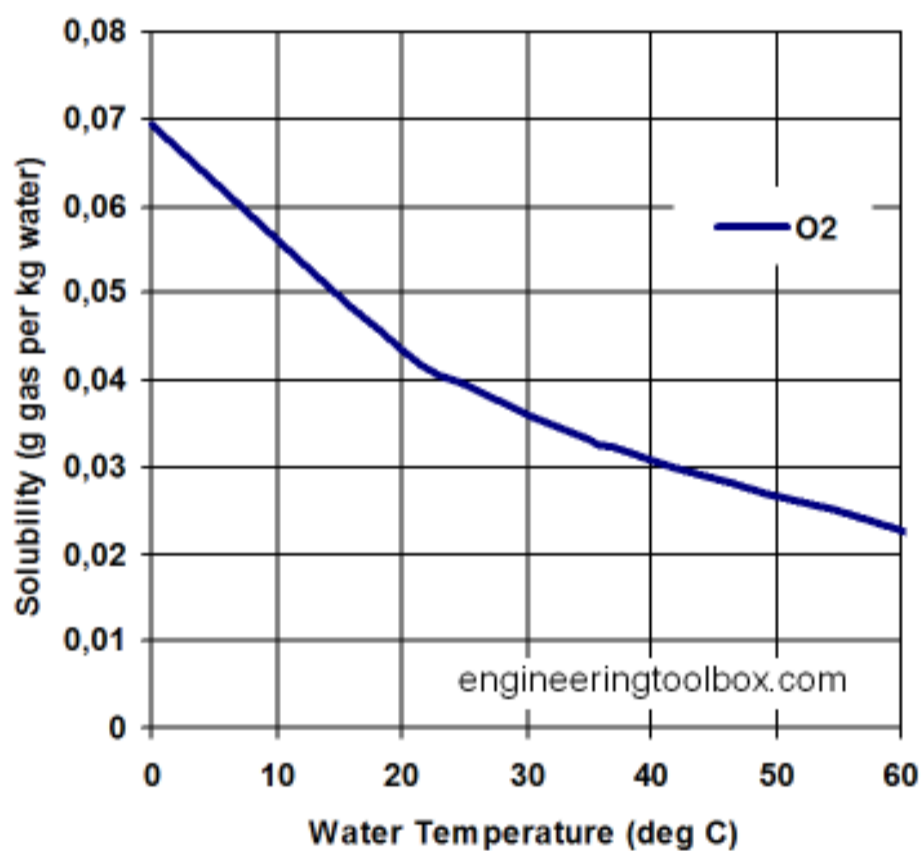
**Figura 1.8.** Diagrama de solubilidad del Helio en agua pura en función de la temperatura a una atmósfera de presión [16].



**Figura 1.9.** Diagrama de solubilidad del Hidrógeno en agua pura en función de la temperatura a una atmósfera de presión [16].



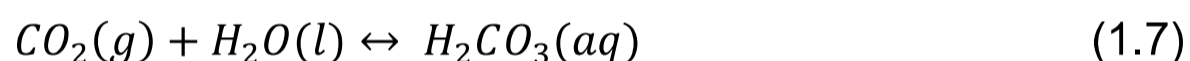
**Figura 1.10.** Diagrama de solubilidad del Nitrógeno en agua pura en función de la temperatura a una atmósfera de presión [16].



**Figura 1.11.** Diagrama de solubilidad del Oxígeno en agua pura en función de la temperatura [16].

### 1.4.2 SOLUBILIDAD DEL CO<sub>2</sub> EN EL AGUA

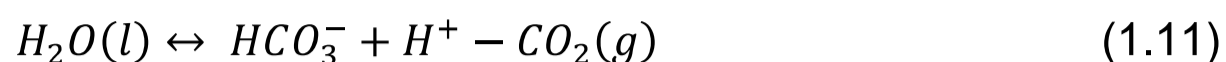
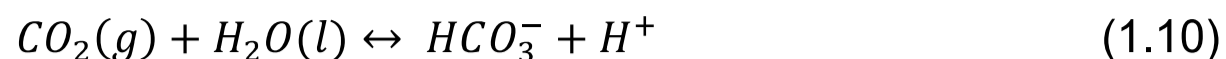
Como se puede observar en el numeral anterior, el CO<sub>2</sub> que es el gas con el cual se va a trabajar, tiene una disolución mucho mayor al resto de gases a excepción del SO<sub>2</sub>, esto se debe a que este gas reacciona con el agua y por esta razón, las fuentes de agua natural que nacen en los edificios volcánicos, contienen significativas cantidades de CO<sub>2</sub> disuelto. En aguas superficiales las fuentes del CO<sub>2</sub> que se disuelve proviene de la atmósfera, de la actividad biológica e industrial así como de las rocas que entran en contacto con ellas; en aguas subterráneas el CO<sub>2</sub> que se disuelve en ellas proviene de la actividad de los microorganismos, de las rocas y en el caso de fuentes cercanas a volcanes, la principal fuente es la desgasificación del magma que se encuentra debajo de ellas. Cuando el CO<sub>2</sub> entra en contacto con el agua, en un primer momento se genera ácido carbónico [1], [12], [14], el mismo que inmediatamente pasa a formar parte del complejo equilibrio ácido-base, el cual está compuesto por todas las formas carbonatadas presentes en el agua. Entonces, la primera reacción que se tiene cuando el CO<sub>2</sub> se disuelve en el agua, es la siguiente:



Como el ácido carbónico es un ácido débil se disocia e ioniza en aguas naturales a través de las siguientes reacciones:



El equilibrio de estas reacciones está determinado por las constantes K1 y K2 (↔ constantes de ácidos). En consecuencia la relación entre las especies de carbono H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> en la solución es fuertemente dependiente del pH.



Si, se aplica la **ecuación de Henderson-Hasselbalch** y colocamos la molécula de agua dentro de la constante de equilibrio, se tiene que:

$$\log K = \log(HCO_3^-) + \log(H^+) - \log(CO_2) \quad (1.12)$$

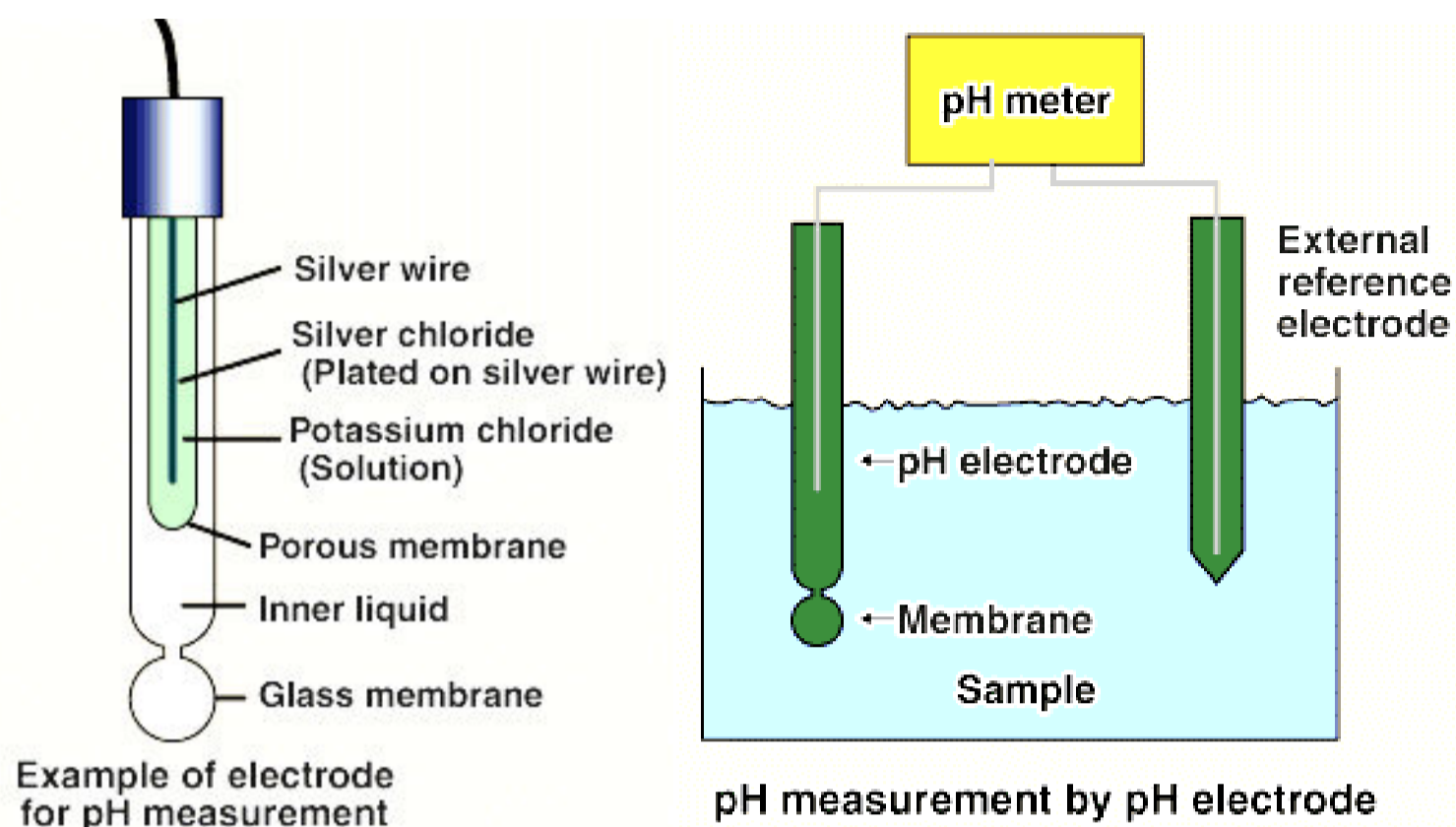
$$pH = \log(HCO_3^-/CO_2) + pK \quad (1.13)$$

La disolución del  $CO_2$  en el agua produce un descenso en el pH, por lo que la medición del pH mediante un electrodo puede proporcionar una idea rápida de la cantidad de  $CO_2$  disuelto en el agua y esto permitiría calcular la presión del  $CO_2$  en equilibrio con el acuífero o la fuente de agua.

### 1.4.3 PROBLEMAS TÉCNICOS DE LA MEDICIÓN DEL *pH*

El valor de pH se puede medir de manera precisa mediante un potenciómetro, más conocido como pH-metro. Dicha medición se la realiza basados en el hecho de que cuando dos soluciones de distinto pH entran en contacto se produce un flujo de  $H^+$ , es decir una corriente, debido a la diferencia de potencial existente entre las dos disoluciones [17].

El pH-metro consta de dos electrodos un electrodo de pH y un electrodo de referencia, estos electrodos pueden estar separados o pueden estar integrados como se observa en la Figura 1.12. El electrodo pH está compuesto de vidrio sensible al pH y el electrodo de referencia está compuesto generalmente de plata o cloruro de plata.



**Figura 1.12.** Medición del pH del agua mediante un electrodo de pH con electrodo de referencia integrado y con electrodo de referencia exterior [17].

La medición del pH como se mencionó, sería el método más rápido para determinar la cantidad aproximada de  $CO_2$ , pero dado que la aplicación que aquí se presenta, busca realizar medidas de cantidad de  $CO_2$  disuelto en períodos de semanas o meses, la medición de pH presenta problemas técnicos, especialmente cuando se tiene alta salinidad y alta temperatura en las fuentes de agua.

El problema que puede presentarse, se debe a la estructura y composición del electrodo de pH. Si tenemos una alta concentración de sales, estas empezarán a depositarse en el electrodo de vidrio, por lo tanto su sensibilidad al cambio del pH se verá afectada provocando medidas erróneas. Otro de los factores que afecta la medición del pH es la temperatura, dado que la solución en la que se encuentra el electrodo de referencia debe estar a temperatura ambiente (alrededor de  $25^\circ C$ ), entonces cuando el electrodo permanece inmerso por un largo período en el agua que tiene alta temperatura, la solución del electrodo de referencia empieza a incrementar su temperatura, provocando también errores en la medición.

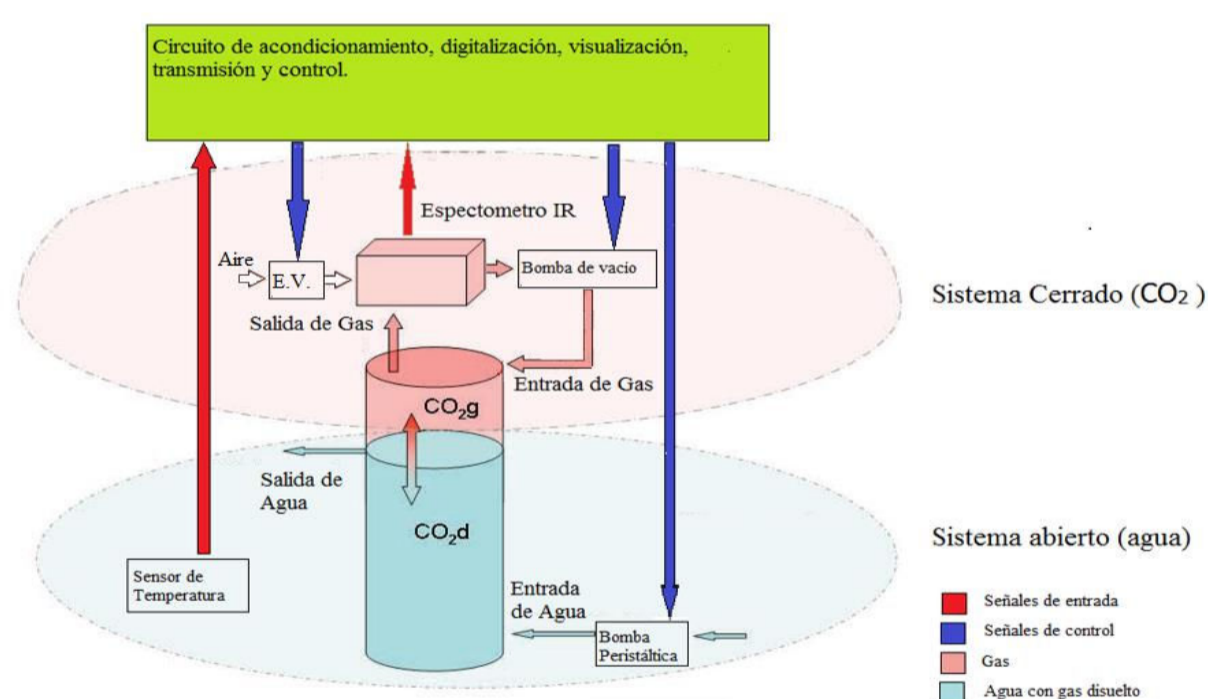


## 1.5 REQUISITOS DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>

### 1.5.1 ESQUEMA GENERAL

Como se mencionó anteriormente para realizar la medición de  $C_{CO_2}$ , se utiliza el principio del equilibrio dinámico existente entre gases disueltos en una fase líquida y un receptor en fase gaseosa, que en este caso será el aire. Es decir: *“En equilibrio químico y a temperatura constante, un volumen conocido de líquido en contacto con un gas dado disuelve una cantidad de gas que es proporcional a la presión del gas en el líquido.”* [1].

En la Figura 1.13, se muestra un esquema del sistema automático para la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> que se elaborará en el presente trabajo, el cual consta del circuito electrónico de control, adquisición, visualización y transmisión; un subsistema cerrado para la circulación del gas y un subsistema abierto para la circulación del agua donde se quiere medir la concentración de CO<sub>2</sub>.



**Figura 1.13.** Esquema mejorado del sistema para la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto [1].

### 1.5.2 SUBSISTEMA ABIERTO

En el subsistema abierto, se hará circular el agua proveniente de la fuente, mediante una bomba a través de una cámara, donde por el movimiento del agua, el CO<sub>2</sub> que se encuentra disuelto se desprenderá y se quedará atrapado en un

espacio formado por la superficie del agua dentro de la cámara y las superficies superior y lateral de la cámara. El espacio interno de la cámara estará inicialmente lleno de aire de la atmósfera que ingresará a través de la electroválvula. En este subsistema, también se medirá la temperatura del agua en la fuente y en el interior de la cámara mediante dos sensores de temperatura, ya que la cantidad de CO<sub>2</sub> que puede disolverse en el agua se ve directamente afectada por la temperatura del agua.

### **1.5.3 SUBSISTEMA CERRADO**

En el subsistema cerrado, mediante una bomba de aire, se hará circular a través de un sensor de CO<sub>2</sub>, el gas que se desprende del agua y que queda atrapado en la cámara. El sensor de CO<sub>2</sub>, entrega una señal eléctrica que variará de acuerdo a la concentración de CO<sub>2</sub> que se encuentre en el gas que circule a través de él, esta señal será directamente proporcional al porcentaje de CO<sub>2</sub> que compone la mezcla. En este subsistema se establecerán condiciones iniciales y de referencia, al activar una electroválvula para tomar aire de la atmósfera y hacerlo circular por el sensor de CO<sub>2</sub> al inicio y al final del muestreo.

### **1.5.4 CIRCUITO ELECTRÓNICO**

El circuito electrónico estará basado en un micro-controlador, el mismo que controlará la operación de las bombas y la electroválvula y recibirá las señales del espectrómetro infrarrojo y el sensor de temperatura y los digitalizará mediante su conversor análogo-digital. Además, el micro-controlador sincronizará los datos adquiridos con la hora global (UTC), mediante la señal recibida desde un receptor GPS, con el objetivo de hacer compatible estos datos, con los datos de otras variables que obtienen otros instrumentos, que integran el sistema de monitorización volcánica; luego de esto, los datos se almacenarán en un dispositivo de almacenamiento masivo extraíble.

En el caso de que el nivel de vigilancia volcánica requiera disponer de los datos en tiempo real en el centro TERRAS del IG-EPN, se dispondrá también de un puerto Ethernet por el cual, se enviarán los datos a un radio transmisor y este a su vez, los enviará mediante la red de radio enlaces que posee el IG-EPN, hacia los servidores ubicados en su sede.

El sistema también dispondrá de una interfaz gráfica desarrollada a partir de un software disponible en el mercado, para este tipo de aplicaciones.

La interfaz gráfica nos permitirá visualizar los datos que están siendo adquiridos en tiempo real, así como los datos almacenados en la memoria y nos permitirá descargarlos en un archivo plano de extensión *.txt* o *Excel*.

### **1.5.5 ELEMENTOS DEL SISTEMA AUTOMÁTICO**

De acuerdo con la descripción anterior, se hace necesario que el sistema automático disponga de los siguientes elementos:

- Una cámara cerrada de volumen conocido (cámara de equilibrio), por donde pueda circular el agua que contiene el CO<sub>2</sub>.
- Un sensor para la detección de CO<sub>2</sub>, en la mezcla gaseosa que se produce por la combinación entre el aire en la cámara de equilibrio y el gas que es liberado desde el agua.
- Dos sensores de temperatura que permitan conocer la temperatura del agua en la fuente y en el interior de la cámara de equilibrio, ya que durante el transporte del agua desde la fuente hacia el recipiente se va a tener una pérdida o ganancia de temperatura, dependiendo del lugar en qué hagamos nuestra medición.
- Una bomba que permita llevar el agua desde la fuente hacia la cámara de equilibrio y hacerla circular a través de ella.
- Una bomba que permita hacer circular el aire o la mezcla aire-gas que se encuentra en la cámara de equilibrio a través del sensor de CO<sub>2</sub>.
- Una electroválvula que permita ingresar aire de la atmósfera o ingresar la mezcla aire-gas de la cámara de equilibrio al sensor de CO<sub>2</sub>.

Una vez, determinados los principios bajo los cuales operará el sistema automático para la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en fuentes naturales de agua y las características técnicas que este deberá poseer, el siguiente paso es el diseño e implementación del hardware de control.

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

#### 2.1 INTRODUCCIÓN Y ESQUEMA DEL HARDWARE

##### 2.1.1 CÁMARA DE EQUILIBRIO

Se conoce que, una disolución es una mezcla homogénea en todas sus partes, entonces si se toma una muestra con un volumen arbitrario pero conocido de esta mezcla, la concentración de sus componentes (en este caso CO<sub>2</sub>) va a ser la misma que en la totalidad de la disolución.

Como ejemplo, si se observa la curva presentada en la Figura 1.7, se tiene que a 40 °C y 1 atmósfera de presión, la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto en 1Kg de agua (1 Litro de agua), es 0.9 gr. Entonces si se aplica la ecuación general de los gases, se puede determinar el volumen que esta cantidad de CO<sub>2</sub> ocupa:

T=40°C

Cantidad de CO<sub>2</sub> = 0,9 gr

Volumen de la disolución= 1L

Presión= 1 atm.

$$C_{CO_2} = M = \frac{0,9gr}{43,99grMol} = 0,0204592 \left[ \frac{mol}{L} \right] \quad (2.1)$$

Se conoce que la ecuación de general de los gases es:

$$P * V = \eta * R * T \quad (2.2)$$

Donde:

*P* = Presión

*V* = Volumen que ocupa el gas

*η* = Número de moles del gas

$R = \text{constante universal de los gases } (0,08205746 \left[ \frac{\text{atm} * \text{L}}{^\circ\text{K} * \text{mol}} \right])$

$T = \text{Temperatura en grados kelvin } (40^\circ\text{C} = 313^\circ\text{K})$

Entonces, si se reemplazan todos los valores en la Ecuación (2.2), se obtiene el volumen que ocupará el gas:

$$V = \frac{0,0204592[\text{mol}] * 0,08205746 \left[ \frac{\text{atm} * \text{L}}{^\circ\text{K} * \text{mol}} \right] * 313^\circ\text{K}}{1[\text{atm.}]} = 0,5254[\text{L}] \quad (2.3)$$

Para este ejemplo, se observa que el volumen por cada litro de disolución en agua pura, que ocuparán 0,9 gramos de CO<sub>2</sub> con presión de una atmósfera, es 525.4 ml, además se debe tomar en consideración que la solubilidad del CO<sub>2</sub>, también se ve afectada por la salinidad del agua y la presencia de otros gases, por lo tanto, para una fuente natural de agua, la cantidad de CO<sub>2</sub> en gramos disminuirá y por ende el volumen que este ocupará.

Si se toman los resultados del ejemplo anterior, los resultados presentados en otros trabajos previos [1], [11] y tomando en cuenta que, mientras más grande sea el volumen de la cámara de equilibrio, más difícil será su transporte, se decide utilizar una cámara de equilibrio con un volumen de 500ml, de los cuales 450ml serán ocupados por el agua de la fuente donde se quiere determinar la  $C_{CO_2}$  y los restantes 50ml serán ocupados por el aire y el gas que se desprenda del agua, hasta alcanzar el equilibrio.

El mejor material para elaborar la cámara de equilibrio es el vidrio, ya que este no reacciona con el agua o sus componentes y por lo tanto no introducirá errores en las mediciones que se van a realizar. Sin embargo, su fragilidad es una desventaja, al considerar un instrumento que se utilizará en el campo bajo condiciones extremas y que corre el riesgo de caídas o golpes fuertes.

Teniendo en cuenta los factores antes mencionados, la mejor opción que existe para fabricar la cámara de equilibrio es el acrílico (polimetilmetacrilato o plexiglás), el mismo que posee las siguientes propiedades físicas y químicas [18], [19]:

- Transmisión de la luz del 92-95% (transparencia que es superior a la del vidrio).

- Bajo peso (densidad 1,2 g/cm).
- Extraordinaria resistencia al medio ambiente, excelente resistencia a la degradación por rayos ultravioletas.
- No se opaca con el tiempo.
- Larga vida útil.
- Facilidad para el termo-formado: sometiéndole a temperaturas entre 140 a 180°C.
- Máxima temperatura recomendada para servicio o exposición continua: 65 a 90°C.
- Mínima temperatura recomendada para servicio o exposición continua: - 40°C.
- Baja resistencia a la abrasión.
- Fácil limpieza, pues solo se necesita un detergente doméstico y agua.

Por lo tanto, para el desarrollo del presente trabajo, la cámara de equilibrio tendrá las características que se muestran en la Figura 2.1 y que se detallan a continuación:

- MATERIAL: Acrílico.
- VOLUMEN INTERIOR: 500cc o 500ml.
- FORMA: Cilíndrica
- MEDIDAS: El volumen escogido es 500cc y se conoce que el volumen de un cilindro está dado por el producto entre el área de la base circular y su altura, como se muestra en la ecuación (2.4):

$$V = 2 * \pi * r^2 * h \quad (2.4)$$

Donde:

V= volumen interior de la cámara de equilibrio

$r$  = radio interior de la base de la cámara de equilibrio

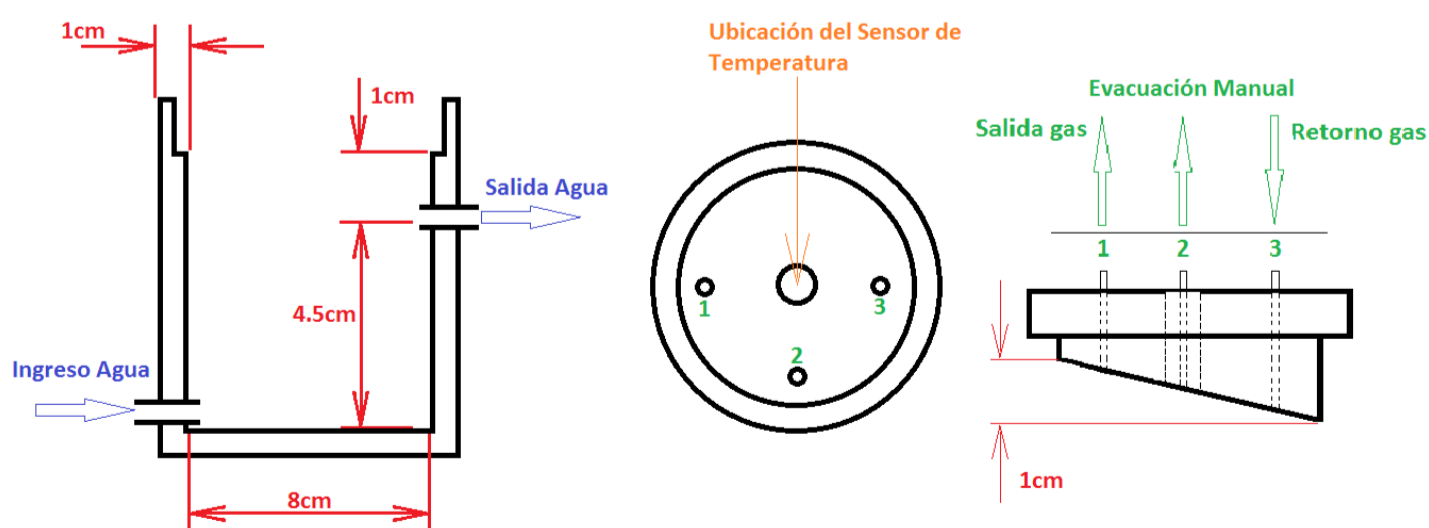
$h$  = altura interior de la cámara de equilibrio

Si se asume un área de la base del cilindro de  $100 \text{ cm}^2$ , se tiene que el radio de la base es  $3,98 \text{ cm} \approx 4 \text{ cm}$ .

Por lo tanto, para tener un volumen de  $500 \text{ cc}$  con una base de área de  $100 \text{ cm}^2$ , es necesaria una altura de  $h=5 \text{ cm}$ .

Dado que el acrílico es un buen aislante térmico, la cámara tendrá un espesor de pared de  $1 \text{ cm}$ , para evitar la pérdida de calor de la muestra de agua.

- En el cuerpo del cilindro que constituirá la cámara de equilibrio, se dispondrá de dos orificios, uno en la parte inferior para el ingreso del agua y otro en la parte superior a una altura de  $4.5 \text{ cm}$  para la evacuación del exceso de agua y para mantener el volumen de agua constante a  $450 \text{ ml}$ .
- La cámara de equilibrio dispondrá también de una tapa en la parte superior, en la cual existirán tres orificios, uno para la succión de la mezcla gaseosa hacia el sensor IR, otro para el retorno del gas succionado y un tercero para la evacuación manual del gas, en caso de ser necesario.
- En la tapa de la cámara de equilibrio también se dispondrá de un orificio para la colocación del sensor de temperatura.



**Figura 2.1.** Esquema de la cámara de equilibrio.

## 2.1.2 SENSOR DE CO<sub>2</sub>.

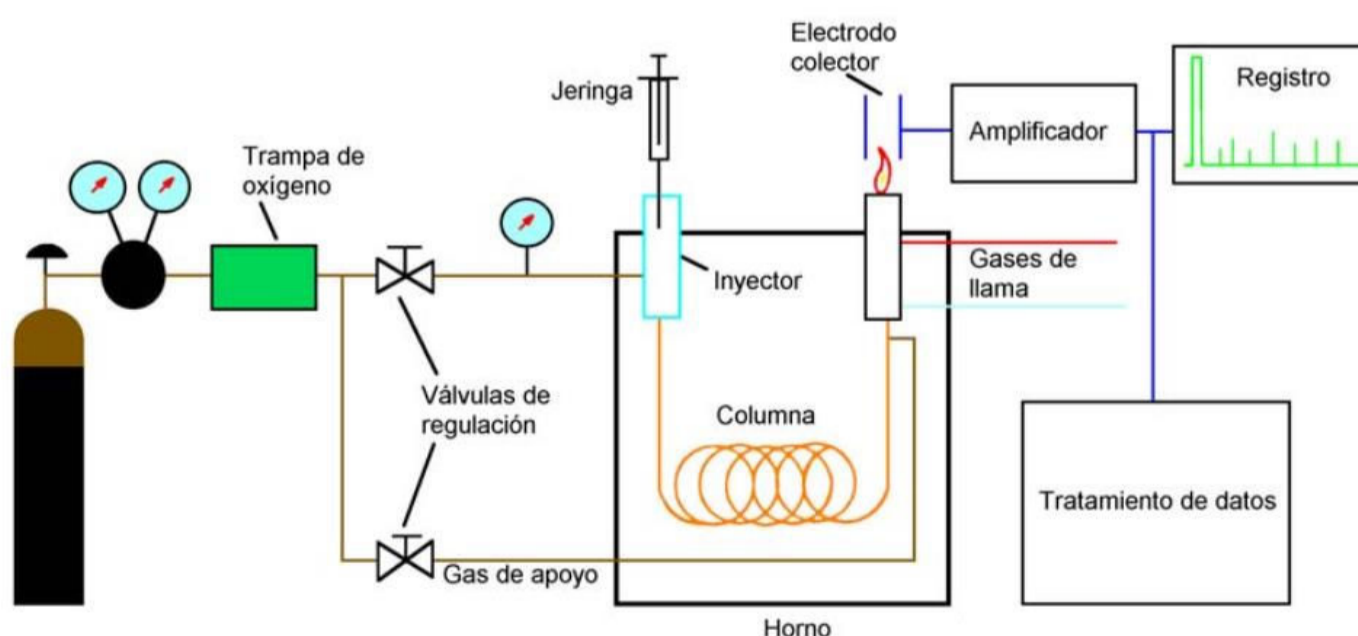
Una vez que se obtiene el CO<sub>2</sub> en fase gaseosa, corresponde hacer el análisis del gas para determinar su concentración; para ello se debe utilizar algún tipo de sensor o técnica de análisis de gases.

Por ejemplo, esto se puede hacer mediante sensores químicos que reaccionan con el CO<sub>2</sub> y donde el nivel de reacción indica la cantidad de gas presente en la mezcla, como fue descrito en el numeral 1.3.2.2.; pero dado que se busca un instrumento que sea automático y que pueda hacer mediciones repetitivas, es necesario analizar otras opciones.

### 2.1.2.1 Cromatografía de gases

Una de las opciones disponibles, es realizar cromatografía de gases, la cual proporciona el resultado más fiable acerca del valor de la concentración de CO<sub>2</sub> en la mezcla gaseosa. El esquema de un cromatógrafo se muestra en la Figura 2.2 y los elementos que lo componen son los que se listan a continuación [20]:

- Fuente de gas (en este caso sería la cámara de equilibrio).
- Sistema de inyección.
- Horno y columna cromatográfica.
- Sistema de detección.
- Sistema de registro.



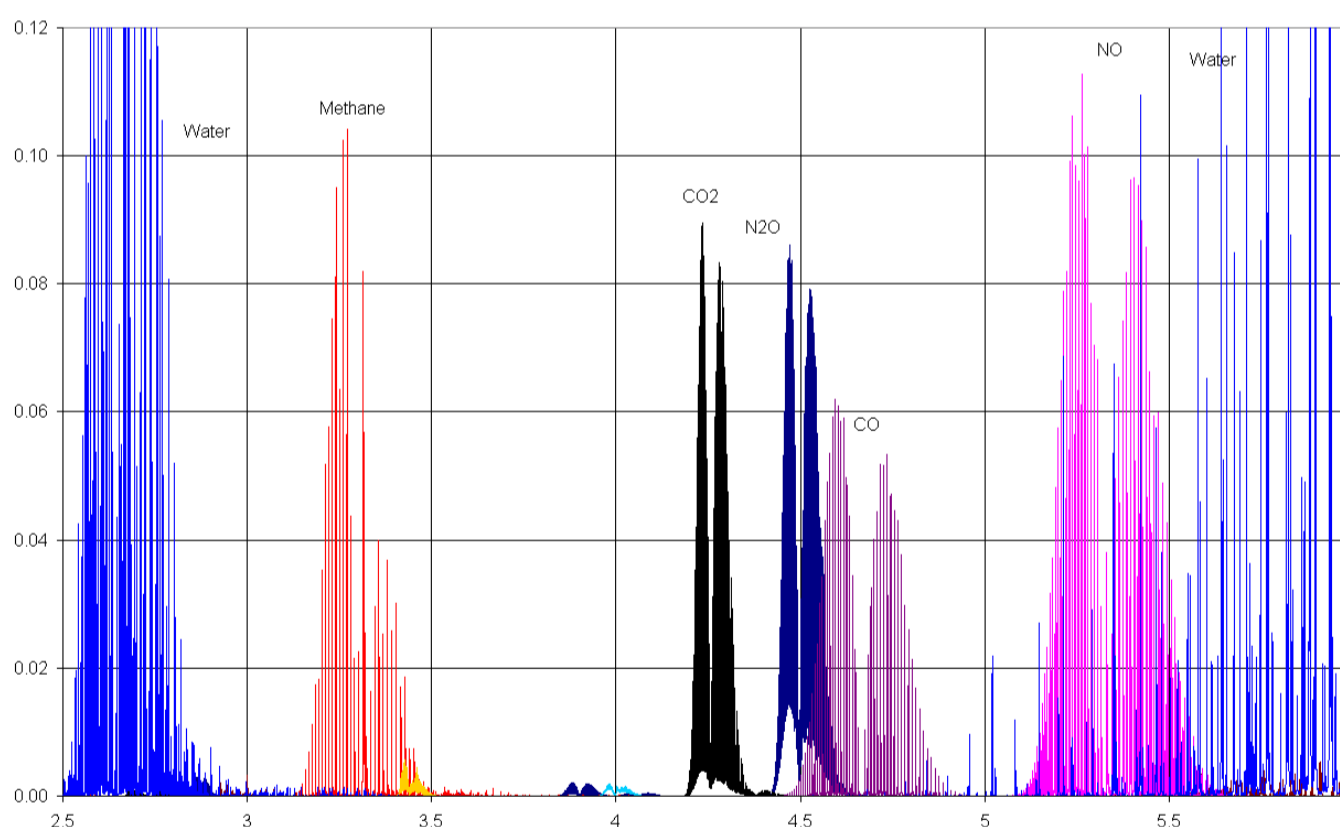
**Figura 2.2.** Esquema general de un cromatógrafo de gases tomado de [20].



Como se puede observar en la Figura 2.2, el cromatógrafo de gases es un equipo muy complejo, compuesto de elementos cuyas características (por ejemplo el horno), hacen necesario que su operación se la realice en un laboratorio, por tal motivo, no presenta una opción viable para los objetivos del presente trabajo.

### 2.1.2.2 Detección por absorción de IR

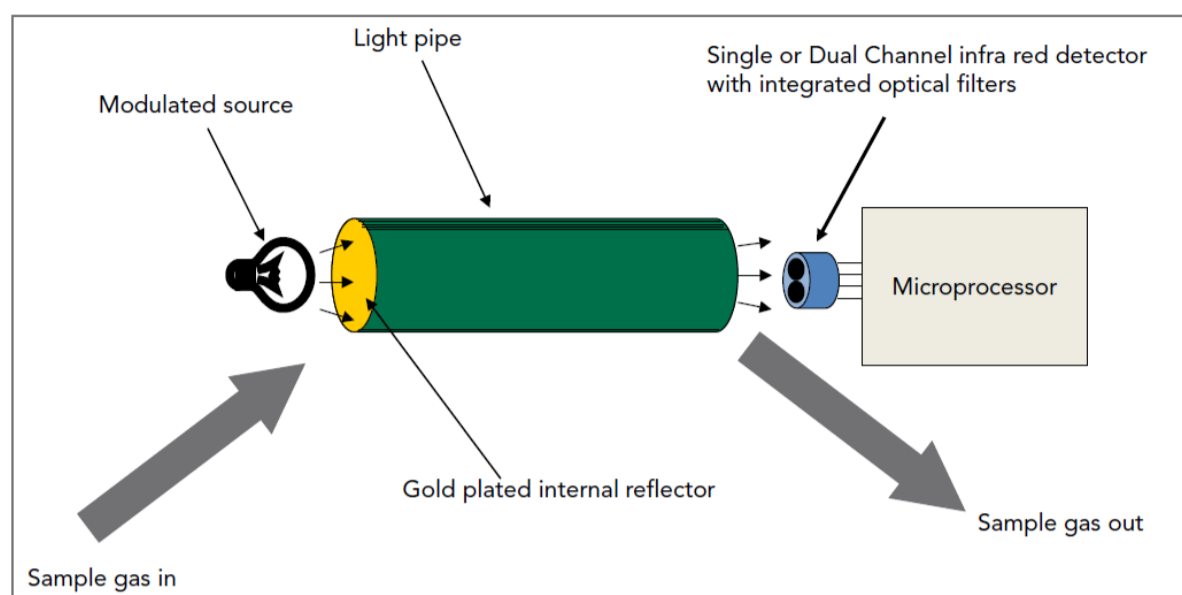
La técnica de detección por absorción de IR, es hoy en día una de las tecnologías más aplicadas para la detección y análisis de la concentración de gases que componen una mezcla, esto debido a que muchos gases tienen espectros de absorción característicos, con bandas estrechas que no se solapan en el espectro infrarrojo entre 2  $\mu\text{m}$  y 20  $\mu\text{m}$  como se muestra en la Figura 2.3 [21], [22]. Otra de las ventajas que poseen los sensores infrarrojos, es su robustez, es decir son estables, tienen un ciclo de vida extenso y debido a que el gas medido no interactúa en forma directa con el sensor, los sensores de IR soportan la humedad alta, el polvo, la suciedad y otras condiciones hostiles [22].



**Figura 2.3.** Bandas de absorción de gases comunes en una ventana de agua entre 3 a 5  $\mu\text{m}$  [21].

Los sensores de gas IR comerciales consisten generalmente en una fuente infrarroja, un detector, una cámara de gas y una trayectoria por donde circula el gas, un dispositivo de selección de longitud de onda y algunos componentes ópticos (lentes o más habitualmente espejos) para acoplar la radiación desde la fuente, a

través de la cámara de gas, hasta el detector [21], como se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Sensor de gas de detección infrarroja no dispersiva [21].

Cuando la muestra de la mezcla en fase gaseosa pasa a través de la cámara de gas, el detector mide la radiación en la longitud de onda de la banda de absorción del gas objetivo. Cuando el gas objetivo no está presente, no hay absorción, de modo que la señal que llega al detector es máxima. Cuando el gas objetivo está presente en la trayectoria, la señal detectada se reduce a medida que aumenta la concentración de gas objetivo [21].

### 2.1.2.3 Rango de medición del sensor IR

Un aspecto muy importante a tomar en cuenta en este trabajo, es el rango de medición que tendrá el sensor, ya que esto influirá en el costo del instrumento, así como de la cantidad de fuentes naturales de agua donde se pueda realizar la monitorización de la  $C_{CO_2}$ .

En el período comprendido entre el entre los meses de Enero y Marzo del año 2009 científicos del *Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia* de Italia, en conjunto con científicos del Instituto Geofísico y la Facultad de Geología de la Escuela Politécnica Nacional, realizaron un trabajo de caracterización geoquímica e isotópica de los fluidos volcánicos y geotérmicos que se originan en el arco volcánico ecuatoriano [23]. En el estudio antes mencionado se realizó el análisis de las fuentes de agua que se presentan en la Tabla 2.1 y se determinó la concentración en  $cm^3/L$  de los gases disueltos.

**Tabla 2.1.** Composición química de los gases disueltos. Los valores están expresados en  $\text{cm}^3$  por litro STP [23].

Nombre	T(°C)	He	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2
Cabaña Norte	58.9	1.92E-03	3.83E-02	5.30	23.14		8.38E-02	6.33
Fuente del Balneario	47.2	1.98E-03	7.48E-04	2.27	16.53	2.44E-05	1.61E-03	12.82
SPA baja	54.2	8.76E-04	0.00E+00	4.10	18.19	7.62E-05	3.04E-03	3.10
Jamanco	60.8	5.28E-04	2.53E-02	1.40	4.90	4.56E-04	1.82E-02	125.21
Río Papallacta	9.0			5.85	13.16		9.31E-05	1.04
Fuente El Tambo	57.8	5.95E-04	1.10E-03	0.02	3.32	1.43E-04	4.84E-03	194.17
El Pisque Balneario	37.0			0.04	7.80	3.67E-05	3.05E-03	285.22
La Calera de Tolontag	27.2	5.59E-04		0.05	6.41	1.48E-05	9.65E-03	83.01
Balneario La Merced	32.5	1.91E-03	5.11E-04	0.05	13.69		2.70E-03	92.65
Balneario Ilaló	37.7	1.93E-03		1.69	22.98	1.36E-04	6.08E-03	174.45
Balneario El Tingo	42.1		1.70E-03	0.62	21.95	2.75E-05	2.45E-02	95.59
Cachiyacu Campamento	60.1	3.11E-04		3.19	14.66		5.17E-04	119.95
Cachiyacu Cueva	40.5		2.93E-03	1.87	13.52		7.06E-03	256.91
Vertiente Río Lisco	29.9	3.34E-04		0.02	6.34	2.75E-05	1.85E-02	359.97
Palmira	25.2	1.44E-04	2.59E-03	0.11	6.96		3.13E-03	222.10
Pululahua	25.4	2.36E-04	0.00E+00	0.07	2.96		3.31E-01	564.61
Nono	27.9	1.74E-04	0.00E+00	0.02	3.34		6.74E-02	582.19
Tesalia	16.8	1.81E-04	0.00E+00	0.15	8.75		2.50E-04	476.45
Santa Ana	42.1	2.17E-04	5.90E-03	0.06	5.88		3.12E-04	226.05
El Salado	45.6		1.42E-02	0.64	5.78		1.77E-04	336.40
Cununyacu	47.0	3.31E-04	1.38E-03	0.02	10.33		2.80E-02	0.56
Guayllabamba	37.6		2.45E-02	0.04	4.61		6.91E-02	283.27
Los Elenes	20.1	1.25E-04	2.70E-03	0.45	13.37		8.62E-04	14.95
Guapán	46.9	1.48E-04	2.70E-01	0.04	4.56		4.85E-03	272.10
El Riñón	74.5	1.88E-04	3.06E-01	0.77	5.12		1.07E-02	104.26
Portovelo	52.4	3.81E-04	1.36E-01	0.04	10.38		1.80E-02	0.89
Jesús María	42.6	5.43E-04	5.18E-03	0.02	16.57		2.10E-02	0.67
S. Vicente	37.9		3.75E-02	0.06	8.69		9.52E-04	1.24
Chachimbiro	51.2	1.90E-04	7.96E-01	0.06	6.48		2.66E-03	37.92
El Salitre	14.5		0.00E+00	0.07	7.18		2.52E-02	39.00
Hummocks	10.7	1.40E-04	0.00E+00	3.73	10.68		1.30E-04	113.96
Aguas Calientes	21.4		2.49E-03	0.06	3.71		1.56E-03	455.40

Como se puede observar en la Tabla 2.1, solo en 6 fuentes, que representan el 18.75% del total de muestras, el nivel de la concentración sobrepasa los  $300[\text{cc}/\text{L}]$ ,

lo que equivale al 30% del volumen de la disolución. El punto antes mencionado da la idea que, el rango máximo del sensor debe estar cerca de este valor.

En el mercado existen varias empresas que fabrican y comercializan este tipo de sensores, pero los rangos de medida más comunes para CO<sub>2</sub> que se puede encontrar son:

**Tabla 2.2.** Rangos de medición más comunes para los sensores IR de CO<sub>2</sub> comerciales [21], [22].

GAS	RANGO DE MEDICION	
	Bajas concentraciones	Altas concentraciones
CO <sub>2</sub>	0 – 2000 ppm	0 - 1%
	0 – 3000 ppm	0 - 2%
	0 – 5000 ppm	0 - 3%
	0 – 7000 ppm	0 - 5%
	0 – 10000 ppm	0 - 10%
	-	0 - 20%
	-	0 - 30%
	-	0 - 100%

Teniendo en cuenta la cantidad de CO<sub>2</sub> que puede originarse por la actividad volcánica, la cual entraría en la categoría de altas concentraciones, que los costos del sensor dependen de su rango de medición, y la información disponible en la Tabla 2.1, hay dos opciones disponibles:

- La primera: se puede adquirir un sensor con un rango de medición de 0 a 100%, cuya capacidad talvez nunca se llegue a utilizar en su totalidad y que puede implicar un costo mayor en el desarrollo del instrumento.
- Y la segunda: se puede adquirir un sensor con un rango de medición de 0 - 30% que permitirá realizar las mediciones de la concentración de CO<sub>2</sub> en la mayoría de fuentes naturales de agua, donde es importante realizar la monitorización de este parámetro.

Para el presente trabajo se escoge la segunda opción, un espectrómetro con sensor infrarrojo, con rango de medición de 0 a 30% de la marca Edinburgh Sensors,

modelo GASCARD NG, cuyas especificaciones son las que se muestran en la Tabla 2.3, [24].

**Tabla 2.3.** Especificaciones del espectrómetro infrarrojo GASCARD NG [24].

Modelo	CO <sub>2</sub>
GasCard NG	0-30%
Accuracy	±2% of range ±<0.015% of range per mbar
Zero stability	±2% of range (over 12 months)
Response time	T <sub>90</sub> = 10 seconds or programmable RC
Operating temperature	0-45°C
Operating pressure	800 – 1150mbar
Power requirements	24 V DC (7V-30V)
Warm-up time	1 minute (initial) 30 minutes (full specification)
Humidity	Measurements are unaffected by 0-95% relative humidity, non-condensing
Output	Linear 4-20 mA, 0-20 mA (bit switch selectable) maximum load dependant on supply voltage

### 2.1.3 SENSOR DE TEMPERATURA

Una vez más, si se toma la información de la Tabla 2.1, es posible observar que la temperatura en las fuentes varía desde los 9.0°C en el río Papallacta hasta los 74.5°C en la fuente El Riñón. Por lo tanto, los sensores de temperatura deberán tener un rango de medición que vaya, al menos desde los 0°C hasta los 100°C; además como la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> se ve afectada por la temperatura, el error del sensor no debería ser mayor al 1% (1°C si el valor máximo es 100°C), para evitar que se produzcan errores significativos en los cálculos que se hacen posteriormente, con los datos obtenidos en este trabajo.

En lo referente a los sensores de temperatura, dos de los principales tipos de sensores que existen son los termopares y los RTD (*resistance temperature detector*), cuya comparación se presenta en la Tabla 2.4, [25], [26].

**Tabla 2.4.** Comparación de las características técnicas entre un sensor RTD y un termopar [25], [26].

Parámetro	RTD	Termopar
Rango de temperatura	-260 a 900°C	-200 a 1800°C
Precisión	Más preciso	
Linealidad	Casi lineal	No lineal
Velocidad de respuesta	Lenta (sin termopozo)	Rápida
Unión de referencia	NA	Necesario
Corrección por auto calentamiento	Necesaria	NA
Estabilidad para largos períodos de medición	Muy Buena	Poco satisfactoria
Fuente de alimentación	Requiere	No requiere
Captación de EMI	Menos susceptible	Muy susceptible

Considerando que durante la medición de la concentración de CO<sub>2</sub>, no van a existir variaciones bruscas de temperatura en la fuente de agua, que se necesita que la medición de temperatura sea lo más exacta posible y que de acuerdo a la información presentada en la Tabla 2.1, la temperatura máxima medida en las fuentes de agua fue de 74.5°C, el sensor de temperatura seleccionado es un RTD.

#### 2.1.4 BOMBA PARA LA CIRCULACIÓN DEL AGUA

Para poder realizar la medición de la  $C_{CO_2}$  en las fuentes de agua, es necesario transportar la muestra de agua desde la fuente hasta la cámara de equilibrio, y como uno de los objetivos es lograr un sistema sea automático, se hace indispensable disponer de una bomba que permita realizar esta acción. La bomba debe ser de bajo consumo, pero a la vez debe tener la potencia suficiente para bombear el agua desde la fuente hasta la cámara de equilibrio.

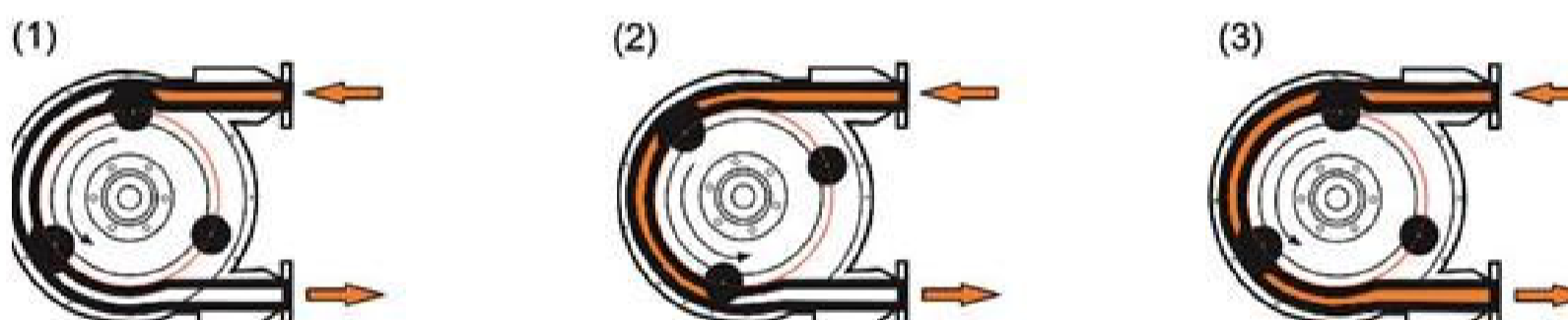
La bomba a utilizar también debe tener la capacidad de llenar y cambiar todo el volumen de agua de la cámara de equilibrio, en un período de tiempo no demasiado largo, ya que esto implica que el tiempo necesario para llegar al equilibrio entre la concentración del gas en la fase acuosa y la concentración del gas en la fase gaseosa sea más largo. Un mayor tiempo hasta llegar al equilibrio, conlleva un mayor consumo de energía y dado que el sistema busca ser autónomo, un mayor consumo de energía, afectaría negativamente su tiempo de autonomía. La bomba

también deberá tener un peso muy bajo, ya que va a formar parte de un instrumento que necesita ser fácilmente portable.

Otro punto muy importante a tomar en cuenta en la selección de la bomba para tomar las muestras de agua, es el problema que se menciona en el numeral 1.4.3, donde se alerta sobre la presencia de sales en el agua. Entonces, si se elige una bomba donde sus partes mecánicas móviles están en contacto directo con el agua de la fuente, las sales empezarán a acumularse en ellas y en un momento dado harán que las partes mecánicas se desgasten o en el peor de los casos impedirán su movimiento, provocando graves daños en la misma.

Tomando en cuenta todos los aspectos anteriores, existe un tipo de bomba que evita la mayoría de estos problemas, esta es la Bomba Peristáltica.

Una bomba peristáltica es una bomba hidráulica que usa el principio de la peristalsis [27] para desplazar un fluido dentro de un tubo flexible que esta empotrado dentro de cubierta circular de la bomba.



**Figura 2.5.** Diagrama de funcionamiento de una bomba peristáltica [28].

Durante el funcionamiento de la bomba peristáltica, la contracción de los músculos propia de la peristalsis es simulada por unos rodillos que presionan el tubo flexible, los rodillos están montados sobre un rotor, que al girar desplaza los rodillos y estos a su vez siguen comprimiendo el tubo en su longitud, obligando a moverse al fluido que queremos bombear, tal como se muestra en la Figura 2.5.

Dado que, en una bomba peristáltica el fluido se mueve dentro del tubo flexible, este nunca entra en contacto con las partes móviles de la bomba, lo cual la hace ideal para aplicaciones médicas, de investigación, industriales, etc. En este caso, por una parte se evitará que las sales presentes en el agua se acumulen en las partes móviles de la bomba y produzcan daños, y por otra, talvez la más importante,

evitará que durante el transporte de la muestra de agua se produzcan fugas de agua o gas que puedan alterar la medición que se desea realizar.

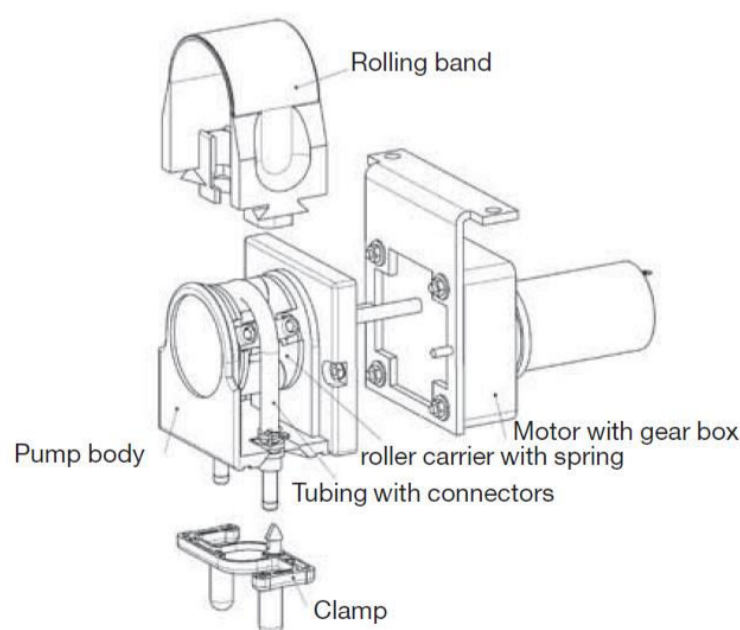
Considerando todos los aspectos antes mencionados y revisando la oferta disponible en el mercado, se decide utilizar la bomba peristáltica THOMAS SR25 cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 2.5, [29].

**Tabla 2.5.** Características técnicas de la bomba peristáltica THOMAS SR25 [29].

Parámetro	Valor
Max. suction height	8m H <sub>2</sub> O
Max. pressure height	10 m H <sub>2</sub> O
Max. ambient temperature	40 °C
Media temperature	50 °C (short time 90 °C)
Velocidad nominal	170 rpm
Flujo	287 ml/min
Voltaje	12 Vdc
Consumo de Potencia	7 W
Peso	0,6 kg

Como se puede observar en la tabla anterior, la bomba puede proporcionar un caudal de hasta 287 ml/min, lo que permitirá cambiar el volumen total de la cámara de equilibrio en 1,57 minutos, además que tiene un peso de 0,6 Kg.

En la Figura 2.6 se presenta el diagrama de partes de la bomba peristáltica THOMAS.



**Figura 2.6.** Diagrama de partes de la bomba peristáltica THOMAS SR25 [29].



### 2.1.5 BOMBA PARA LA SUCCIÓN DE GAS

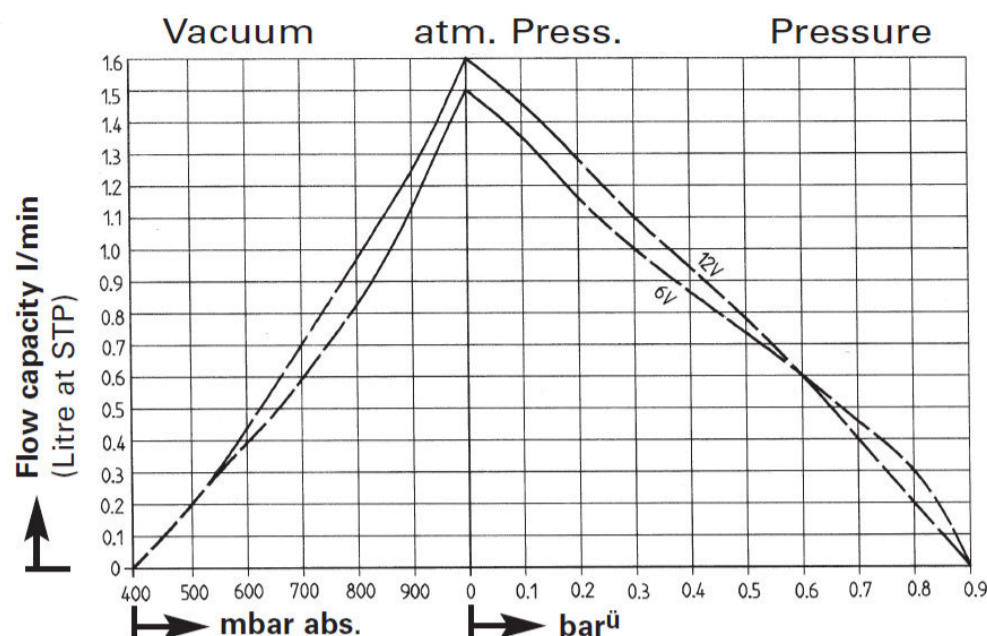
Si, se toman en consideración las especificaciones de operación del sensor IR para detectar CO<sub>2</sub>, presentados en la Tabla 2.3, se conoce que la máxima presión para su correcto funcionamiento es 1150 mbar, y que el volumen de la parte de la cámara de equilibrio que contendrá la fase gaseosa de la disolución es 50ml, entonces es necesaria una bomba para gas que permita trasladar un volumen de mezcla gaseosa de 50 ml a una presión no mayor a 1150 mbar y que funcione a un nivel de voltaje similar al de los otros elementos.

Analizando la información disponible en el mercado, en trabajos de investigación previos y de otros instrumentos que el IG-EPN dispone, se toma como opción para el desarrollo del presente trabajo la micro-bomba de diafragma para muestreo de gases NPM015M producida por la empresa KNF de Alemania, la cual se especializa en la fabricación de todo tipo de bombas para instrumentos de laboratorio, la industria y aplicaciones específicas; como en este caso, el análisis y monitorización de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Las características de la bomba se detallan en la Tabla 2.6 y en la Figura 2.7 se muestra la curva de repuesta del flujo en función de la presión con tensiones de alimentación de 6 y 12 voltios. [30].

**Tabla 2.6.** Características técnicas de la micro-bomba de diafragma para muestreo de gases NPM015M [30].

Tipo	Flujo (l/min)	Vacío (mbar absolute)	Presión (bar g)	Peso (g)	Alimentación (V)
NMP 015 M (dc motor with iron-free rotor)	1,6	400	0,9	65.0	12



**Figura 2.7.** Flujo vs Presión de la micro-bomba de diafragma NMP015M para 6V y 12 V [30].

De acuerdo a las características técnicas de la Tabla 2.6, es posible observar que el rango de presión de operación de la bomba para gas, está dentro de los límites de la presión de operación del espectrómetro infrarrojo y el voltaje de operación es igual al de los otros elementos del instrumento. El flujo de la bomba permite trasladar el volumen total de la mezcla gaseosa (50ml) en 3 segundos y su peso es de apenas 60 gramos, lo cual la hace ideal para un instrumento portable.

### 2.1.6 ELECTRO VÁLVULA

Una vez que se dispone de una cámara de equilibrio, que será llenada con la muestra de agua en la cual se quiere determinar la  $C_{CO_2}$ , el espectrómetro infrarrojo, que entregará una señal eléctrica de corriente, que será proporcional a la  $C_{CO_2}$  en la disolución, la bomba para llevar el agua hacia la cámara de equilibrio y la bomba para llevar la mezcla gaseosa hacia el espectrómetro infrarrojo, en el instrumento también es necesario disponer de una electroválvula que permita tomar una referencia del aire de la atmósfera al inicio cada medición y al finalizar permita llenar nuevamente el sistema con aire de la atmósfera.

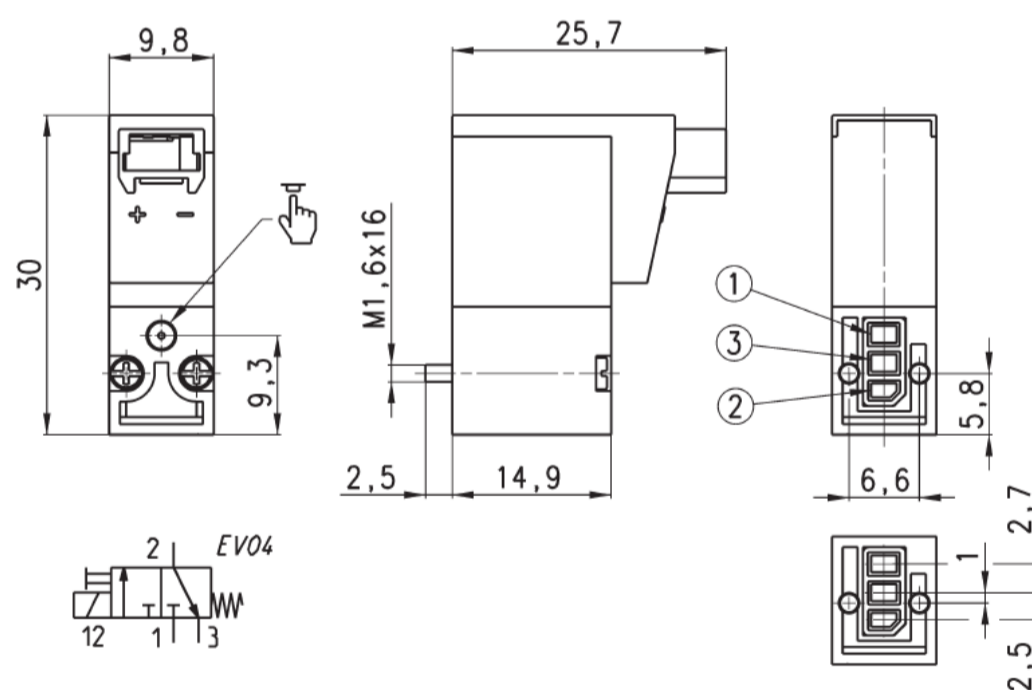
La elección en este caso es más simple, ya que se conoce todos los parámetros de operación de los otros elementos que integran el sistema, como son: flujo, presión y voltaje. Por lo tanto las características de la electroválvula deben ser compatibles con las características de los demás componentes.

Teniendo en cuenta el análisis anterior la electroválvula que se seleccionó como elemento del instrumento que se implementa en este trabajo, es la electroválvula

K000-303-K22, que es fabricada por la empresa CAMOZZI de Italia. Las especificaciones de esta electroválvula se muestran en la Tabla 2.7 y su esquema en la Figura 2.8 [31].

**Tabla 2.7.** Características técnicas de la electroválvula K000-303-K22 [31].

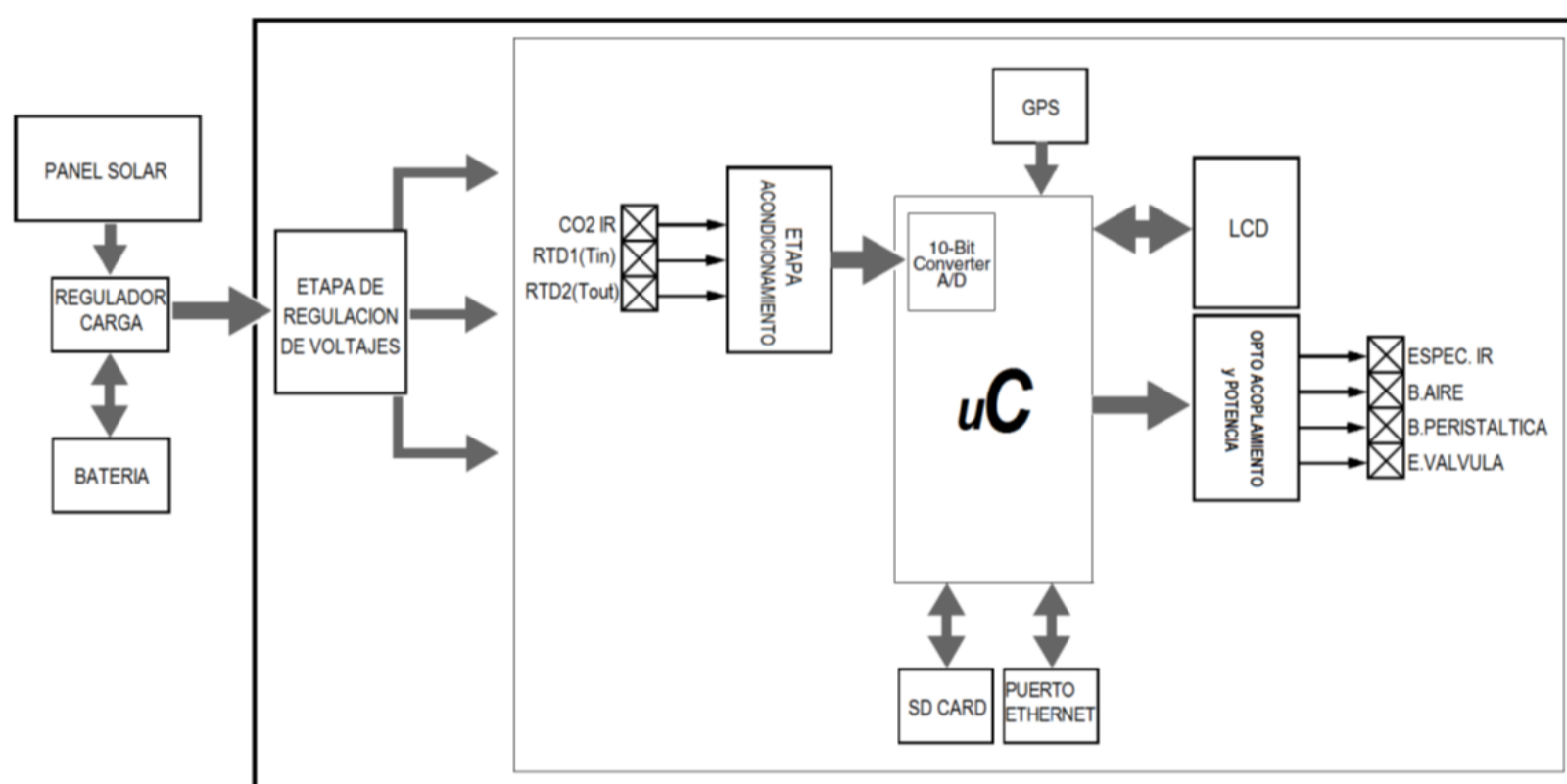
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Funciones válvula	3/2 vías NC
Construcción	de obturador
Sujeción	mediante tornillos
Instalación	en cualquier posición
Temperatura de trabajo	0 ÷ 50°C
Presión de trabajo	0 ÷ 7 bar
Caudal nominal (6 bar $\Delta P$ 1 bar)	Qn 10 NI/min
Tensión	12V DC
Consumo	0.9 W
Tolerancia tensión	$\pm 10\%$
Servicio continuo	ED 100%



**Figura 2.8.** Esquema de la electroválvula K000-303-K22 [31].

## 2.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO DE CONTROL DEL SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>

En el numeral anterior, se determinó los principales elementos electrónicos y electromecánicos que conformarán el instrumento. En este numeral se diseñará e implementará el hardware que permita lograr su correcta operación, de acuerdo a los objetivos a los que se quiere llegar en este trabajo. En la Figura 2.9 se presenta un diagrama de bloques de cómo estará constituido el sistema de control.



**Figura 2.9.** Esquema general del circuito de control del sistema automático para la medición de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Cabe señalar, que si bien, el sistema de energía fotovoltaica se incluye en el esquema de la Figura 2.9, su diseño no se presentará en este documento, debido a que los parámetros que determinan la capacidad del panel solar y la batería, como son: días de autonomía requeridos para el sistema, el nivel de radiación solar y la cantidad de horas de luz disponibles en la ubicación de la fuente donde se quiera realizar las mediciones, aún no han sido determinadas y no son parte de los objetivos de este trabajo.

### 2.2.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y ETAPA DE REGULACIÓN

La etapa de la fuente de alimentación y regulación tiene la función de proporcionar la corriente y los voltajes de operación necesarios para el funcionamiento de circuito de control y todos los componentes del sistema. Para determinar sus especificaciones, se debe conocer cuáles son los voltajes y corrientes de operación de todos los elementos del circuito de control y del sistema. En la Tabla 2.8 se lista los elementos con sus respectivos voltajes y corrientes de operación, a excepción de los reguladores de voltaje y los transistores mosfet, los cuales tienen potencia de disipación, la misma que es proporcional a la corriente de carga que circule a través de ellos.

**Tabla 2.8.** Principales componentes del sistema con sus respectivos voltajes y corrientes de operación [21], [29]-[31], [37]-[40], [32]-[36].

COMPONENTE	I MAX(mA)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)
Microcontrolador PIC18F4550 [32]	250	5	1,25
LCD DISPLAY J204A [33]	80	5	0,4
Puente serial-ethernet Nano LANReach [34]	130	3.3	0,43
Micro SD CARD [35]	100	3.3	0,33
GPS GARMIN 18xLVC [36]	90	5	0,450
GAS CARD NG [21]	490	12	6
	245	24	
Bomba Peristáltica [29]	585	12	7
Bomba de Aire [30]	110	12	1,3
Electroválvula [31]	75	12	0,9
		0-30	
2 OP-AMP LM224 [37]	120(2*60)	-16 a 16	
NAND HCF40107E [38]	40	12	0,48
Driver RS232 [39]	60	5	0,3
4 OPTO ACOPLADOR PC817 [40]	200(4*50)	5	0,25
4 Diodo LED	140(4*35)	3,6	0,125

### 2.2.1.1 Niveles de voltaje de operación

Dado que, el sistema que se desarrolla en el presente trabajo, debe integrarse a la red de monitorización del IG-EPN, el voltaje de operación principal será  $12V_{dc}$  y a partir de este, se utilizarán circuitos reguladores para obtener niveles de voltaje de 3.3 y 5 voltios, que el sistema necesita.

De la Tabla 2.8 se tiene que, los principales voltajes de operación que la fuente deberá entregar son 3.3, 5 y  $12 V_{dc}$ , con una corriente máxima de 2.15 amperios. También es posible observar que los elementos que necesitan 3.3 y 5 voltios tienen un consumo total de corriente de 1.17 amperios; por lo tanto el regulador de voltaje debería entregar ese valor de corriente.

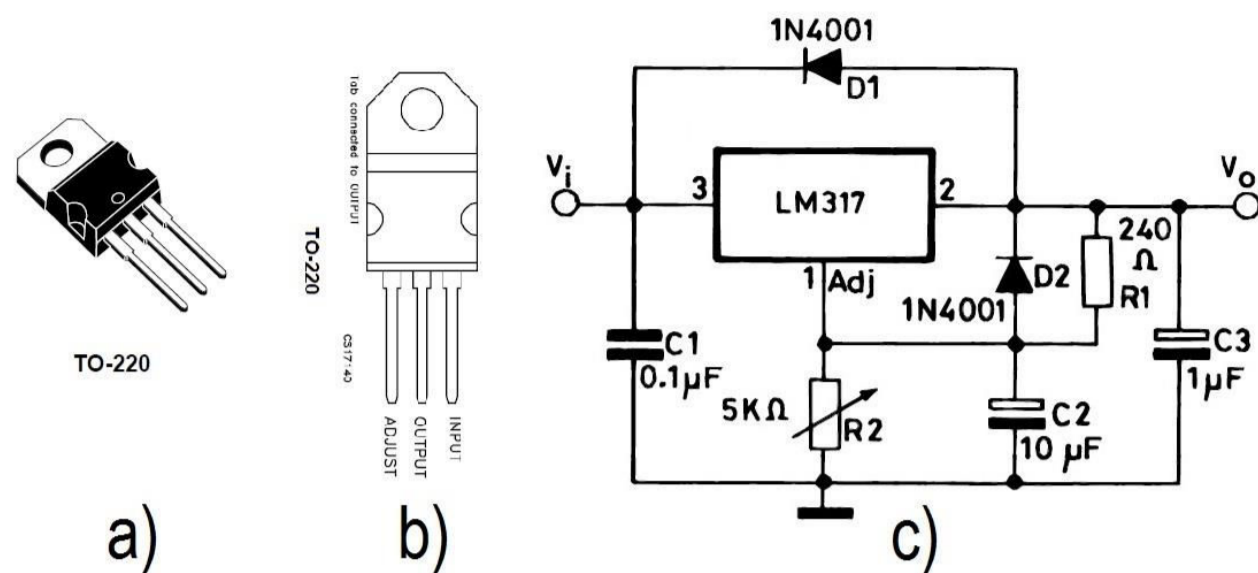
### 2.2.1.2 Regulación a 5 voltios

En el mercado está disponible el regulador de voltaje LM7805, el cual proporcionará los 5 voltios que se requieren, pero la desventaja que existe con este regulador, se debe a que la mayoría de sus versiones solo proporcionan una corriente máxima de 1A, [41], por lo tanto sería necesario utilizar 2 reguladores de este tipo para satisfacer la corriente de 1.17 amperios que requiere el instrumento.

La segunda opción es utilizar el regulador ajustable LM317T [42], cuyas características eléctricas y circuito de operación se presentan en la Tabla 2.9 y la Figura 2.10 respectivamente.

**Tabla 2.9.** Características eléctricas del regulador de voltaje LM317 [42].

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Rango de voltaje de salida	1.2 a 37	V
Corriente máxima de salida	1.5	A
Regulación de la línea y carga	1	%



**Figura 2.10.** Regulador de voltaje LM317T: a) Apariencia física, b) Distribución de pines, c) Circuito para su correcto funcionamiento [42].

De las especificaciones del fabricante se conoce que, el valor de voltaje de salida está dado por:

$$V_o = V_{ref} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} * R_2 \quad (2.5)$$

$$V_{ref} = 1,25[V] \quad (2.6)$$

Pero debido a que estos dispositivos son diseñados para minimizar la  $I_{ADJ}$  y mantenerla constante sin importar los cambios en la línea y en la carga, el error producido por el término  $I_{ADJ} * R_2$ , puede ser despreciado [42], entonces:

$$V_o = V_{ref} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.7)$$

Si  $R_1 = 240[\Omega]$  se puede determinar el valor de  $R_2$  para obtener un  $V_o = 5[V]$ :

$$5[V] = 1,25[V] \left( 1 + \frac{R_2}{240[\Omega]} \right) \quad (2.8)$$

$$R_2 = 720[\Omega] \quad (2.9)$$

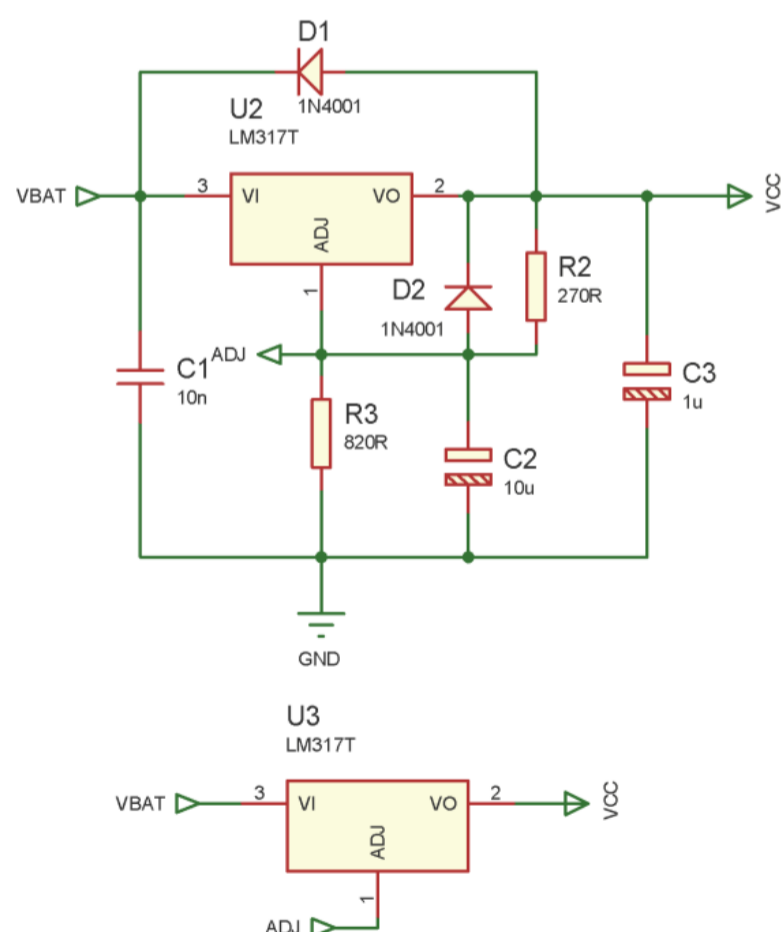
Como se observa el valor de la  $R_2$ , no es un valor comercial, por lo tanto se tiene dos opciones, tomar el valor inferior donde  $R_2 = 680[\Omega]$  o un valor superior donde  $R_2 = 820[\Omega]$ , entonces:

$$V_o = 1,25[V] \left( 1 + \frac{680[\Omega]}{240[\Omega]} \right) = 4,792[V] \quad (2.10)$$

$$V_o = 1,25[V] \left( 1 + \frac{820[\Omega]}{240[\Omega]} \right) = 5,521[V] \quad (2.11)$$

Luego de calcular el valor del voltaje de salida, con los dos valores de resistencia se tiene que, para el valor inferior existe un error del 4.16%(0.208[V]) y para el valor superior un error del 10.42%(0.521[V]). Si se tiene en cuenta que, los valores de  $V_o$  calculados anteriormente se obtuvieron sin tomar en consideración la corriente de carga, que durante la operación del instrumento se van a producir caídas de tensión en los elementos del circuito y que muchos circuitos integrados pueden operar con un voltaje de alimentación  $\pm 10\%$ , se opta por el valor de  $R_2 = 820[\Omega]$ .

Para evitar que el regulador funcione cerca de su límite máximo de corriente, se utilizan dos reguladores LM317 en paralelo, tal como se muestra en la Figura 2.11.



**Figura 2.11.** Reguladores de voltaje LM317T en paralelo.

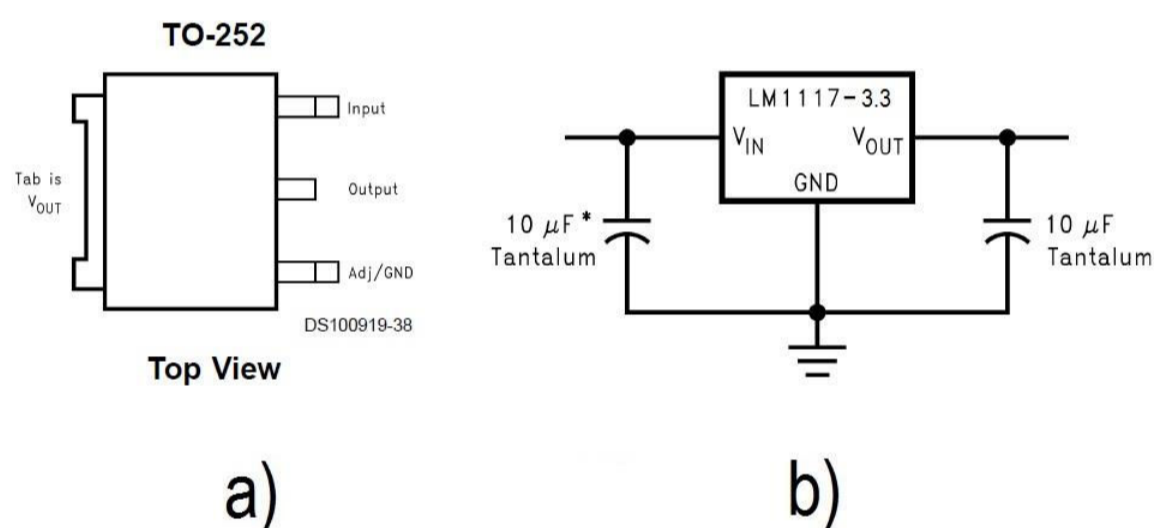


### 2.2.1.3 Regulación a 3.3 voltios

Tomando en consideración criterios similares a los que se exponen en el numeral anterior, para la etapa de regulación a 3.3 voltios se elige el regulador LM1117 [43], cuyas características, representación física y esquemática se presentan en la Tabla 2.10 y Figura 2.12 respectivamente.

**Tabla 2.10.** Características eléctricas del regulador de voltaje LM1117-3.3 [43].

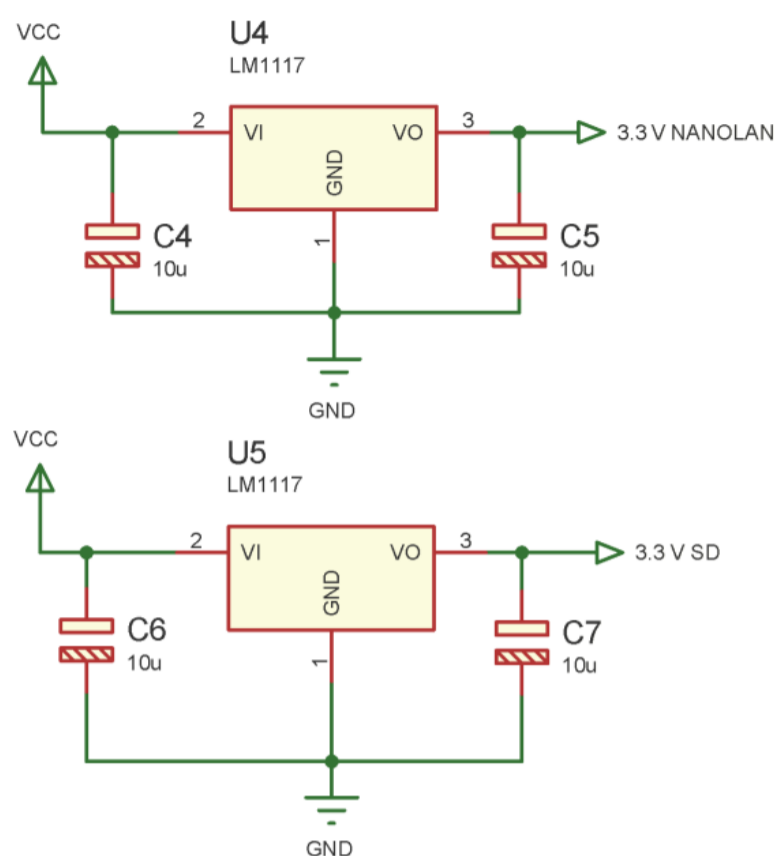
PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Voltaje de salida	3.3	V
Corriente de salida ( $4.75V \leq V_{IN} < 15V$ )	0 a 800	mA
Regulación de la línea y carga	6	mV



**Figura 2.12.** Regulador de voltaje LM1117-3.3: a) Apariencia física y distribución de pines, b) Circuito esquemático [43].

Para evitar el sobrecalentamiento del regulador debido a un  $V_{in}$  demasiado alto, la línea de entrada a regular se toma desde la línea de  $V_o$  de la etapa de regulación a 5[V].

Para este caso, se dispone de dos reguladores LM1117-3.3 como se muestra en la Figura 2.13, esto se debe a que existen dos elementos críticos que funcionan a este nivel de voltaje, uno de ellos es la memoria SD y el otro es el puerto Ethernet por el que se enviarán los datos. Por lo tanto, si se utiliza un solo regulador a 3.3 voltios y se presenta una falla en el mismo, se perdería el almacenamiento de los datos, así como su transmisión.



**Figura 2.13.** Reguladores de voltaje LM1117-3.3 para la memoria SD y para el puente Ethernet NANOLAN.

### 2.3 MICROCONTROLADOR PIC18F4550

Como núcleo del sistema automático desarrollado en el presente trabajo se utiliza el micro-controlador PIC18F4550, por dos razones principales:

La primera, este controlador está disponible en el stock de elementos electrónicos del IG-EPN y la segunda, este micro-controlador posee una memoria más amplia para el desarrollo de aplicaciones complejas, en comparación con otros modelos similares.

En la Tabla 2.11 se presentan las principales características del PIC18F4550 y en la Figura 2.14 se muestra su distribución de pines.

**Tabla 2.11.** Características micro-controlador PIC18F4550 [32].

PIC18F4550	MEMORIA PROGRAMA (BYTES)	MEMORIA DATOS (BYTES)		CANALES A/D (10BITS)	MSSP		EUSART	TIMERS 8/16 BITS
	32Kb	SRAM	EEPROM	13	SPI	I2C	1	1/3
		2048	256		SI	SI		

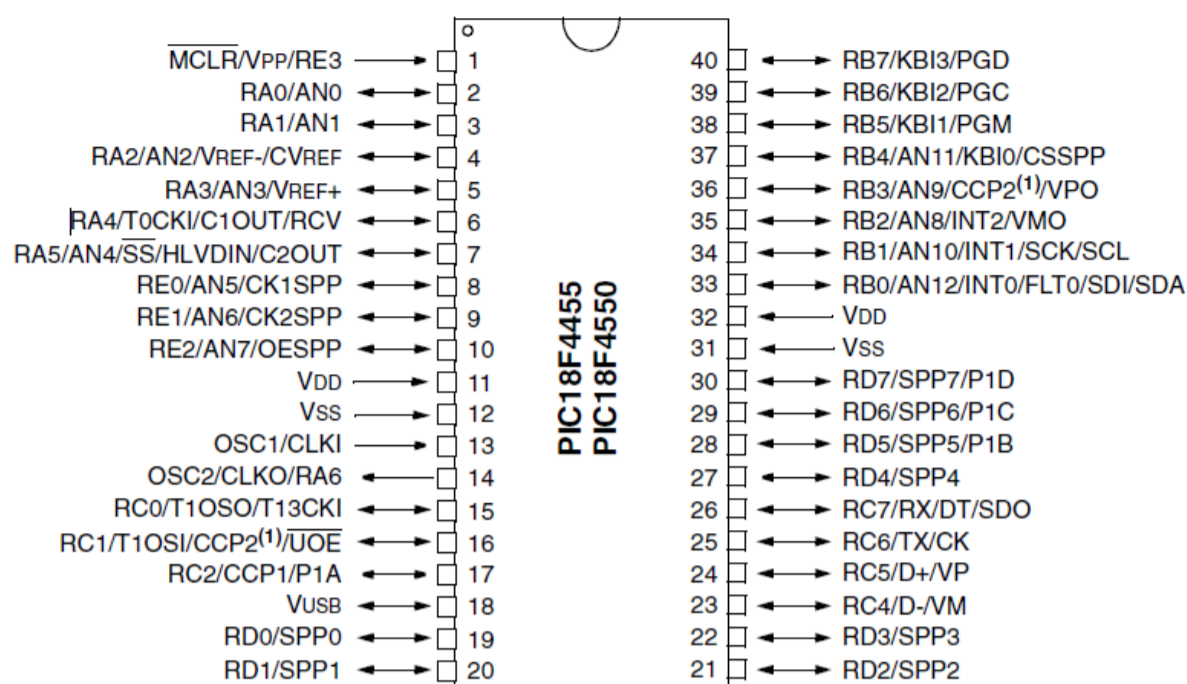


Figura 2.14. Diagramas de pines del micro-controlador PIC18F4550 [32].

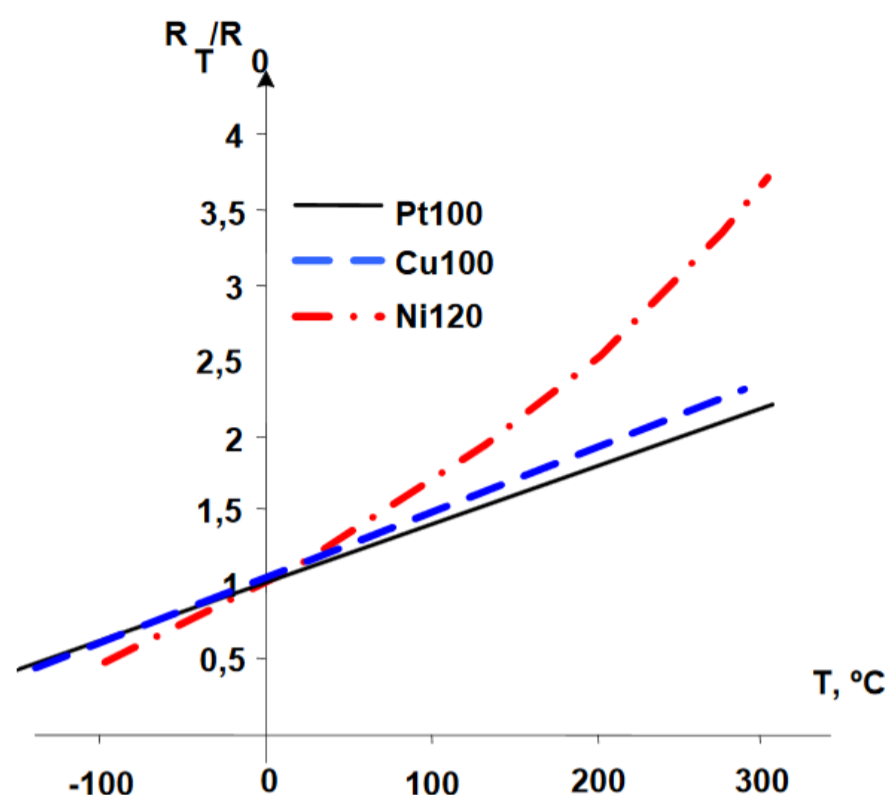
## 2.4 ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

### 2.4.1 SENSORES DE TEMPERATURA RTD

Como fue mencionado en el numeral 1.4.5, el sensor de temperatura que va a ser utilizado es un sensor tipo RTD (*Resistance Temperature Detector*), este tipo de sensores varían su resistencia eléctrica en respuesta a un cambio de la temperatura, que es la variable que se quiere medir.

#### 2.4.1.1 Ecuación matemática y curvas de respuesta de un RTD

Los RTD más comunes que existen, son fabricados en Platino, Niquel, Wolfranio y Cobre, de los cuales para la presente aplicación se utilizará el PT100 de platino. Si bien este tipo de RTD tiene la peor sensibilidad de todos los anteriores, como se observa en la Figura 2.15 [25], esta característica no implica un mayor problema ya que en las fuentes naturales de agua no se tiene cambios bruscos de temperatura, además es el que tiene mayor linealidad, un parámetro muy importante cuando se realiza el acondicionamiento de señales.



**Figura 2.15.** Curvas de calibración normalizadas para los RTDs Pt100, Cu100 y Ni120 [25].

La ecuación matemática [25] que se ajusta a la curva de calibración de un RTD mostrada en la Figura 2.15, es:

$$R_T = R_o \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \cdot \Delta T^3 + \dots) \quad (2.12)$$

Donde:

$R_o$  = Resistencia del RTD a  $T_o = 0^\circ\text{C}$ .

$\Delta T$  = La variación de temperatura ( $T - T_o$ ).

$\alpha, \beta, \gamma$  = Coeficientes del modelo para los términos lineal, cuadrático, cúbico, etc.

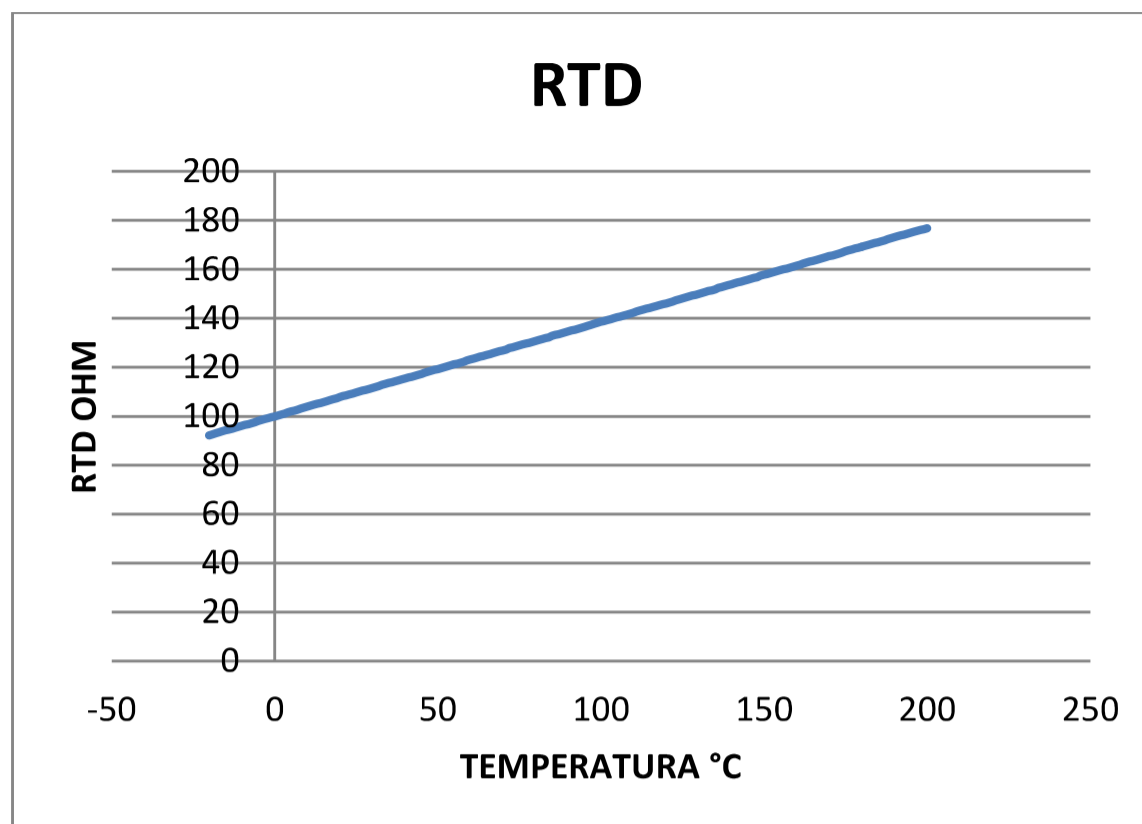
Como los términos  $\beta$  y  $\gamma$ , normalmente tienen valores muy pequeños [25], y además para un rango de temperaturas bajas, comprendido entre  $-200^\circ\text{C}$  y  $400^\circ\text{C}$  la respuesta de un RT de platino es lineal, la ecuación matemática puede reducirse a:

$$R_T = R_o \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (2.13)$$

Donde:

$$\alpha = 0,00385 \left[ \frac{\Omega}{\Omega \cdot ^\circ\text{C}} \right] \quad (2.14)$$

Por tanto la curva de respuesta para un Pt100, se muestra en la Figura 2.16.



**Figura 2.16.** Curva de respuesta de un Pt100.

#### 2.4.1.2 Efecto de auto-calentamiento de un RTD

Debido a que los RTD necesitan de una fuente de excitación ya sea de corriente o de voltaje para poder realizar la medición de la temperatura, la corriente que circula a través del RTD produce un auto-calentamiento debido al efecto Joule; además el incremento de temperatura está directamente relacionado con el tamaño del sensor, mientras más pequeño es el sensor mayor es el auto-calentamiento.

El fenómeno del auto-calentamiento en un RTD puede describirse mediante la siguiente ecuación, tomada de [25]:

$$\Delta T = T - T_a = R_\theta \cdot I^2 \cdot R_T [^\circ C] \quad (2.15)$$

Donde:

$R_\theta$ =Es la resistencia térmica del RTD con el medio [ $^\circ C/W$ ], la misma que debe ser especificada por el fabricante [25].

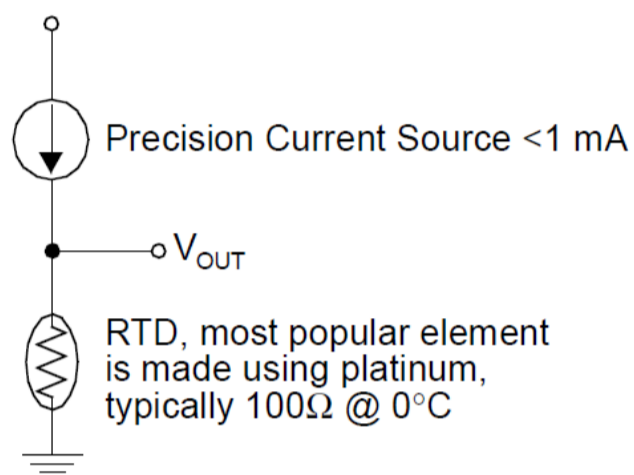
$I$ = La corriente que circula por el RTD.

$R_T$ =La resistencia del RTD a la temperatura  $T$ .

$T_a$ =La temperatura del medio.

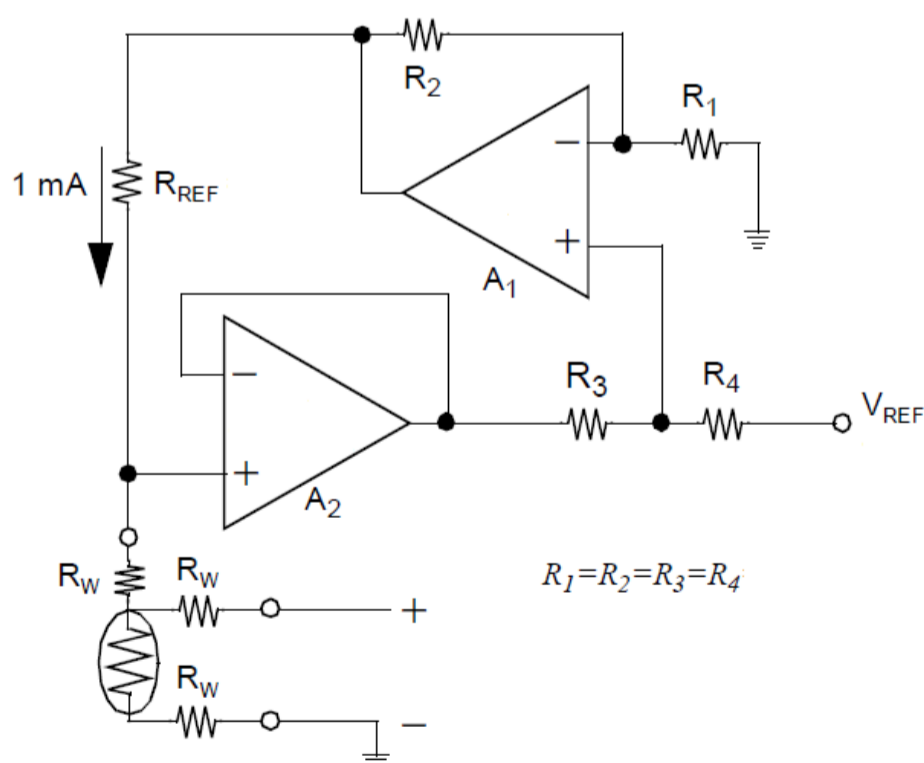
### 2.4.1.3 Circuito de excitación para un RTD

Como se mencionó anteriormente, es posible excitar un RTD mediante una fuente voltaje o corriente. En este caso se ha elegido excitar al RTD mediante una fuente de corriente, tal como se muestra en la Figura 2.17, debido a que este método permite controlar de mejor manera el efecto de auto-calentamiento, así como permite mantener la sensibilidad y linealidad del RTD.



**Figura 2.17.** RTD excitado mediante una fuente de corriente constante [44].

Para mantener una buena linealidad, se requiere que la fuente de corriente con la que se excitará al RTD sea muy estable y precisa, en la Figura 2.18 se muestra el circuito de una fuente de corriente de 1mA, elaborada mediante dos amplificadores operacionales [44].



**Figura 2.18.** Fuente de corriente constante para la excitación del RTD [44].

De la Figura 2.18 se tiene que, el voltaje a la salida del amplificador A<sub>1</sub> es:

$$V_{outA1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) * (V_{REF} - V_{R4}) \quad (2.16)$$

Si  $R_1 = R_2$ , entonces:

$$V_{outA1} = 2 * (V_{REF} - V_{R4}) \quad (2.17)$$

Donde:

$V_{outA1}$  es el voltaje de salida del Amplificador 1.

$V_{R4}$  es el voltaje en la resistencia R<sub>4</sub>.

Y el voltaje a la salida del amplificador A<sub>2</sub> es:

$$V_{outA2} = V_{REF} - V_{R4} - V_{R3} \quad (2.18)$$

Debido a que, el amplificador A<sub>2</sub> hace la función de un seguidor de voltaje, el  $V_{outA2}$  es el mismo que los voltajes en la entrada inversora y no inversora del A<sub>2</sub>.

El voltaje en la  $R_{REF}$  está dado por:

$$V_{RREF} = V_{outA1} - V_{outA2} \quad (2.19)$$

Si se reemplaza las ecuaciones (2.17) y (2.18) en la ecuación (2.19) se tiene que:

$$V_{RREF} = 2 * (V_{REF} - V_{R4}) - V_{REF} - V_{R4} - V_{R3} \quad (2.20)$$

Si  $R_3 = R_4$ , entonces:

$$V_{R3} = V_{R4} \quad (2.21)$$

$$V_{RREF} = V_{REF} \quad (2.22)$$

La corriente en la resistencia  $R_{REF}$  es igual a:

$$I_{REF} = V_{REF}/R_{REF} \quad (2.23)$$

En este caso, debido a que se dispone de un voltaje de 3.3 Voltios entregado por el regulador de precisión LM1117, este será el voltaje de referencia para la fuente de corriente. Por lo tanto si:

$$I_{REF} = 1[mA]$$

Y

$$V_{REF} = 3.3[Vdc]$$

Entonces:

$$R_{REF} = 3.3[k\Omega]$$

Como se puede observar, los valores de  $R_1, R_2, R_3, R_4$  no afectan el valor de la corriente de excitación siempre que se cumpla que  $R_1 = R_2$  y  $R_3 = R_4$ , además los valores de  $R_3$  y  $R_4$  deben ser lo suficientemente altos para que la corriente que circule a través de ellas no sea excesivamente alta y se produzca pérdidas que puedan alterar el  $V_{REF}$ . Por lo tanto, como el voltaje de referencia es 3.3 voltios, se puede utilizar un valor de resistencia que sea múltiplo de este valor; para este diseño se ha tomado un valor de resistencia de  $33[k\Omega]$  para  $R_1, R_2, R_3$  y  $R_4$ , con una precisión del 1%.

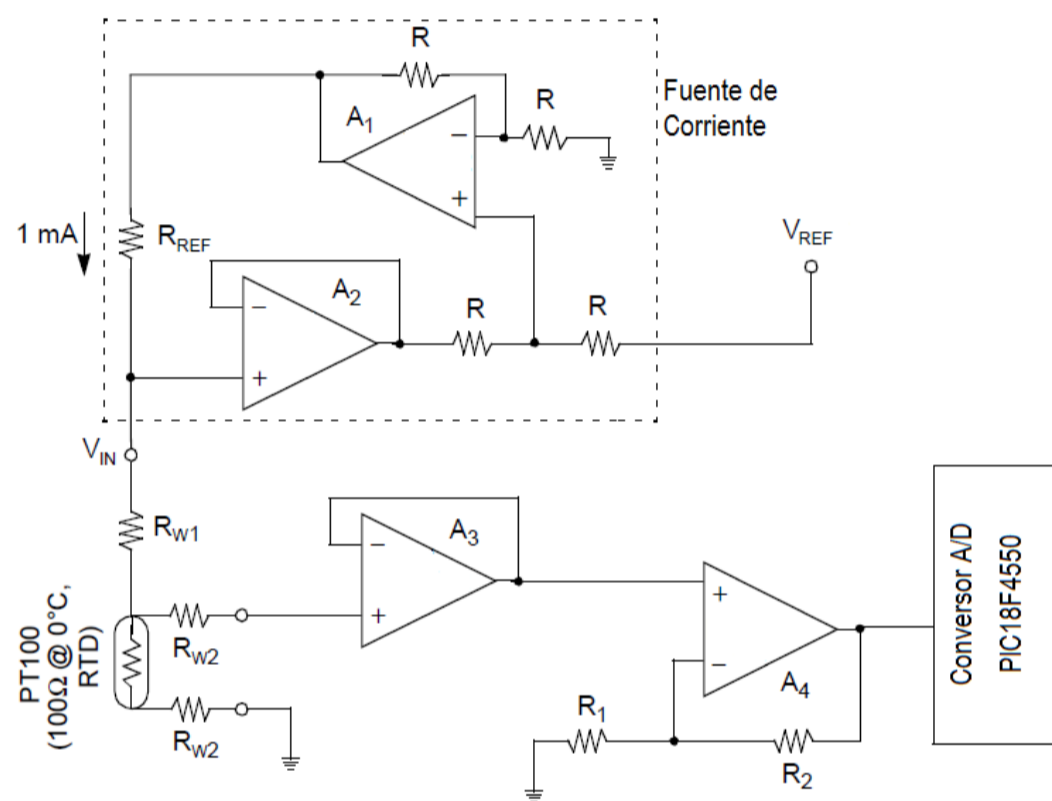
#### 2.4.1.4 Acondicionamiento de la señal del RTD

Una vez que la corriente de excitación está circulando por el RTD, por la ley de ohm el RTD va presentar un valor de voltaje cuya variación va a ser directamente proporcional a la variación de su resistencia y por lo tanto directamente proporcional a la variación de la temperatura del medio donde se encuentra el RTD.

Al tener una corriente de excitación de 1mA, el voltaje del RTD va a ser muy pequeño, por ejemplo si a  $0[^\circ C]$  el RTD Pt100 tiene un valor de  $100[\Omega]$ , entonces



su voltaje será de 100[mV], el cual, como se puede observar es muy bajo y puede ser afectado por algún tipo de interferencia electromagnética. Por lo tanto se hace necesaria una etapa de amplificación antes de que se proceda a digitalizar la señal. En la Figura 2.19 se muestra en circuito completo de excitación y acondicionamiento de la señal para un RTD Pt100, en la etapa de amplificación se utiliza un amplificador  $A_3$  en modo seguidor de voltaje para evitar caídas de voltaje por acople de impedancias, es decir anula los efectos de carga.



**Figura 2.19.** Circuito de excitación y acondicionamiento de la señal de un RTD [44].

A continuación se encuentra la etapa de amplificación propiamente dicha, donde el amplificador  $A_4$  está en modo amplificador no inversor cuya relación de amplificación está dada por la ecuación (2.24).

$$V_{outA4} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) * V_{RTD} \quad (2.24)$$

Si el voltaje que el RTD tendría a 0[°C] es de 100[mV] o 0.1[V] y los niveles de operación del conversor Análogo-Digital del micro-controlador admite voltajes de entrada de 0 a 5 voltios, lo más lógico es amplificar el voltaje del RTD en 10 veces, para lo cual se realiza el siguiente dimensionamiento:

$$V_{outA4} = 10 * V_{RTD} \quad (2.25)$$

Si se reemplaza la ecuación (2.25) en la ecuación (2.24) se tiene que:

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 10 \quad (2.26)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 9 \quad (2.27)$$

Si se consulta las enciclopedias o catálogos de varias marcas comerciales, los valores disponibles de resistencia que permiten tener una relación lo más cercana a 9 son  $10[k\Omega]$  y  $91[k\Omega]$ , por lo tanto para la etapa de amplificación se tiene que:  $R_1 = 10[k\Omega]$  y  $R_2 = 91[k\Omega]$ .

Si se reemplaza los valores obtenidos para  $R_1$  y  $R_2$ , y el valor de voltaje del RTD a  $0[^\circ\text{C}]$ , en la ecuación (2.24) se obtiene:

$$V_{outA4} = 10,1 * 0,1[\text{V}] \quad (2.28)$$

$$V_{outA4} = 1,01[\text{V}] \quad (2.29)$$

Está claro que, tanto la ganancia como el voltaje a la salida del amplificador tienen un error del 1%, el mismo que se debe trasladar a un valor de resistencia del RTD y a temperatura para saber cuál es el error que se producirá en la medición. Entonces si se divide el valor real de  $V_{outA4}$  para la ganancia ideal de 10, se tiene el voltaje que el conversor A/D leerá desde el RTD:

$$V_{RTD} = \frac{1,01[\text{V}]}{10} = 0,101[\text{V}] \quad (2.30)$$

Si se aplica la ley de Ohm:

$$RTD = \frac{V_{RTD}}{I_{RTD}} = \frac{0,101[V]}{0,001[A]} = 101[\Omega] \quad (2.31)$$

Si se reemplaza el valor obtenido de resistencia del RTD en la ecuación (2.13), se obtendrá el valor de temperatura que el micro-controlador creer que el RTD está midiendo:

$$101 = 100 \cdot (1 + 0,00385 \cdot T) \quad (2.32)$$

Entonces:

$$T = 2.59[^\circ C] \quad (2.33)$$

Como se puede observar, en los cálculos realizados, el micro-controlador leerá un valor de temperatura de  $2.59[^\circ C]$ , cuando en realidad debería ser de  $0[^\circ C]$ . Por lo tanto este valor de error tendrá que ser corregido en el algoritmo del firmware del micro-controlador, el mismo que se presenta en un capítulo posterior.

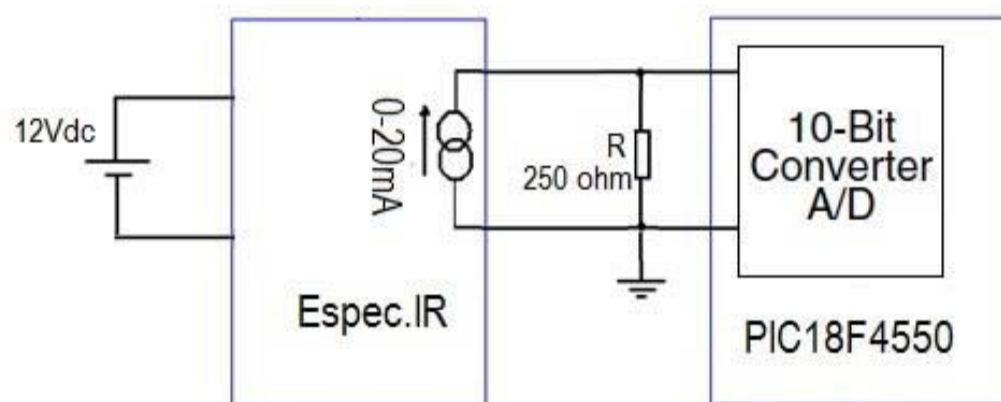
#### 2.4.2 ESPECTRÓMETRO INFRARROJO

En el numeral 2.1.2.3, se determinó que para el presente trabajo se utilizará el espectrómetro infrarrojo GASCARD NG, cuyas características de operación se detallan en la Tabla 2.3 y donde se especifica que la señal eléctrica que entrega el sensor es una señal de corriente de 4 a 20mA o de 0 a 20mA.

El rango de respuesta de 4 a 20mA en un transmisor de corriente, es útil en plantas industriales, donde la longitud del cableado hace difícil encontrar una discontinuidad o rotura en la línea de transmisión; en este caso si la línea estuviera rota, no se tendría el valor mínimo de 4mA y se detectaría la falla. Por el contrario si se dispone del rango de 0 a 20mA, la falla no se detectaría tan fácilmente, ya que el valor mínimo del rango de operación del transmisor de corriente es igual al valor que se obtendría si la línea estuviera rota.

Para el caso de un del sistema automático para la medición de la concentración de  $CO_2$ , los problemas anteriores no representan mayor dificultad ya que la longitud de la línea de transmisión es realmente corta y una falla en ella puede ser detectada muy fácilmente. Por la razón antes mencionada y con el objetivo de simplificar el programa en el micro-controlador, se escoge el rango de 0 a 20mA.

La ventaja al momento de digitalizar la señal de un sensor que entrega un valor de corriente de 0 a 20mA, se debe a que simplemente es necesaria una resistencia de 250 ohmios para transformar la señal de corriente en señal de voltaje de 0 a 5 voltios, la cual puede ser procesada por el conversor A/D del micro-controlador, tal como se muestra en la Figura 2.20.



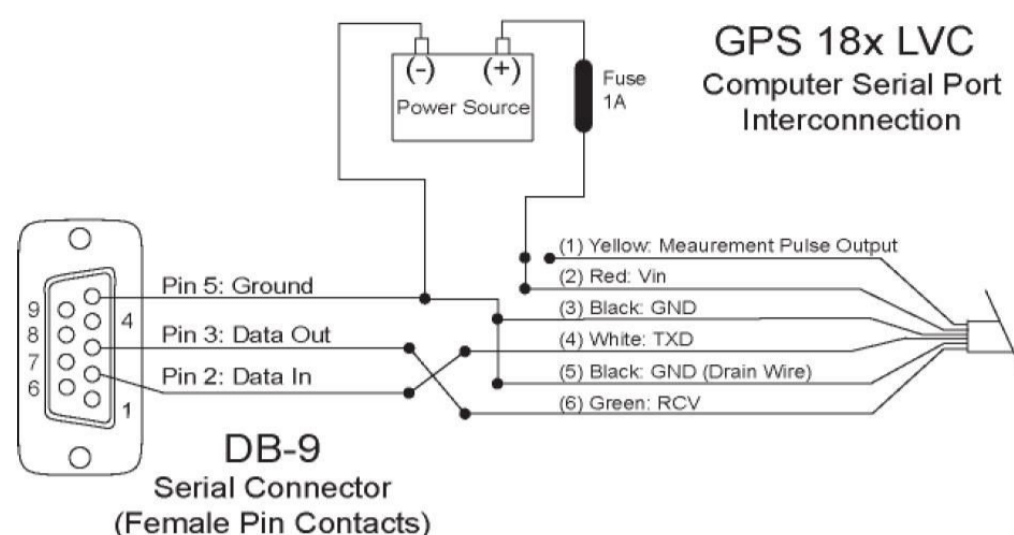
**Figura 2.20.** Circuito de acondicionamiento de la señal de corriente del espectrómetro infrarrojo GASCARD NG.

### 2.4.3 RECEPTOR GPS

Como se había descrito anteriormente el GPS que se va a utilizar en el sistema es el modelo 18x LVC de la marca Garmin; su distribución de pines y su diagrama de conexiones se detallan y presentan en la Tabla 2.12 y Figura 2.21 respectivamente.

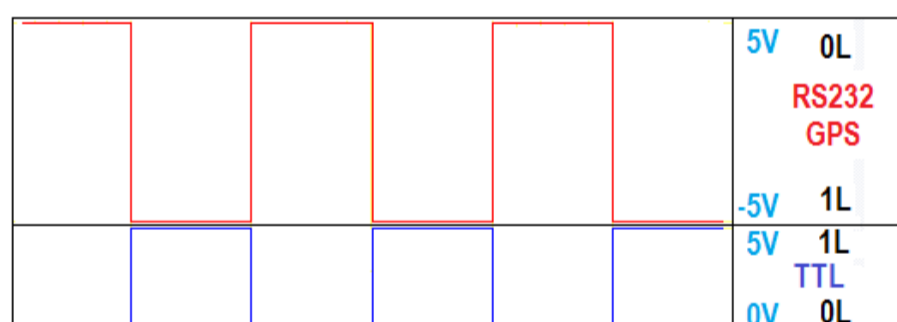
**Tabla 2.12.** Distribución de pines GPS 18x LVC Garmin [36].

GPS 18x pin #	Color	Nombre
1	Amarillo	Salida Pulso de Medida
2	Rojo	Vin
3	Negro	GND
4	Blanco	Tx
5	Negro	GND
6	Verde	Rx



**Figura 2.21.** Diagrama de conexiones GPS 18x LVC Garmin [36].

De acuerdo al manual del fabricante y cómo se puede observar en la Figura 2.21, el GPS 18x LVC necesita una fuente de 5 voltios DC y maneja el protocolo de comunicaciones seriales RS-232, donde el valor para un 1 lógico es identificado mediante un voltaje de -3 a -5 voltios y el valor para un 0 lógico es identificado por un voltaje de +3 a +5 voltios; debido a esto, la transmisión de datos no es compatible con el puerto de comunicaciones del micro-controlador, debido a que, este acepta niveles TTL donde el nivel lógico 1 es representado por un voltaje de 3.3 a 5 voltios y el nivel lógico 0 por un voltaje de 0 voltios, por lo tanto, se hace necesario una etapa para convertir los valores de voltaje de la señal del GPS a valores de voltaje TTL, como se muestra en la Figura 2.22.



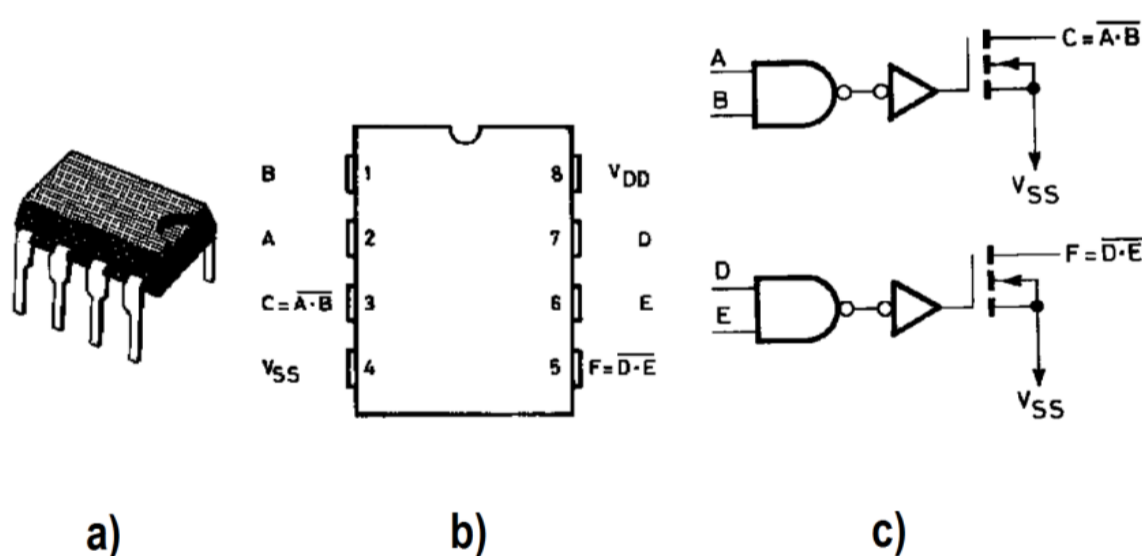
**Figura 2.22.** Comparación de los niveles lógicos en RS232 y TTL.

La velocidad de la comunicación serial del GPS es 4800 bits por segundo [36], por lo tanto el elemento o circuito mediante el cual se convierta la señal de  $\pm 5Vdc$  a una señal de 0 a 5 voltios, deberá soportar esta velocidad. Para lograr este propósito se ha usado la compuerta lógica NAND HCF40107B de tecnología CMOS con Drain abierto [38], que está disponible en stock en las bodegas de IG-EPN. Las

especificaciones eléctricas de la compuerta HCF40107B se presentan en la Tabla 2.13, su distribución de pines y diagrama funcional en la Figura 2.23.

**Tabla 2.13.** Máximos rangos de operación y características eléctricas dinámicas de la compuerta lógica NAND HCF40107B [38].

Máximos Rangos de Operación			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
VDD	Supply Voltage	- 0.5 a + 18	V
Vi	Input Voltage	- 0.5 to VDD + 0.5 V	V
Ii	DC Input Current (any one input)	± 10	mA
Características Eléctricas Dinámicas			
		Test Conditions	
tPHL , tPLH	Propagation Delay Time High to Low	RL * = 120 ohm VDD= 5 (V)	200 nS
	Low to High	RL * = 120 ohm VDD= 5 (V)	200 nS
tTHL, tTLH	Transition Time High to Low	RL * = 120 ohm VDD= 5 (V)	100 nS
	Low to High	RL * = 120 ohm VDD= 5 (V)	100 nS



**Figura 2.23.** Compuerta NAND HCF40107B: a) Empaquetamiento, b) Distribución de pines y c) Diagrama funcional [38].

De acuerdo a la información presentada en la Tabla 2.13, el tiempo total de la transición bajo- alto-bajo es:

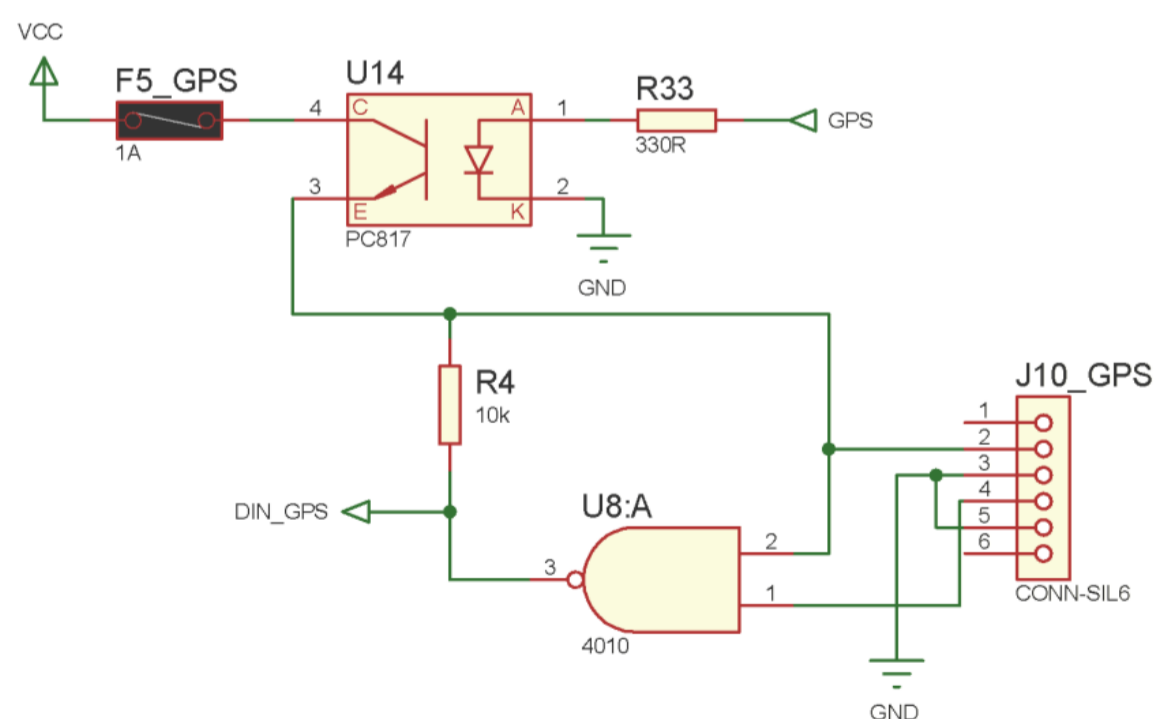
$$t_{TOTAL} = t_{PHL} + t_{PLH} + t_{THL} + t_{TLH} \quad (2.34)$$

$$t_{TOTAL} = 600[nS] \quad (2.35)$$

El tiempo mínimo de operación de la compuerta NAND HCF40107B, es suficiente para poder convertir los niveles de voltaje RS232 que entrega el GPS a niveles TTL, ya que el tiempo necesario para transmitir un bit a la velocidad de 4800 bit por segundo es:

$$t_{MIN*bit} = \frac{1[S]}{4800 \text{ bits}} = 2,083 \cdot 10^{-4}[S] = 208,33[\mu S] \quad (2.36)$$

Una vez que se ha comprobado que, los tiempos de operación de la compuerta son adecuados, concierne analizar su tabla de verdad, para garantizar que esta compuerta va a permitir transmitir la información del GPS sin ninguna alteración. En la Figura 2.24 se presenta el circuito implementado para acoplar el GPS al puerto serial del micro-controlador.



**Figura 2.24.** Circuito de acoplamiento entre el receptor GPS y el puerto serial del Micro-controlador.

**Tabla 2.14.** Tabla de verdad para la compuerta NAND HCF40101BE con Drain abierto [38].

A	B	$C = \overline{A \cdot B}$	
		Con resistencia de pull-up externa	Sin resistencia de pull-up externa
0	0	1	Z
1	0	1	Z
0	1	1	Z
1	1	0	

Para este caso se realiza un pequeño cambio en los valores que se muestran en la Tabla 2.14, ya que la entrada B de la compuerta siempre estará conectada a Vcc, por lo tanto su valor siempre será 1L, además se conecta la resistencia de pull-up externa R4. Tomando en cuenta el análisis anterior en la Tabla 2.15 se muestran los nuevos valores de entradas y salidas que se tendrá en el circuito de la Figura 2.24.

**Tabla 2.15.** Nueva tabla de verdad para el circuito de acoplamiento del GPS al puerto serial del micro-controlador.

A	B	$C = \overline{A \cdot B}$
		Con resistencia de pull-up externa
0	1	1
1	1	0
0	1	1
1	1	0

Si se comparan los valores de la entrada **A** y de la salida **C**, obtenidos en la nueva tabla de verdad, con los niveles de voltaje presentados en la Figura 2.22, se puede observar que el circuito de acoplamiento cumple correctamente con su función, por lo tanto en el puerto serial del micro-controlador se tendrá la información enviada por el GPS.



## 2.5 ETAPA DE PRESENTACIÓN, TRANSMISIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS

Una vez que se han digitalizado las señales, el siguiente paso lógico es presentarlos, almacenarlos y/o transmitirlos, para contar con registro histórico que nos permita evaluar la evolución de la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en el agua proveniente de las fuentes naturales.

### 2.5.1 PRESENTACIÓN LOCAL DE DATOS EN LA PANTALLA LCD

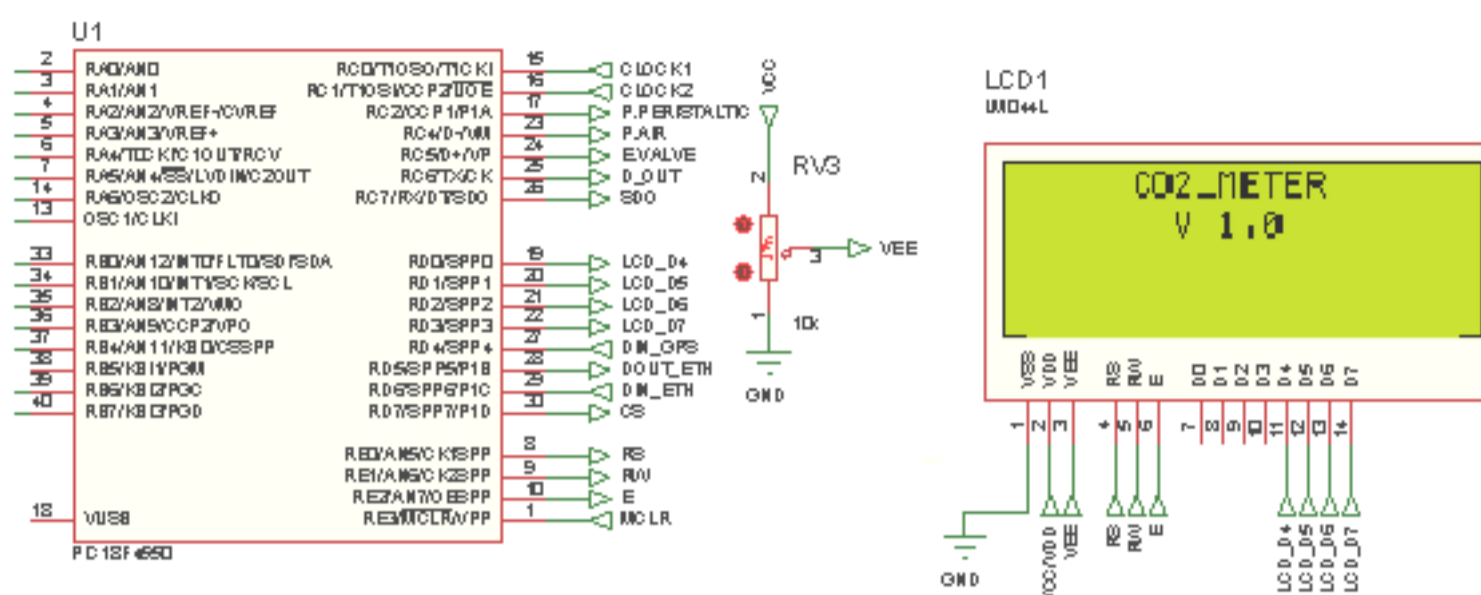
Para la presentación local de datos, el sistema contará con una pantalla de cristal líquido (LCD) modelo J204A.

El LCD J204A tiene un voltaje de operación de 5Vdc, por lo cual se adapta sin ningún inconveniente a los voltajes de operación del sistema, además su pantalla permite presentar 80 caracteres distribuidos en 20 columnas y 4 filas, lo cual hace posible visualizar mucha más información del sistema.

La distribución de pines y el circuito implementado para su operación se presentan en la Tabla 2.16 y en la Figura 2.25 respectivamente.

**Tabla 2.16.** Distribución de pines pantalla LCD J204A [33].

Números	Símbolo	Descripción	Números	Símbolo	Descripción
1	VSS	GND	9	D2	data
2	VDD	Supply voltaje for logic	10	D3	data
3	V0	Input voltaje for LCD	11	D4	data
4	RS	Data/command options	12	D5	data
5	R/W	Read/write choice	13	D6	data
6	E	Chip enable signal	14	D7	data
7	D0	data	15	BLA	Backlighting Anode
8	D1	data	16	BLK	Backlighting Cathode



**Figura 2.25.** Esquema del circuito de operación de la pantalla LCD.

## 2.5.2 CIRCUITO PARA LA OPERACIÓN DE LA MEMORIA SD

Para el almacenamiento de datos se decidió usar una memoria SD, ya que presentaba mayor facilidad a la hora de elaborar el código para la lectura y escritura de datos, respecto de una memoria USB.

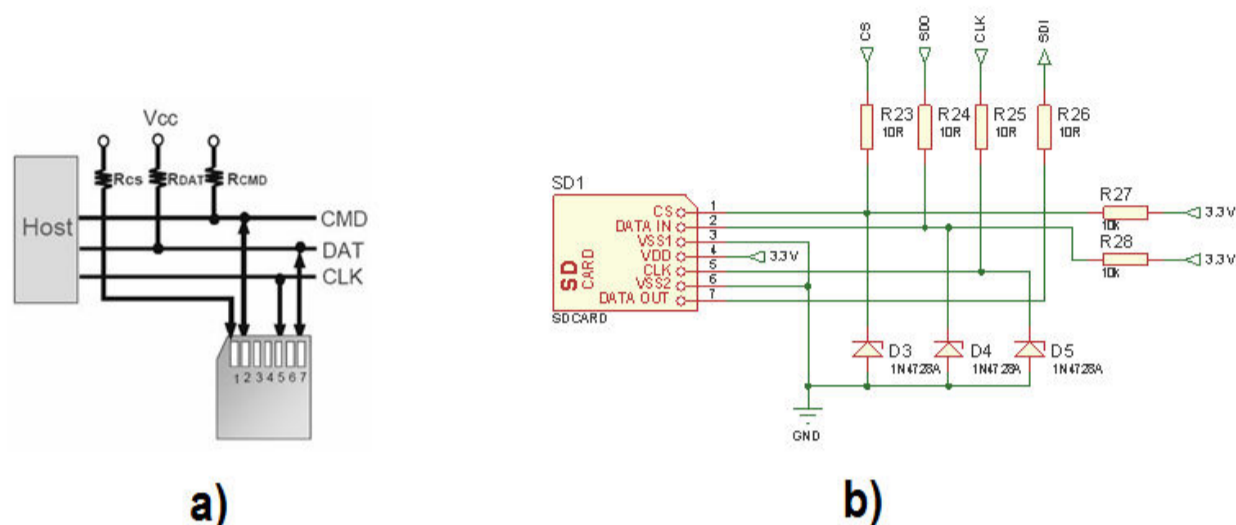
La distribución de pines de una memoria SD y su descripción se presentan en la Tabla 2.17.

**Tabla 2.17.** Distribución y descripción de los pines de la memoria SD [35], [45].

Pin #	Name	Type	SPI Description
1	CS	INPUT	Chip Select (Active low)
2	DataIn	INPUT	Host to Card Commands and Data
3	VSS1	POWER SUPPLY	Supply Voltage Ground
4	VDD	POWER SUPPLY	Supply Voltage
5	CLK	INPUT	Clock
6	VSS2	POWER SUPPLY	Supply Voltage Ground
7	DataOut	OUTPUT	Card to Host Data and Status
8	RSV	INPUT	Reserved
9	RSV	INPUT	Reserved

Basados en el manual de la memoria SD [45] donde se presenta el esquema de operación para la memoria SD de la Figura 2.26 a), se desarrolla el circuito que se muestra en la Figura 2.26 b). Las resistencias R27 y R28 de 10kohm, son resistencias de pull-up que protegen las líneas de Chip Select (CS) y DATA IN

contra fluctuaciones de voltaje, el valor que el fabricante sugiere se encuentra entre 10 y 100kohm.



**Figura 2.26.** a) Esquema eléctrico para memoria SD proporcionado por el fabricante [45],  
b) Esquema del circuito desarrollado para la operación de la memoria SD.

Las resistencias R23, R24, R25 y R26 se agregan para limitar la corriente entre el micro-controlador y los diodos zener 1N4728A que limitan la señal de 5Vdc del micro-controlador a 3.3Vdc que es el nivel de voltaje de operación de la memoria SD.

El diodo zener 1N2728A tiene una potencia de disipación de 1 vatio [46], por lo tanto la corriente máxima que puede soportar es:

$$I_{zener} = \frac{P_{zener}}{V_{zener}} = \frac{1[W]}{3.3[V]} = 0,303[A] \quad (2.37)$$

El valor de la resistencia limitadora está dado por:

$$R_{limi} = \frac{V_{cc} - V_{zener}}{I_{zener}} \quad (2.38)$$

Entonces:

$$R_{limi} = \frac{5 - 3,3}{0,303} = 5,61[\Omega] \quad (2.39)$$

Para un valor de  $R_{limi} = 5,6[\Omega]$ , por el efecto de la tolerancia, en cierto punto el valor de la  $R_{limi}$ , será menor al valor requerido, por lo tanto se toma un valor de  $R_{limi}$  de  $10[\Omega]$ .

Entonces la corriente que se tendrá con el nuevo valor de resistencia es:

$$I_{Rlimi} = I_{Zener} = \frac{5 - 3,3}{10} = 0,17[A] \quad (2.40)$$

Y la potencia que disipará la resistencia es:

$$P_{disipada} = I_{Rlimi}^2 \cdot R_{limi} \quad (2.41)$$

$$P_{disipada} = (0,17)^2 \cdot 10 = 0,289[W] \quad (2.42)$$

Por lo tanto es necesario una resistencia de  $10[\Omega]$  y de medio vatio.

### 2.5.3 PUENTE CONVERTIDOR SERIAL A ETHERNET

En muchos casos, si la situación lo requiere, el sistema deberá transmitir los datos de la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en tiempo real hacia el centro de monitoreo TERRAS del IG-EPN, a través de la red de radio transmisión digital que posee el Instituto.

Debido a que la conexión con los radios transceiver [47] se hace a través de un puerto Ethernet y que el micro-controlador elegido no dispone de un puerto Ethernet, solo puertos seriales, se utilizará un puente convertidor de protocolo de comunicación Serial a protocolo de comunicación Ethernet para acoplar un puerto serial UART del PIC a un puerto ETHERNET.

En la Tabla 2.18 se presenta las características del conversor serial-ethernet Nano LandReach de la empresa Connect One que se utilizó en la realización de este proyecto.

**Tabla 2.18.** Características técnicas del conversor serial-ethernet Nano LanReach [34].

NANO LANREACH	
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Internet Protocols	ARP, ICMP, IP, UDP, TCP, DHCP, DNS, NTP, SMTP, POP3, MIME, HTTP, FTP and TELNET
Security Protocols	SSL3/TLS1, HTTPS, FTPS, RSA, AES-128/256, 3DES, RC-4, SHA-1, MD-5, MD-2
Protocols Accelerated in HW	AES, 3DES and SHA
Application Program Interface	Connect One's AT+i protocol SerialNET mode for transparent serial data-to-Internet bridging
Host Data Rate/Effective TCP throughput Serial mode	3Mbps / 3Mbps
SerialNET mode	Asynchronous character; binary; 7 or 8 data bits; odd, even, or no parity; 1, 1.5, or 2 stop bits
Operating Voltage	+3.3V+/-10%
Operating Humidity	90% maximum (non-condensing)
Operating Temperature Range	-40° to 85°C (-40° to 185°F)

El conversor Nano LanReach posee un puerto UART (Conector J8) y un puerto SPI (Conector J9) cuya distribución de pines se presentan en la Tabla 2.19 y Tabla 2.20 respectivamente.

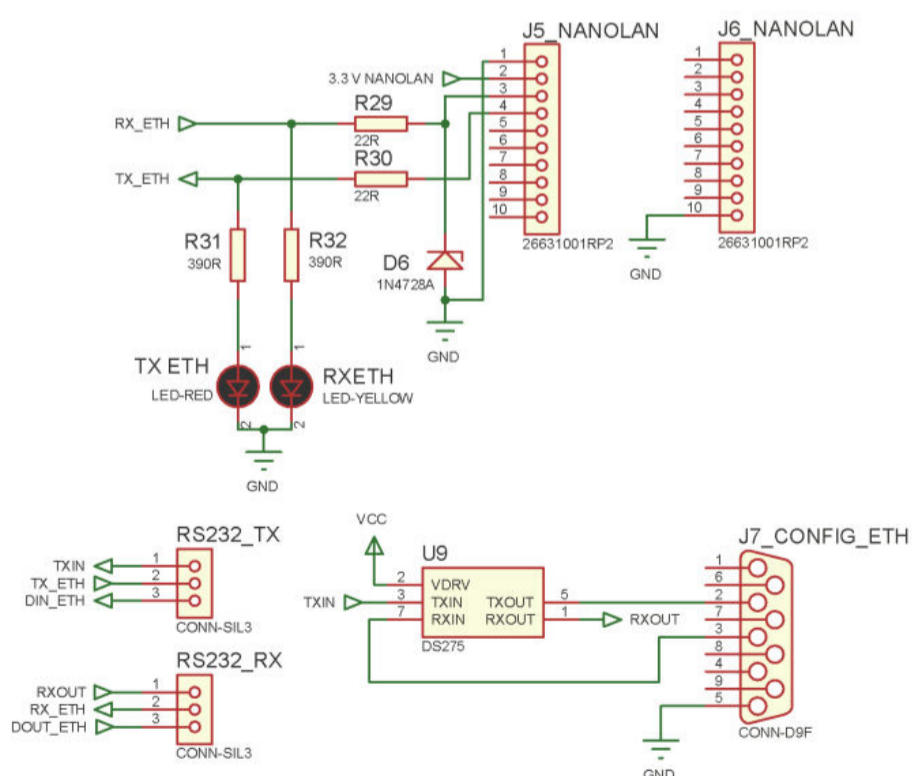
**Tabla 2.19.** Descripción de pines del puerto UART (conector J8) [34].

PIN	SEÑAL	TIPO	DESCRIPCIÓN
1	GND	Power	
2	VDD	Power	
3	RXD0	Input	UART 0 receive
4	TXD0	Output	UART 0 transmit
5	nCTS0	Input	UART 0 clear to send
6	nRTS0	Output	UART 0 request to send
7	DATA_RDY	Output	Data ready
8	MSEL	Input	Mode select
9	nRESET	Input	Reset Module. At Least 10mSec pulse
10	ACT_LINK	Output	LAN Link LED indicator

**Tabla 2.20.** Descripción de pines del puerto SPI (conector J9) [34].

PIN	SEÑAL	TIPO	DESCRIPCIÓN
1	nSPI1_CS	Input	SPI 1 chip select for host
2	SPI1_CLK	Input	SPI 1 clock for host (Max 12MHz)
3	SPI1_MISO	Output	SPI 1 slave out for host master in
4	SPI1_MOSI	Input	SPI 1 slave in for host master out
5	SPI1_INT	Output	SPI 1 have data on his buffer
6	Readiness	Output	iChip Ready
7	DDM	Analog	USB device negative
8	DDP	Analog	USB device positive
9	SPEED	Output	Speed LED indicator. "0" - 100M ; "1" -10M
10	GND	Power	

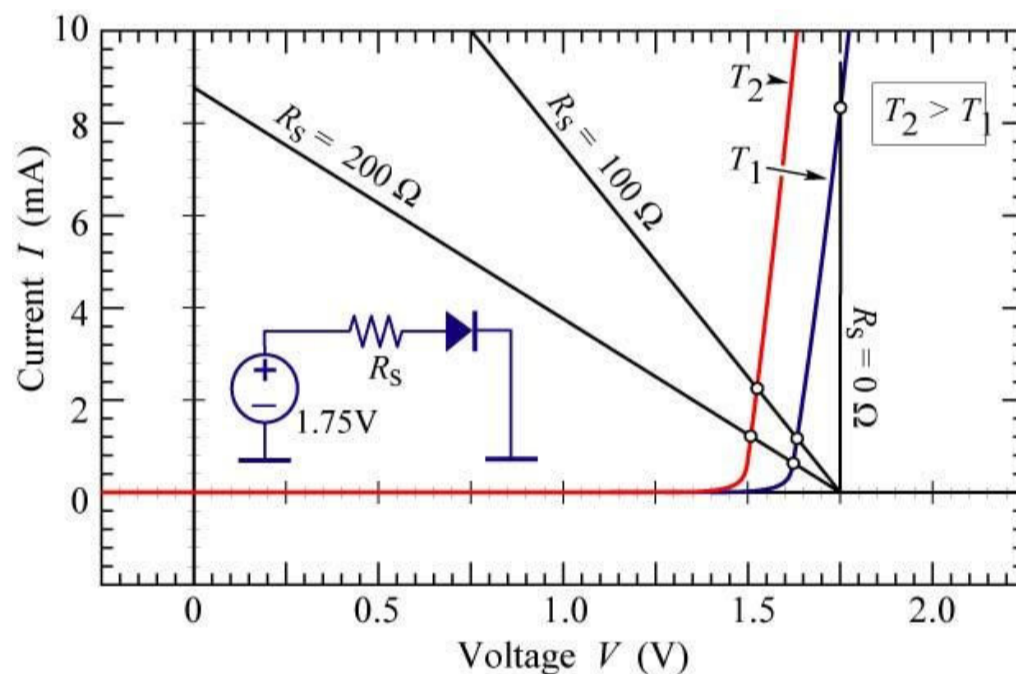
Como se puede observar en la Tabla 2.18, el voltaje de operación del conversor Nano LanReach es 3,3 voltios, por lo tanto se necesita realizar un circuito para acoplar el puerto serial del conversor con el puerto serial del micro-controlador que opera con un voltaje de 5 voltios. En la Figura 2.27 se presenta el circuito implementado, en donde el diodo D6 es un diodo zener de 3,3 voltios y el valor de las resistencias R29 y R30 se calculan en base al principio mostrado en el numeral anterior para el cálculo del valor de las resistencias limitadoras R23, R24, R25 y R26.

**Figura 2.27.** Circuito para la operación del puente conversor serial a Ethernet Nano LanReach.

Las resistencias R31 y R32 limitan la corriente que circula por los diodos LED TXETH y RXETH con el objetivo de evitar su incremento de temperatura y alargar su vida útil; estos LEDs indican que las líneas de transmisión y recepción del conversor serial a Ethernet están activas. El valor de las resistencias limitadoras se puede calcular con la ecuación (2.43):

$$R_{limitadora\ LED} = \frac{V_{fuente} - V_{led}}{I_{led}} \quad (2.43)$$

Sabemos que los puertos del micro-controlador manejan voltajes de 0 y 5 voltios, por lo tanto solo resta saber con qué corriente y voltaje operan los diodos LED; en la Figura 2.28 se muestra la curva de respuesta Corriente vs Voltaje de un diodo LED de color rojo para tres valores de resistencia limitadora [47].



**Figura 2.28.** Curva de respuesta Corriente vs Voltaje de un diodo LED de color rojo con resistencia limitadora [47].

Si se observa las curvas de la Figura 2.28 se tiene que, el voltaje mínimo del LED es 1.5 voltios, si la corriente del LED se limita a 10mA y se reemplazan estos valores en la ecuación (2.43) se tiene que:

$$R_{limitadora\ LED} = \frac{5[V] - 1,5[V]}{10[mA]} = 350[\Omega] \quad (2.44)$$

Tomando en cuenta el efecto de la tolerancia, se puede tomar un valor de resistencia de  $390[\Omega]$ , que es el siguiente valor comercial disponible, por lo tanto  $R31=R32=390[\Omega]$ .

Continuando con el conversor serial a Ethernet, uno de los inconvenientes que se presentan, se debe a que no posee una dirección IP por defecto, entonces para realizar la configuración inicial se debe ingresar desde un computador a través del puerto serial; en la Figura 2.27 se presenta el circuito para este propósito. En este caso se utiliza un conector DB9 genérico y un integrado DS275 que permite acoplar los voltajes RS232 del computador con los voltajes de operación del circuito de control; debido a que el conversor serial a Ethernet solo posee un puerto UART, se utilizan dos conectores jumper RS232\_TX y RS232\_RX, que permitirán intercambiar físicamente la conexión del puente Ethernet con el puerto serial del PIC que enviara los datos y con el conector DB9 del circuito de configuración. Inicialmente los conectores jumper RS232\_TX y RS232\_RX, estarán en la posición 1-2 para poder realizar la configuración del converso Ethernet y luego se los colocará en la posición 2-3 para la operación normal. A continuación, se podrá ingresar a la configuración del conversor serial a Ethernet por el puerto físico Ethernet, con la dirección IP que se le haya asignado en la configuración inicial a través del puerto serial.

El procedimiento para la configuración se detalla en el Capítulo siguiente, el cual tiene que ver con el desarrollo del software de operación del sistema automático.

## **2.6 ETAPA DE OPTO-ACOPLAMIENTO Y POTENCIA**

### **2.6.1 OPTO-ACOPLAMIENTO**

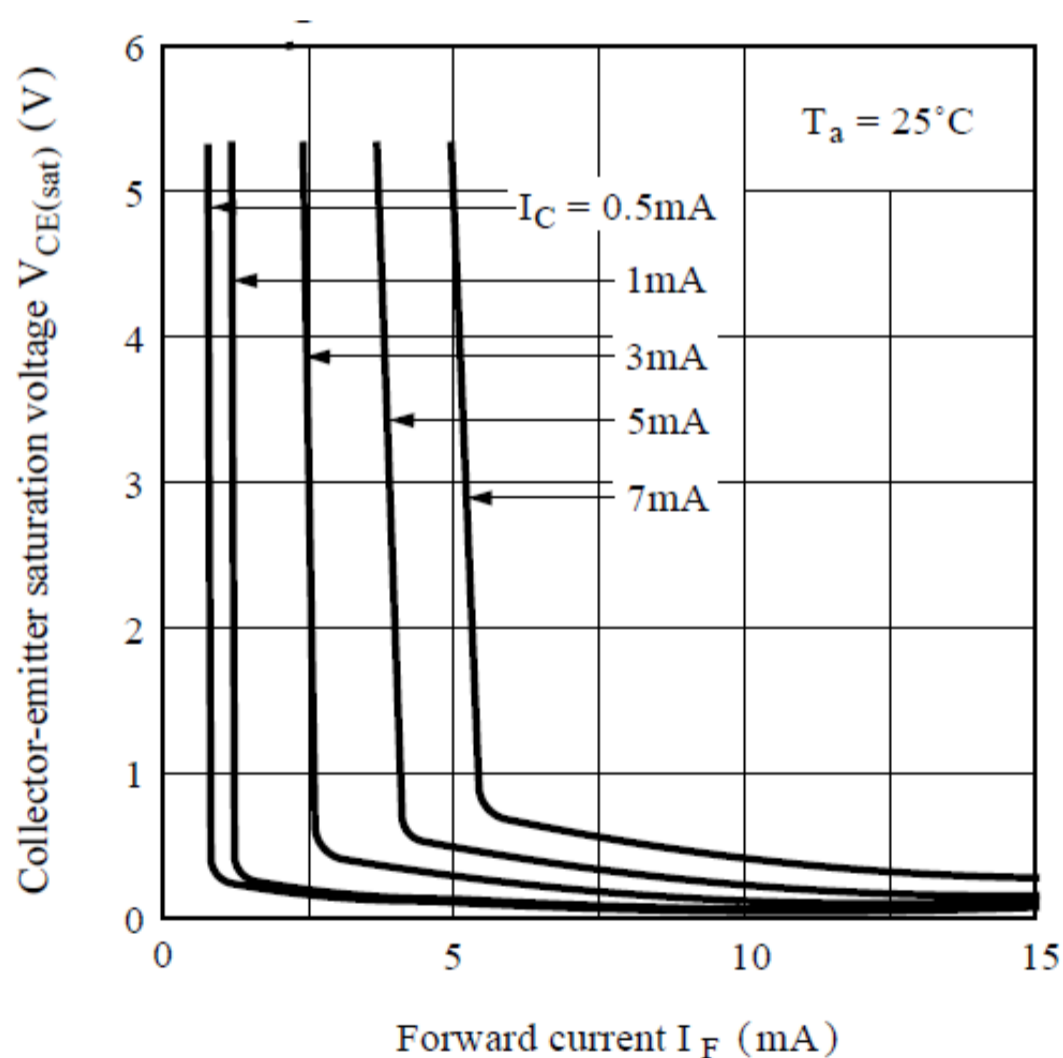
Debido a que, los actuadores y elementos finales de control trabajan con un voltaje de 12 voltios y el PIC que es el controlador trabaja con 5 voltios, no se puede realizar una conexión directa entre estos elementos. Para evitar que el micro-controlador sufra daños por sobre-corrientes o sobre-voltajes que puedan provenir de la carga, se ha utilizado como aislador el opto-acoplador PC817 fabricado por la empresa SHARP, y cuyos rangos de operación se presentan en la Tabla 2.21.



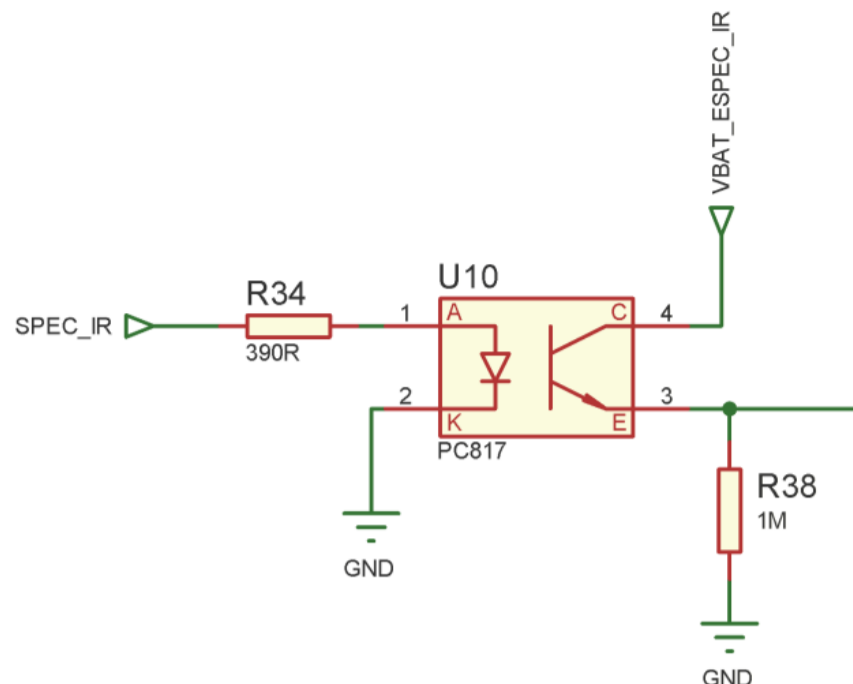
**Tabla 2.21.** Rangos de Operación del Opto-acoplador PC817 [40].

PARAMETRO		SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Input	Forward current	$I_F$	20	mA
	Forward voltage	$V_F$	1.2	V
	Peak forward current	$I_{FM}$	1	A
	Reverse voltage	$V_R$	6	V
	Power dissipation	$P$	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	$V_{CEO}$	35	V
	Emitter-collector voltage	$V_{ECO}$	6	V
	Collector current	$I_C$	50	mA
	Collector power dissipation	$P_C$	150	mW
Total power dissipation		$P_{tot}$	200	mW
Operating temperature		$T_{opr}$	30 to + 100	°C

En la Figura 2.29 se muestra la curva de repuesta del voltaje colector emisor en el transistor de salida respecto de la corriente de excitación en el diodo.

**Figura 2.29.** Voltaje Colector-Emisor de saturación vs Corriente de Exitación [40].

En la Figura 2.30, se presenta el circuito de operación para el opto-acoplador.



**Figura 2.30.** Circuito opto-acoplador para el PIC18F4550.

La resistencia R36 tiene la función de limitar la corriente que circula a través del diodo del opto-acoplador y su valor está dado por la ecuación (2.43).

Los puertos del micro-controlador entregan un voltaje de 5 voltios y desde la Tabla 2.21 se conoce que el voltaje y corriente de operación del diodo del opto-acoplador es 1.2 voltios y 20 miliamperios respectivamente, por lo tanto:

$$R_{36} = \frac{5[V] - 1,2[V]}{20[mA]} = 190[\Omega] \quad (2.45)$$

Pero como se mencionó anteriormente, a mayor corriente del diodo su vida útil disminuye, por lo tanto se toma un valor de  $R_{36}=390[\Omega]$  para limitar la corriente a 10mA.

Cabe señalar que el circuito dispone de cinco opto-acopladores para el control del GPS, la bomba de aire, la electroválvula y el espectrómetro infrarrojo, por lo tanto el diseño de uno de ellos se aplica a todos.

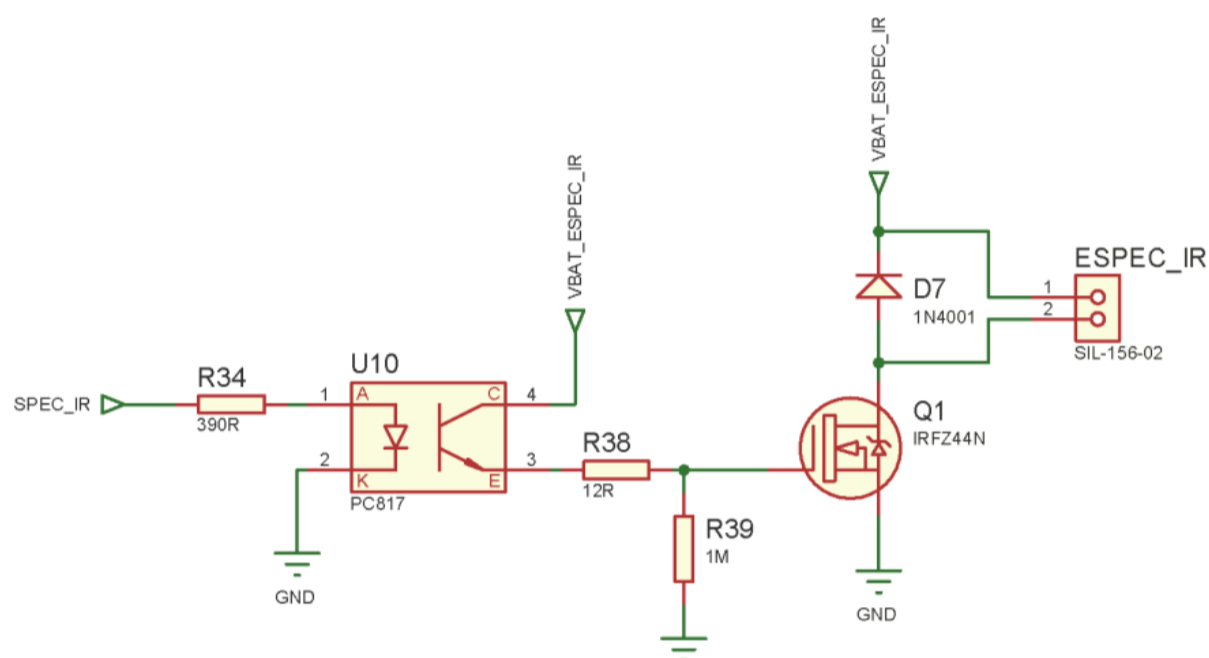
### 2.6.2 CIRCUITO DE POTENCIA

Este numeral se refiere al circuito que permitirá operar los actuadores del sistema automático.

Por los voltajes y corrientes que se manejan en esta etapa (12 voltios y alrededor de 600mA para el elemento de mayor consumo), no se podría considerar como una etapa de potencia propiamente dicha, pero si se compara con los voltajes y

corrientes que manejan lo demás elementos del sistema, se puede considerar como una etapa de potencia.

En esta etapa se utiliza un transistor MOSFET IRFZ44N [48], cuya activación será controlada por el micro-controlador PIC a través del circuito opto-acoplador del numeral anterior, como se muestra en la Figura 2.31.



**Figura 2.31.** Circuito de opto-acoplamiento y potencia para el control del encendido y apagado del espectrómetro infrarrojo.

Las especificaciones del MOSFET IRFZ44N se presentan en la Tabla 2.22.

**Tabla 2.22.** Especificaciones del MOSFET IRFZ44N [48].

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	VALOR Max.	UNIDAD	
ID @ TC = 25°C	Continuous Drain Current, VGS @ 10V	49	A	
IDM	Pulsed Drain Current	160		
PD @TC = 25°C	Power Dissipation	94	W	
VGS	Gate to Source Voltage	± 20	V	
T <sub>J</sub> & T <sub>STG</sub>	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C	
VGS(th)	Gate Threshold Voltage	4.0	V	
I <sub>GSS</sub>	Gate-to-Source Forward Leakage(V <sub>GS</sub> = 20V)	100	nA	
	Gate-to-Source Reverse Leakage(V <sub>GS</sub> = -20V)	-100		
td(on)	Turn-On Delay Time	V <sub>DD</sub> = 28V I <sub>D</sub> = 25A R <sub>G</sub> = 12Ω V <sub>GS</sub> = 10V	ns	
t <sub>r</sub>	Rise Time			12
td(off)	Turn-Off Delay Time			60
t <sub>f</sub>	Fall Time			44
			45	

Si se analiza el circuito mostrado en la Figura 2.31, la resistencia R38 es la resistencia de Gate del mosfet y tiene el valor de  $12[\Omega]$  como se sugiere en el manual del fabricante; la resistencia R39 proporciona la referencia para el emisor del opto-acoplador y además asegura la desconexión del mosfet una vez se desactive el opto-acoplador. El diodo D7 se encuentra en polarización inversa y tiene el objetivo de proteger el mosfet en el momento de la desconexión.

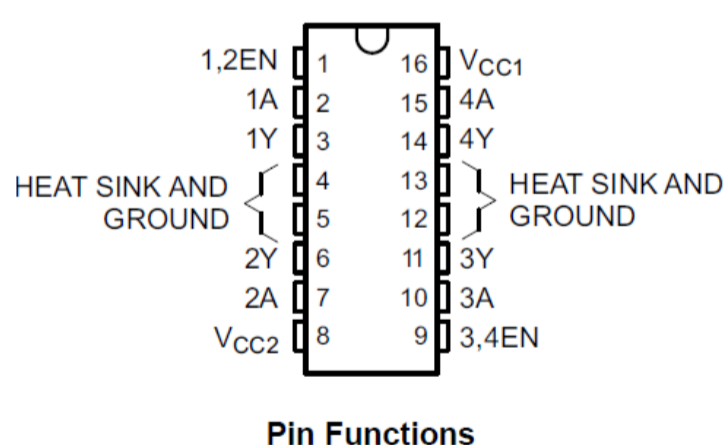
### 2.6.2.1 Circuito para el manejo de la bomba peristáltica

Para la operación de la bomba peristáltica se decide utilizar el integrado L293D que contiene dos medios puentes H, que permitirá activar la bomba en sentido horario y anti-horario.

Cuando la bomba sea activada en sentido horario, estará operando en el modo normal y trasladará el agua desde la fuente hacia la cámara de equilibrio.

Cuando la bomba sea activada en sentido anti-horario, estará operando en el modo inverso y evacuará el agua del interior de la cámara de equilibrio a través de la línea de succión. Al hacer circular el agua en sentido contrario por la línea de succión, se produce un efecto de retro-lavado, para remover parte de las sales o sólidos que se puedan acumular en la succión.

La distribución de pines y las características eléctricas del circuito integrado L293D se presentan en la Figura 2.32 y la Tabla 2.23 respectivamente [49].



Pin Functions

PIN		TYPE	DESCRIPTION
NAME	NO.		
1,2EN	1	I	Enable driver channels 1 and 2 (active high input)
<1:4>A	2, 7, 10, 15	I	Driver inputs, noninverting
<1:4>Y	3, 6, 11, 14	O	Driver outputs
3,4EN	9	I	Enable driver channels 3 and 4 (active high input)
GROUND	4, 5, 12, 13	—	Device ground and heat sink pin. Connect to printed-circuit-board ground plane with multiple solid vias
V <sub>CC1</sub>	16	—	5-V supply for internal logic translation
V <sub>CC2</sub>	8	—	Power VCC for drivers 4.5 V to 36 V

Figura 2.32. Distribución y descripción de los pines del circuito integrado L293D [49].

**Tabla 2.23.** Condiciones de operación recomendadas para el integrado L293D [49].

Condiciones de Operación Recomendadas					
		MIN	MAX	NOM	Unidades
Voltaje de alimentación	$V_{CC1}$	4.5		7	V
	$V_{CC2}$	$V_{CC1}$		36	
Voltaje de entrada nivel alto ( $V_{IH}$ )	$V_{CC1} \leq 7$	2.3		$V_{CC1}$	V
	$V_{CC1} \geq 7$	2.3		7	V
Voltaje de entrada nivel bajo ( $V_{IL}$ )		-0.3		1.5	V
Corriente continua de salida ( $I_o$ )		-600		600	mA
Temperatura de operación al aire libre ( $T_A$ )		0		70	°C

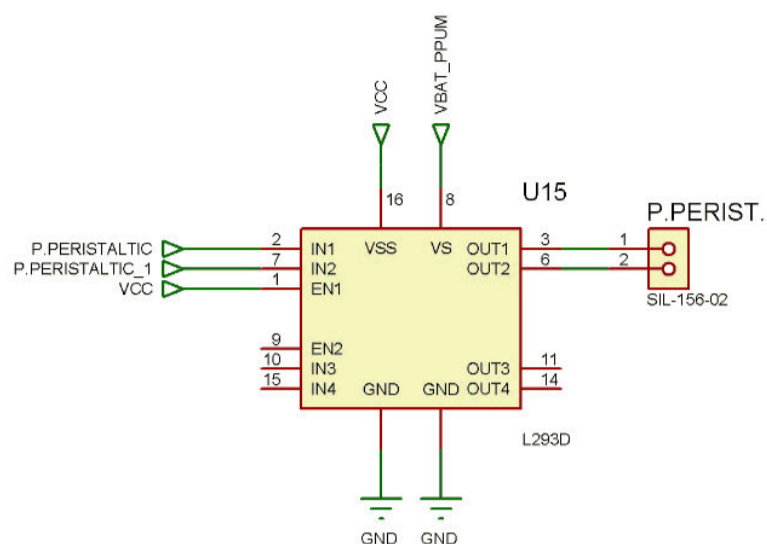
Como se puede observar de la información contenida en la Tabla 2.8 y Tabla 2.23, el circuito integrado L293D soporta la corriente necesaria para la operación de la bomba peristáltica.

En la Tabla 2.24, se presenta la tabla de verdad del integrado L293D, la cual permitirá determinar las conexiones necesarias para la operación de la bomba peristáltica.

**Tabla 2.24.** Tabla de verdad del circuito integrado L293D [49].

ENTRADAS		SALIDA(Y)
A	EN	
H	H	H
L	H	L
X	L	Z

A partir de la información presentada en la tabla anterior y en la Tabla 2.23 se obtiene el circuito que se presenta en la Figura 2.33.



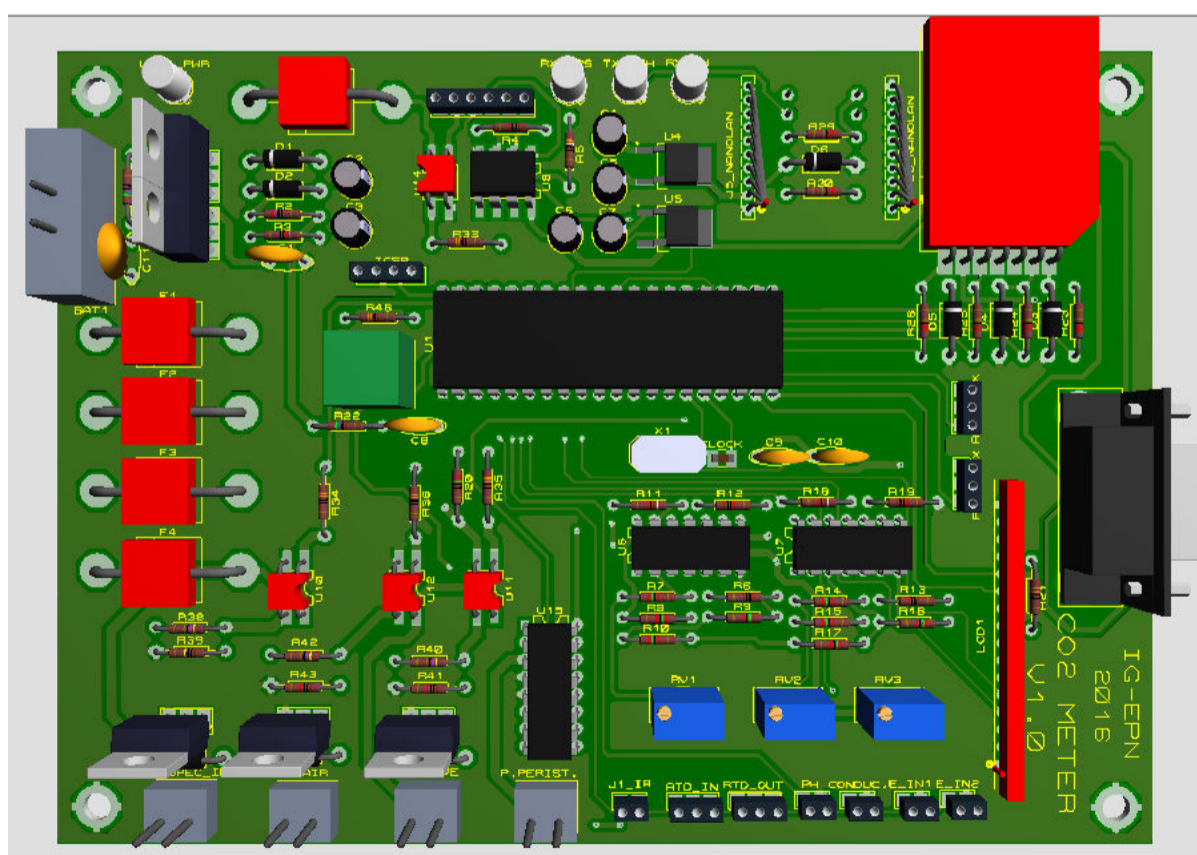
**Figura 2.33.** Diagrama de conexiones del circuito L293D para la operación de la bomba peristáltica.

Finalmente, después de todo el análisis y diseño realizado, en el ANEXO B se presenta el circuito esquemático final. Para la elaboración y simulación del circuito se utilizó el software ISIS PROTEUS 7.9 SP1.

## 2.7 CIRCUITO IMPRESO

Una vez elaborado el circuito esquemático, se elabora el circuito impreso, mediante la aplicación ARES 7 que está incluido dentro del paquete del software de simulación ISIS PROTEUS 7.9 SP1.

En la Figura 2.34 se presenta el modelo 3D de la simulación del circuito impreso con la ubicación espacial de todos los elementos.



**Figura 2.34.** Simulación de la ubicación espacial de los elementos y componentes del circuito electrónico de control.

## 2.8 TRANSMISIÓN DE DATOS POR RADIO MODEM

Para poder acceder a los datos del sistema automático desde el centro de monitorización TERRAS, una vez que el sistema se encuentre instalado en la o las fuentes donde se requiere monitorizar la concentración de CO<sub>2</sub>, se utilizará la red de radio enlace digital que posee el IG-EPN.

### 2.8.1 RADIO MODEM DIGITAL

La red de transmisión digital está basada principalmente en el radio de espectro ensanchado de la marca Freewave, el mismo que se muestra en la Figura 2.35 y cuyas características se presentan en la Tabla 2.25.

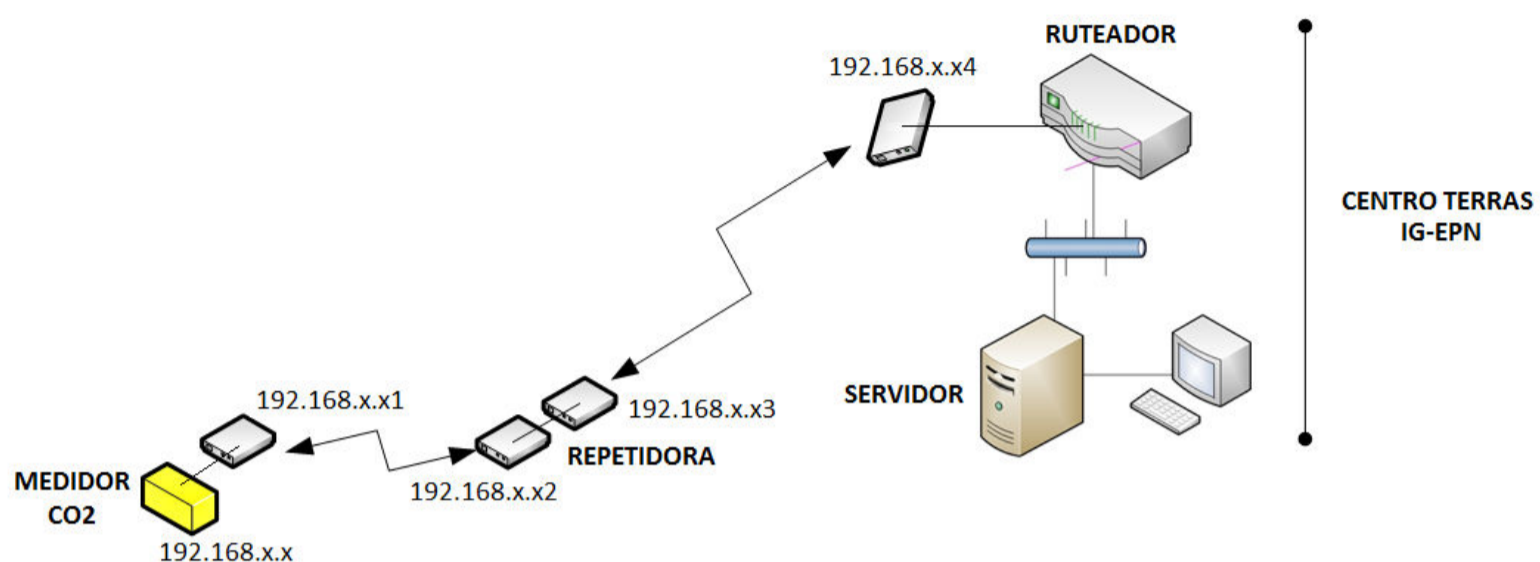


Figura 2.35. Radio modem Freewave modelo FGR2-PE [50].

Tabla 2.25. Características Radio modem Freewave FGR2-PE [50].

FREEWAVE FGR2-PE	
Frequency Range	902 to 928MHz, Frequency Hopping Spread Spectrum
Throughput	Up to 154 Kbps over the air
Range	Up to 60 Miles line of site
Ports	2 Ethernet ports, 2 Serial ports
Operating Voltage	+6 to +30 VDC
Operating Certs/Specs	Class 1 Division 2; -40°C to +75°C
Communications Protocols	Ethernet and RS232/RS422/RS485
Security	128-bit AES encryption

Los datos desde el sistema automático, serán enviados mediante el radio enlace hasta la repetidora o receptor final tal como se muestra en el diagrama de la Figura 2.36.



**Figura 2.36.** Diagrama de radio enlace para la transmisión de datos desde la fuente de agua que será monitorizada hacia el IG-EPN.

## 2.8.2 ANTENA YAGI

La transmisión de la señal para el radio enlace se realizará mediante una antena tipo YAGI, como la que se presenta en la Figura 2.37.



**Figura 2.37.** Antena tipo YAGI.

La antena es fabricada en el laboratorio del IG-EPN, su diseño fue elaborado por el Msc. Wilson Enríquez, quien proporciono verbalmente las características que se detallan en la Tabla 2.26.



**Tabla 2.26.** Características de la antena YAGI fabricada en el IG-EPN.

ANTENA YAGI	
Rango de frecuencia	900-930MHz
Impedancia	50 Ohm
SWR (Relación de onda estacionaria por sus siglas en inglés)	$\leq 1.2$
Ganancia	11dB
Polarización	Horizontal o Vertical

### 2.8.3 SUPRESOR DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para evitar posibles daños por descargas atmosféricas, entre la conexión del radio y la antena se dispone de un supresor de descargas de marca PolyPhaser, que dispone de un conector para descargas a tierra, tal como se muestra en la Figura 2.38.

**Figura 2.38.** Supresor de descargas atmosféricas PolyPhaser.

En la Figura 2.39 se muestran todos los elementos del sistema de transmisión conectados entre sí.

**Figura 2.39.** Conexión de los elementos del sistema de transmisión.

## 2.9 ENSAMBLAJE Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO

Una vez realizada la simulación del circuito de control, se procede a realizar su ensamblado y construcción, así como el montaje de todos los elementos que constituyen el instrumento en la su caja contenedora.

### 2.9.1 CIRCUITO DE CONTROL

Con los datos del diseño y la simulación se procede a armar el circuito de control y a realizar la primera prueba de operación, tal como se muestra en la Figura 2.40.



**Figura 2.40.** Primera prueba de operación del circuito ensamblado.

### 2.9.2 MONTAJE DE LOS ELEMENTOS EN LA CAJA CONTENEDORA

Los elementos del sistema estarán montados dentro de una caja protectora PELICAN 1600, como la que se muestra en la Figura 2.41 [51]. Esta caja es resistente a los golpes, es hermética al agua y polvo, dispone de una válvula de despresurización que equilibra la presión interior e impide la entrada de agua y dispone de orificios para cerrar la caja con candados. Muchos de los equipos que el IG-EPN utiliza, disponen de este tipo de cajas ya que cumplen con los requisitos de protección y durabilidad para un instrumento portátil y de trabajo en campo.



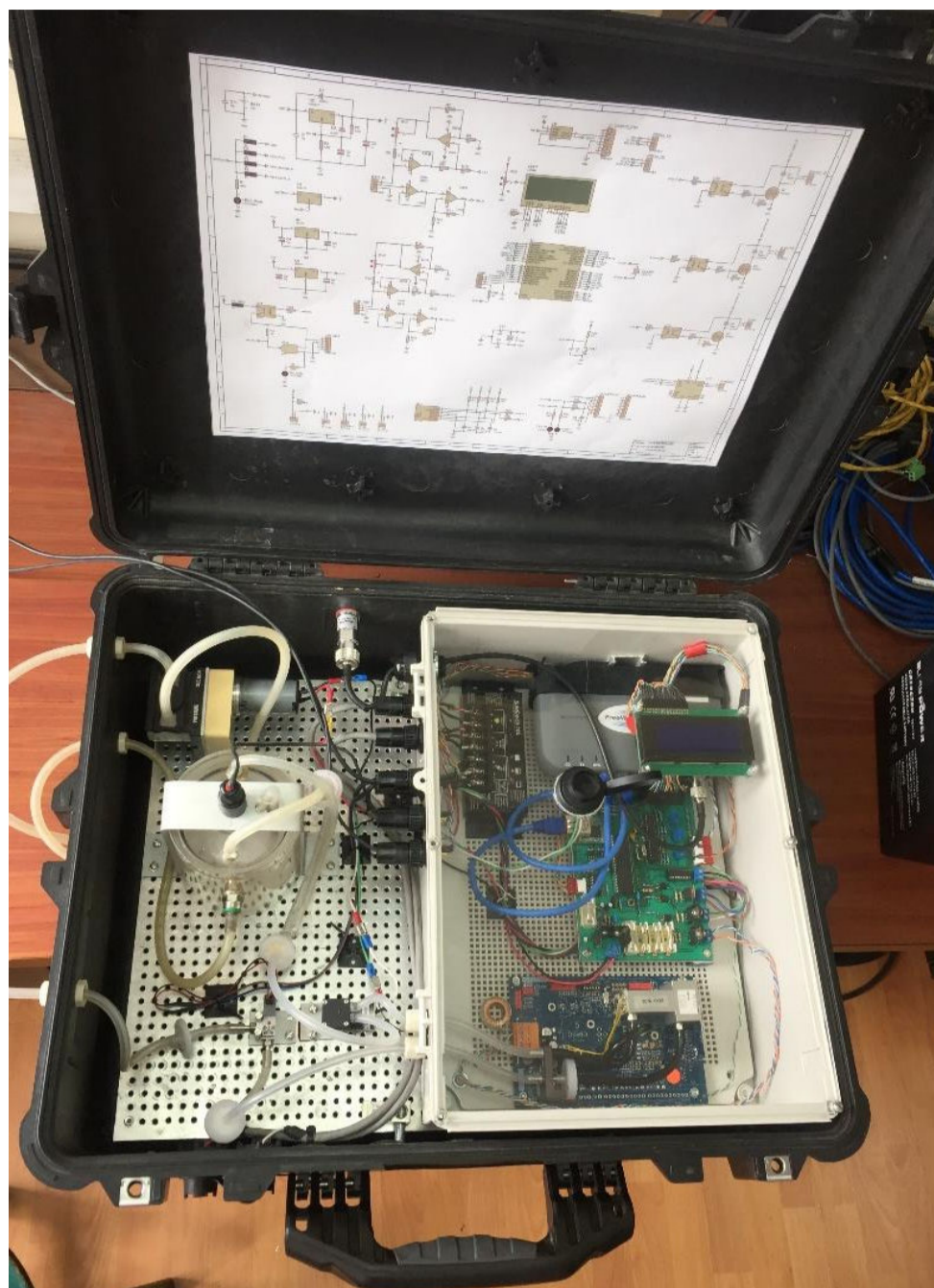
**Figura 2.41.** Caja protectora PELICAN 1600 [51].

En la Figura 2.42 se muestra el proceso de montaje de los elementos del sistema automático.



**Figura 2.42.** Proceso de montaje de los elementos del sistema automático.

Luego de todo el proceso realizado, en la Figura 2.43 se muestra el montaje final del equipo para el sistema automático.



**Figura 2.43.** Equipo final para el sistema automático.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESARROLLO DEL SOFTWARE**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Una vez que se ha diseñado, construido e implementado el hardware del sistema automático, se hace necesario desarrollar e implementar los algoritmos del software que permita operar el sistema, así como capturar, pre-procesar, almacenar, visualizar y transmitir los datos del sistema.

Este capítulo comprenderá tres aspectos principales como son: el código para el micro-controlador, la utilización del software de configuración del convertidor de comunicación serial a Ethernet y el código para la interfaz gráfica.

#### **3.2 FIRMWARE DEL MICROCONTROLADOR**

##### **3.2.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL MICROCONTROLADOR**

En la configuración general del micro-controlador se establecen los parámetros generales de operación tales como:

- Librerías de C necesarias para el manejo de strings, periféricos, tipos de variables y la realización de operaciones matemáticas.
- Designación y configuración de los puertos de comunicación.
- Declaración de variables globales y funciones.

##### **3.2.1.1 Librerías de C**

Durante la operación del sistema automático el micro-controlador deberá procesar cadenas de caracteres y realizar operaciones matemáticas con variables tipo entero y tipo flotante.

Dentro de los recursos disponibles en el compilador en lenguaje C, PCWHC están las librerías `ctype.h`, `stddef.h`, `string.h`, `stdlib.h`, `stdio.h`, las cuales permiten operar strings, así como definir el tipo de variables que se pueden usar dentro del programa.

Durante la configuración existen dos aspectos muy importantes que se debe tomar en cuenta, en primer lugar se debe indicar al compilador con qué modelo o tipo de micro-controlador se va a trabajar, para esto el compilador PCWHC dispone de la librería 18F4550.h y segundo se debe indicar a cuantos bits se realizará la conversión análoga-digital escribiendo la línea de código #device adc=10.

### 3.2.1.2 Designación y configuración de los puertos de comunicación

El sistema automático dispone de tres elementos con los que el micro-controlador deberá establecer una comunicación los cuales son: la memoria SD que maneja comunicación SPI, el GPS y el conversor serial a Ethernet que manejan comunicación RS232.

Debido a que el PIC18F4550 solo dispone de un puerto UART y un puerto SPI y además dichos puertos comparten un pin físico del micro-controlador, se debe utilizar el puerto físico SPI nativo y crear dos puertos UART virtuales, utilizando otros pines físicos del micro-controlador mediante software, tal como se muestra en el siguiente código.

```
#fuses HS, NOWDT, NOPROTECT, CPUDIV1
#use delay(clock=20000000)
#use rs232(baud=4800,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_D4, force_sw,STREAM=GPS,bits=8)
#use rs232(baud=4800,parity=N,xmit=PIN_D5,rcv=PIN_D6,force_sw,STREAM=ETH,bits=8)
```

En el código anterior la segunda línea se utiliza para habilitar la función delay (retardo), en la cual se especifica la frecuencia del oscilador utilizado; para este sistema se utiliza un oscilador de 20 MHz.

La tercera y cuarta línea permiten crear los puertos UART por software (force\_sw) para la comunicación con el GPS (STREAM=GPS) y con el puerto Ethernet (STREAM=ETH), también se puede configurar la velocidad de transmisión en baudios que el micro-controlador utilizará para la recepción y envío de datos, además de definir los pines del micro-controlador tanto para la transmisión serial (xmit=PIN\_C6 para el GPS y xmit=PIN\_D5 para el puerto Ethernet) como para la recepción serial (rcv=PIN\_D4 para el GPS y rcv=PIN\_D6 para el puerto Ethernet).

La velocidad del puerto serial para el GPS es de 4800 baudios, que es la velocidad con la que viene configurada por el fabricante y no se la puede modificar. Por el

contrario la velocidad para el puerto Ethernet se puede modificar de acuerdo a las necesidades.

A continuación se realiza la configuración inicial del puerto SPI; más adelante dentro de la función principal, se realizarán otras configuraciones relacionadas con la velocidad de transmisión y los flancos de la señal.

### 3.2.2 RECEPCIÓN DE DATOS DESDE EL MODULO GPS

A continuación, se procede a elaborar el código para la recepción y el procesamiento de la información que entrega el GPS.

La información que entrega el GPS es muy extensa, por lo que se debe discriminar que parte de esta información es útil. Para el presente caso la información que se necesita, es la hora, la fecha, las coordenadas y la altitud del lugar donde se va a realizar la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto. Como la información antes mencionada se ve afectada por la calidad del enlace y el número de satélites que el receptor puede ver, estos dos datos también deberán ser obtenidos.

En la Tabla 3.1 se presenta las sentencias NMEA 0183 [52] que el GPS GARMIN 18X LVC entrega a través de su puerto serial.

**Tabla 3.1.** Sentencias que entrega el GPS GARMIN 18X LVC, [36], [52].

SENTENCIA	NUMERO MÁXIMO DE CARACTERES	DESCRIPCIÓN
GPRMC	74	Recommended Minimum Specific GPS/TRANSIT Data
GPGGA	82	Global Positioning System Fix Data
GPGSA	66	GPS DOP and Active Satellites
GPGSV	70	GPS Satellites in View

Los detalles de las sentencias que entrega el GPS se detallan en el ANEXO C.

Analizando la información disponible, se determina que las sentencias GPGGA y GPRMC son las únicas sentencias que contienen la información requerida.

Con el objetivo de que el código principal no sea tan extenso, se elabora un archivo de cabecera llamado GPS\_TRAMA, para realizar la adquisición de los datos del GPS. Una parte del código se presenta y explica a continuación:

En la primera parte del archivo de cabecera se define el nombre del archivo y luego se configura nuevamente el puerto de comunicación serial, esto es muy importante, ya que de no hacerlo, no se podrá usar las funciones para el manejo del puerto serial virtual que ha sido creado.

```
#ifndef _GPS_TRAMA
#define _GPS_TRAMA
#use delay(clock=2000000)
#use rs232(baud=4800,parity=N, xmit=PIN_C6,rcv=PIN_D4,force_sw,STREAM=GPS,bits=8)
```

A continuación se define las variables globales del archivo de cabecera, que para este caso serán tipo string y su tamaño está determinado de acuerdo a la información presentada en la Tabla 3.1.

Una vez que las variables han sido definidas, se procede a escribir las funciones para obtener la información necesaria.

A continuación se detalla el funcionamiento de la función `GPS_GPGGA`.

En la primera parte de la función, cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura 3.1, se definen las variables locales que se van a necesitar para la ejecución de la función.

Debido a que la información va a ser extraída de una cadena de caracteres y dentro de esta cadena la información está separada por el delimitador coma (,), es necesario definir un puntero y el delimitador o token.

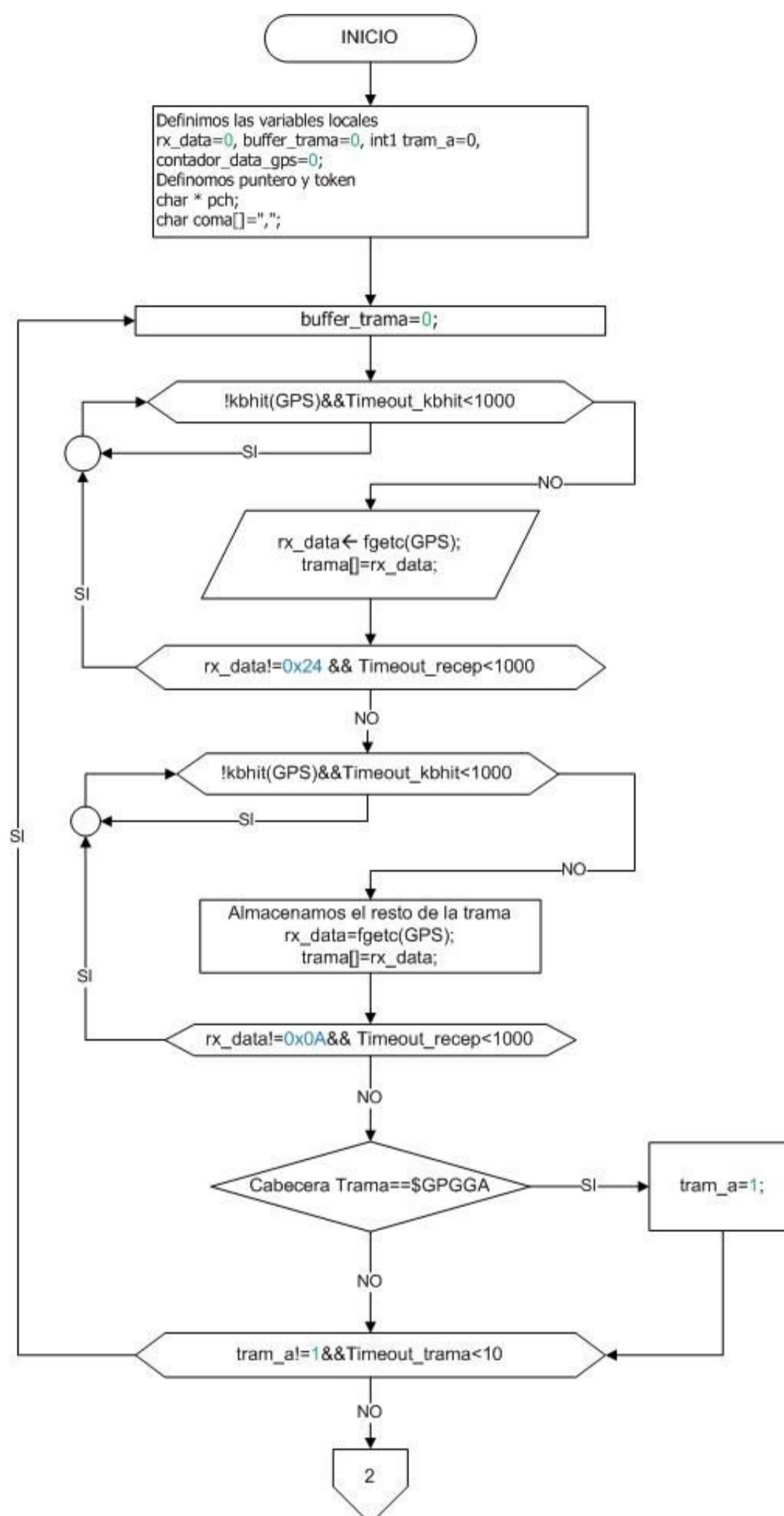
En la rutina propiamente dicha se ha utilizado lazos `while` anidados, esto debido a que no se está usando el puerto serial nativo del micro-controlador y por lo tanto no se puede habilitar las interrupciones de recepción.

El primer paso, es determinar si se ha recibido algún carácter por el puerto serial virtual que se ha creado, para esto se utiliza la función `kbhit` que proporciona el compilador ( El detalle de operación de las funciones del compilador se lo puede encontrar en el manual del compilador [53]). La función `kbhit` entrega un valor de 1 cuando se ha recibido un dato a través del pin de recepción del puerto virtual, por



esta razón es indispensable indicar dentro de la función a que puerto se está señalando, en esta caso es el puerto denominado GPS.

Luego de haber recibido el primer carácter, se verifica si dicho carácter es el símbolo "\$", que marca el inicio de trama y que en hexadecimal tiene el valor de 0X24. Si el carácter recibido es el inicio de trama, se continúa con la recepción del resto de la cadena de caracteres, caso contrario se vuelve a repetir la rutina hasta que el inicio de trama sea recibido o el tiempo de espera se agote.



**Figura 3.1.** Diagrama de flujo de la función de recepción GPGGA.

Una vez finalizada la recepción de la trama, se comprueba si la cabecera de la trama corresponde a la sentencia \$GPGGA en valor hexadecimal (\$=0X24, G=0X47, P= 0X50, G=0X47, G=0X47, A=0X41). Si la trama recibida es la correcta se pone en uno la bandera “tram\_a1” y se finaliza con la adquisición, de lo contrario

el lazo se repite hasta que se obtenga la sentencia correcta o el tiempo de espera concluya, en cuyo caso se envía un mensaje de error en la comunicación con el GPS.

En la segunda parte de la función cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura 3.2, una vez que se ha adquirido la trama, se carga el puntero con la información del delimitador o token y se inicia la búsqueda de la información dentro de la cadena de caracteres, para ello se utiliza un contador que le indicará al puntero a que posición de la cadena debe apuntar para obtener la información requerida, la misma que se irá almacenando en sus respectivas variables hasta que se encuentre el carácter NULL, que indica que se ha llegado al final de la cadena de caracteres. Para la sentencia GPRMC, la función GPS\_GPRMC es implementada de manera similar a la sentencia GPS\_GPGGA, que se describió anteriormente.

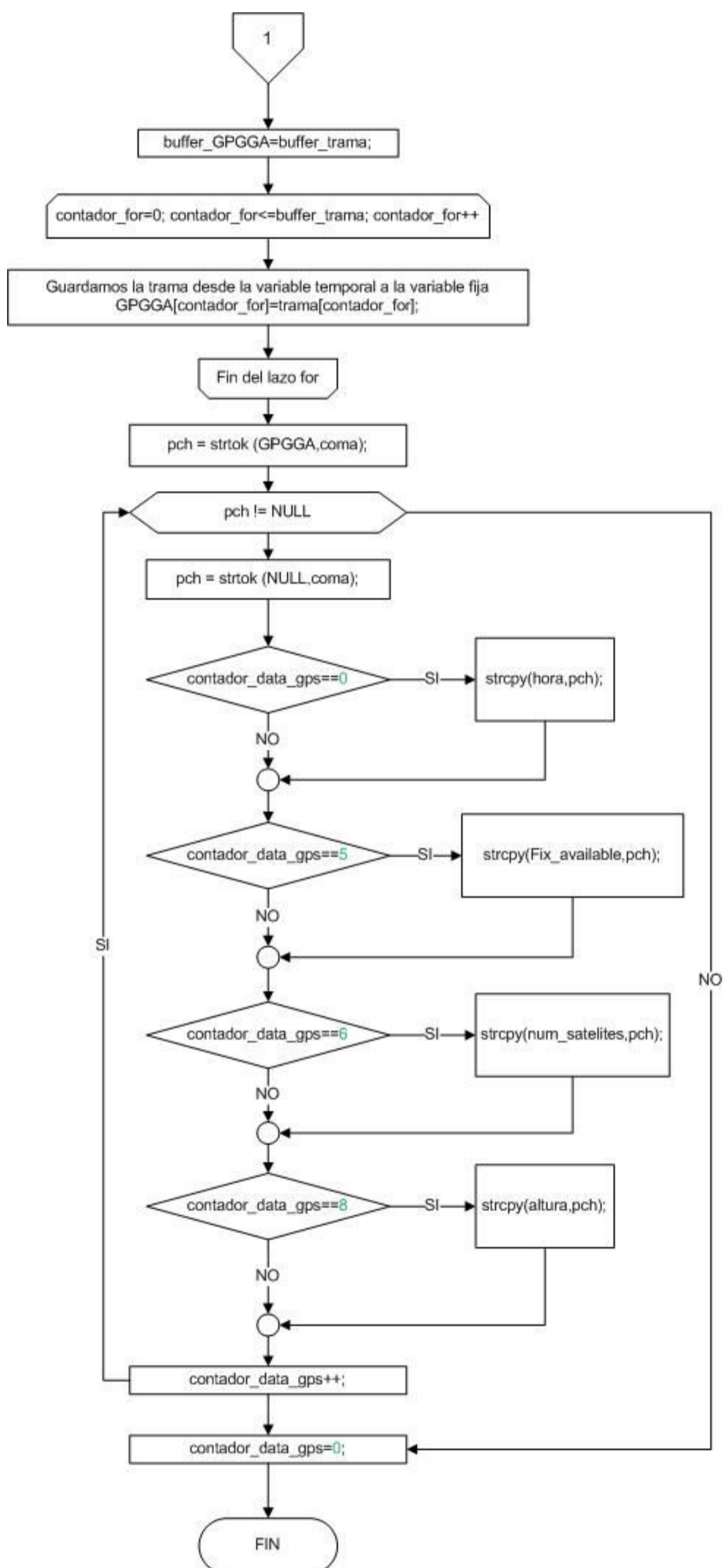


Figura 3.2. Diagrama de flujo de la función GPS\_GPGGA.

### 3.2.3 CONVERSIÓN ANALÓGICA-DIGITAL

Como se había descrito en el numeral 2.4, en la etapa de conversión analógica-digital, las señales de voltaje y corriente que entregan los sensores de temperatura y el sensor infrarrojo, serán digitalizadas mediante el conversor A/D del micro-controlador.

En el micro-controlador PIC18F4550, se debe configurar los registros ADCON0 y ADCON1 que son los registros que permiten manejar el conversor A/D del micro-controlador y cuya descripción se puede obtener del manual del fabricante [32].

#### 3.2.3.1 Conversión A/D de la señal del sensor infrarrojo

Como se señaló en el numeral 2.4.2, la señal de corriente de 0 a 20 mA que entrega el sensor infrarrojo es convertida a un voltaje de 0 a 5 voltios mediante una resistencia. Como el conversor del micro-controlador PIC18F4550 está configurado a 10 bits entonces el valor máximo que se puede alcanzar en el registro del conversor es:

$$\text{Valor máximo del registro del A/D} = 2^{\#bits} - 1 = 1023 \quad (3.1)$$

Por lo tanto si se toma el valor digitalizado y se divide para el valor máximo que se puede obtener, el valor obtenido será el voltaje a la entrada del conversor A/D, pero como el objetivo es conocer la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> entre 0 y 30%, se debe multiplicar el valor de la relación anterior por 30 y entonces se obtiene la variación de la concentración en porcentaje, como se muestra en la ecuación (3.2).

$$\%CO_2 = \frac{\text{Valor del A/D}}{1023} \cdot 30 \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2), se escribe en el código del micro-controlador como se muestra a continuación:

```
concent_CO2=30.0*AD_DATA/1023.0;
```

### 3.2.3.2 Conversión A/D de la señal de los sensores de temperatura

El análisis y el código utilizado en el numeral anterior también es válido para la digitalización de las señales de los sensores de temperatura, pero para este caso se debe añadir un paso más, ya que la medición de la temperatura se hace indirectamente midiendo el valor de resistencia de los RTD.

Se obtiene el valor de resistencia del RTD mediante la ecuación (3.3):

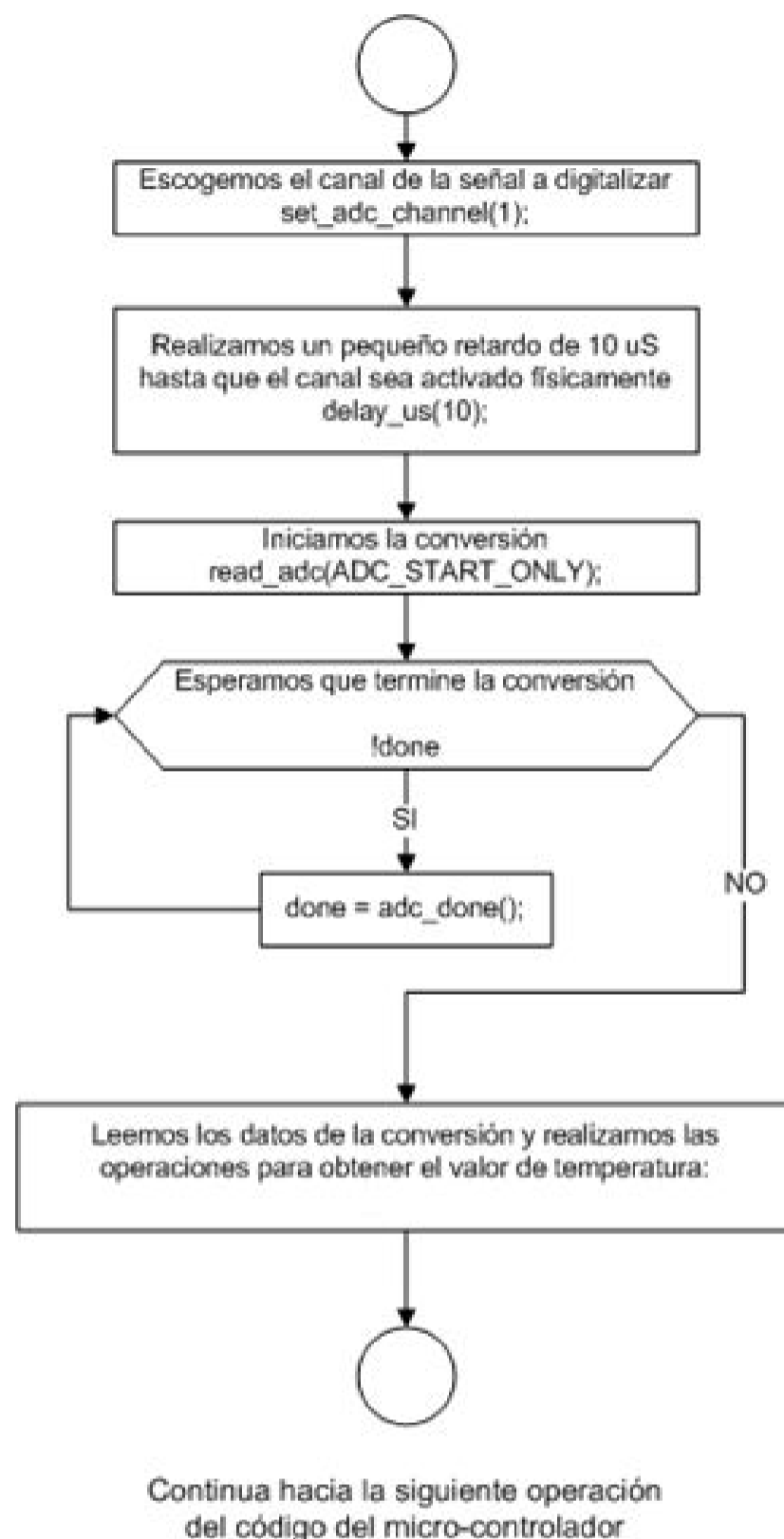
$$RTD = \left( \frac{\text{Valor del A/D}}{1023} \cdot 500 \right) - 2,1[\Omega] \quad (3.3)$$

En el caso de los RTD, el valor obtenido del conversor A/D se multiplica por un valor de 500, debido a que el valor obtenido es el valor de la resistencia; si se multiplica solamente por un valor de 5, se obtiene el valor de voltaje y este valor no puede ser usado directamente para calcular el valor de temperatura. El valor de 2.1[Ω], que se resta del valor total, es el valor de compensación por el efecto del auto calentamiento y de la amplificación de la señal, como se explicó en los numerales 2.4.1.2 y 2.4.1.4.

A partir de las ecuaciones (2.13) y (2.14), se puede calcular el valor de temperatura como se muestra en la ecuación (4.6):

$$T = \frac{(RTD - 100,0)}{0,385} \quad (3.4)$$

En la Figura 3.3 se presenta el diagrama de flujo de la rutina de digitalización de las señales de los sensores de temperatura, este diagrama de flujo también se ajusta a la rutina de digitalización del sensor infrarrojo.



**Figura 3.3.** Diagrama de flujo de la rutina de digitalización de las señales de los sensores de temperatura.

### 3.2.4 INICIALIZACIÓN, ESCRITURA Y LECTURA DE LA MEMORIA SD

En este numeral se tratará sobre el manejo de la memoria SD por parte del micro-controlador PIC, durante el almacenamiento y lectura de los datos adquiridos por el PIC a través del conversor A/D.

Para el trabajo desarrollado a continuación, se ha tomado como referencia la información presentada en [54], [55] y [56].

De acuerdo a la información del fabricante las memorias SD poseen dos protocolos de comunicación, la nativa o estándar BUS SD cuya asignación de pines para

varios modelos de memorias SD se muestra en el ANEXO C y el protocolo tipo serial SPI cuya asignación de pines se presentó en la Tabla 2.17.

Debido a que el PIC18F4550 dispone del protocolo SPI y que el tipo de datos que se va a obtener en el sistema no requieren una velocidad alta de almacenamiento, para la comunicación con la memoria SD se utiliza el protocolo SPI.

En la comunicación con la memoria SD mediante protocolo SPI, se utilizan sólo las líneas de comunicación **DATA IN**, **DATA OUT**, **CS** y **CLK**. La memoria recibe los comandos y datos desde el micro-controlador a través de la línea DATA IN y responde a los comandos o envía datos por DATA OUT. La memoria es habilitada cuando el terminal CS se encuentra en nivel bajo; mientras que la señal de CLK que se envía desde el PIC es la que establece la velocidad de la comunicación.

#### 3.2.4.1 Comandos para el protocolo SPI

Los comandos SD para el protocolo SPI tienen una longitud de 6 bytes y la transmisión inicia con el byte más significativo (MSB) [45], como se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Formato del comando para la tarjeta SD en protocolo SPI [45].

Byte 1				Bytes 2–5				Byte 6		
7	6	5	0	31			0	7	0	
0	1	Command		Command Argument				CRC		1

En la Tabla 3.2, el primer byte es el comando propiamente dicho, del byte 2 al 5 se envía el argumento. Por ejemplo para el caso del CMD16, el argumento es el tamaño del sector para leer o escribir los datos; y el byte 6 es el byte de verificación de errores.

Algunos de los comandos más utilizados en la comunicación SPI con una memoria SD se presentan en la Tabla 3.3.



**Tabla 3.3.** Comandos del protocolo SPI para el manejo de una memoria SD [45].

CMD INDEX	SPI Mode	Argument	Resp	Abbreviation	Command Description
CMD0	Yes	None	R1	GO_IDLE_STATE	Resets the SD Card
CMD1	Yes	None	R1	SEND_OP_COND	Activates the card's initialization process.
CMD2	No				
CMD3	No				
CMD4	No				
CMD5	Reserved				
CMD6	Reserved				
CMD7	No				
CMD8	Reserved				
CMD9	Yes	None	R1	SEND_CSD	Asks the selected card to send its card-specific data (CSD).
CMD10	Yes	None	R1	SEND_CID	Asks the selected card to send its card identification (CID).
CMD11	No				
CMD12	Yes	None	R1b	STOP_TRANSMISSION	Forces the card to stop transmission during a multiple block read operation.
CMD13	Yes	None	R2	SEND_STATUS	Asks the selected card to send its status register.
CMD14	No				
CMD15	No				
CMD16	Yes	[31:0] block length	R1	SET_BLOCKLEN	Selects a block length (in bytes) for all following block commands (read & write). <sup>1</sup>
CMD17	Yes	[31:0] data address	R1	READ_SINGLE_BLOCK	Reads a block of the size selected by the SET_BLOCKLEN command. <sup>2</sup>
CMD18	Yes	[31:0] data address	R1	READ_MULTIPLE_BLOCK	Continuously transfers data blocks from card to host until interrupted by a STOP_TRANSMISSION command.
CMD19	Reserved				
CMD20	No				
CMD21 ... CMD23	Reserved				
CMD24	Yes	[31:0] data address	R1 <sup>3</sup>	WRITE_BLOCK	Writes a block of the size selected by the SET_BLOCKLEN command. <sup>4</sup>
CMD25	Yes	[31:0] data address	R1	WRITE_MULTIPLE_BLOCK	Continuously writes blocks of data until a stop transmission token is sent (instead of 'start block').

### 3.2.4.2 Inicialización de la memoria SD

Como se había mencionado anteriormente, el protocolo nativo de la memoria SD es el BUS SD, por lo tanto antes de poder grabar o leer datos en la memoria se debe cambiar a modo SPI, para ello se pone en nivel lógico cero el pin CS (Chip Select) y se envía el CMD0, si la memoria cambia su modo satisfactoriamente enviara la respuesta R1=0X01; a continuación se envía el CMD1 para inicializar la memoria y esta debe enviar la respuesta R1=0x00 y por último se envía el CMD16 para indicar el tamaño del bloque a escribir. El tamaño por defecto del bloque para escritura es de 512 bytes y no puede ser cambiado, mientras que para lectura este tamaño puede ser menor.

Cabe mencionar que la memoria SD en modo SPI puede operar en cuatro modos de velocidad que son: SPI\_CLK\_DIV\_4, SPI\_CLK\_DIV\_16, SPI\_CLK\_DIV\_64 y SPI\_CLK\_T2. El proceso de inicialización deberá ser realizado a una baja

velocidad, por ejemplo  $SPI\_CLK\_DIV\_64 = F_{osc}/64$ , para luego incrementar la velocidad en el proceso de lectura y escritura.

Algo importante, que no se debe olvidar durante la inicialización de la tarjeta SD, es poder determinar si la tarjeta es una SDSC (Security Digital Standar Capacity) o una memoria SDHC (Security Digital High Capacity), para ello luego del CMD0 se envía el CMD8, si se obtiene una respuesta  $R1=0X01$  la memoria es una SDHC; pero si se obtiene una respuesta  $R1=0X04$ , la memoria es una SDSC y se continua con la inicialización anteriormente descrita.

En la Figura 3.4 se muestra el diagrama de flujo del código de la inicialización de la memoria SD.

#### **3.2.4.3 Escritura y lectura de datos.**

Una vez inicializada la memoria SD, se puede almacenar en ella los datos obtenidos por el micro-controlador a través del módulo A/D, así como también leer estos datos cuando sea necesario.

En la información que se presenta en la Tabla 3.3, se observa que los comandos para la lectura y escritura de datos son los comandos CMD17 y CMD 24 respectivamente; estos comandos se envían de la misma manera que los comandos de inicialización y una vez recibida la respuesta adecuada desde la memoria SD, se procede a escribir o leer los datos según se requiera.

En la Figura 3.5 y Figura 3.6 se muestran los diagramas de flujo de los programas de escritura y lectura de datos en la memoria SD respectivamente.

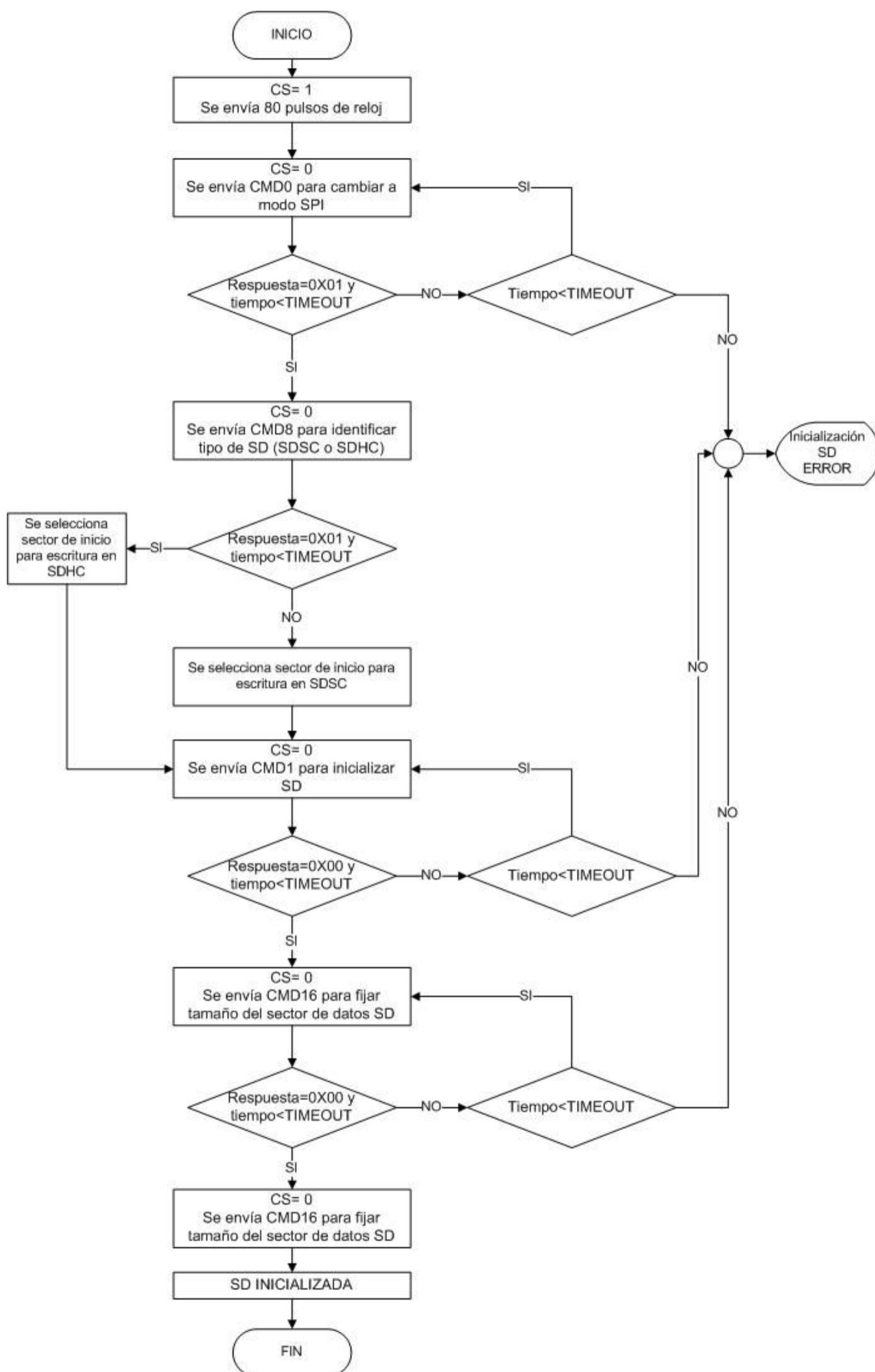
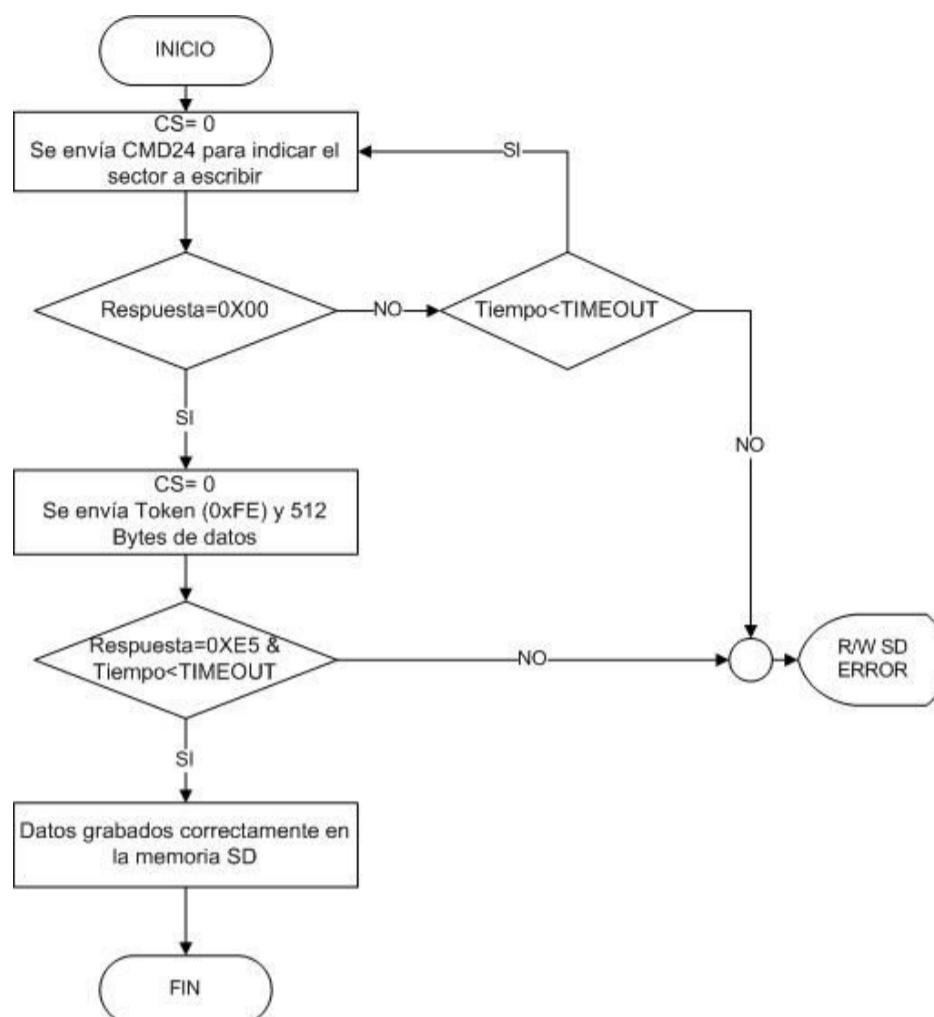
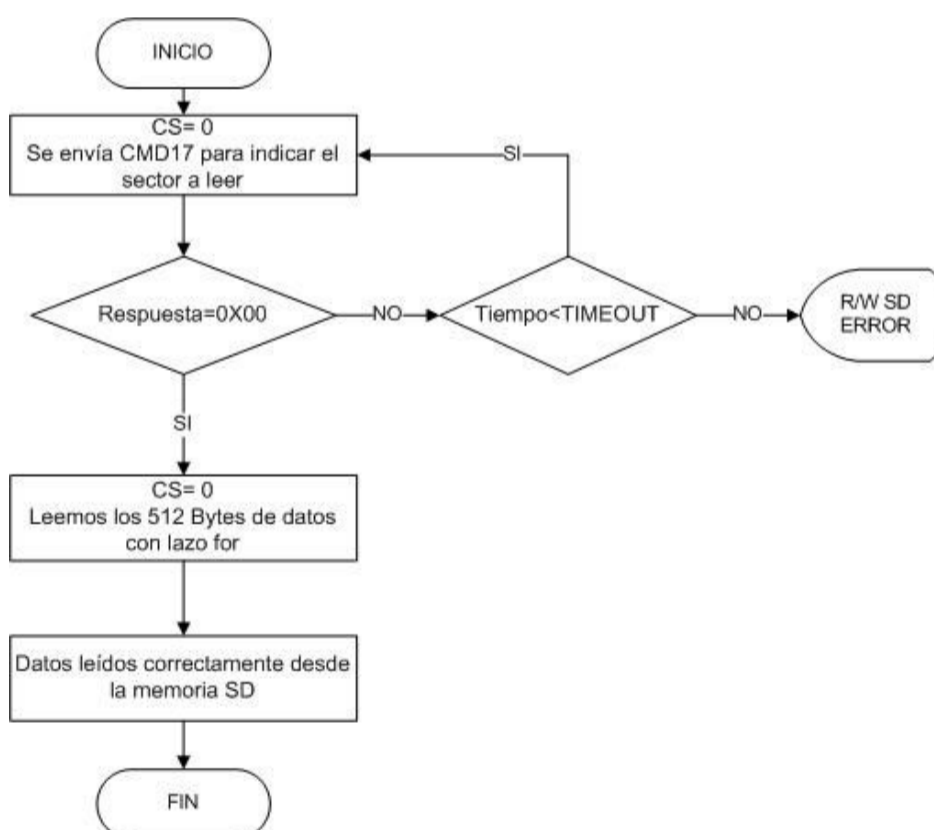


Figura 3.4. Diagrama de flujo del programa de inicialización de la memoria SD.



**Figura 3.5.** Diagrama de flujo del programa de escritura de datos en la memoria SD.



**Figura 3.6.** Diagrama del programa para la lectura de datos desde la memoria SD.

### 3.2.5 ENVÍO DE DATOS POR EL PUERTO ETHERNET

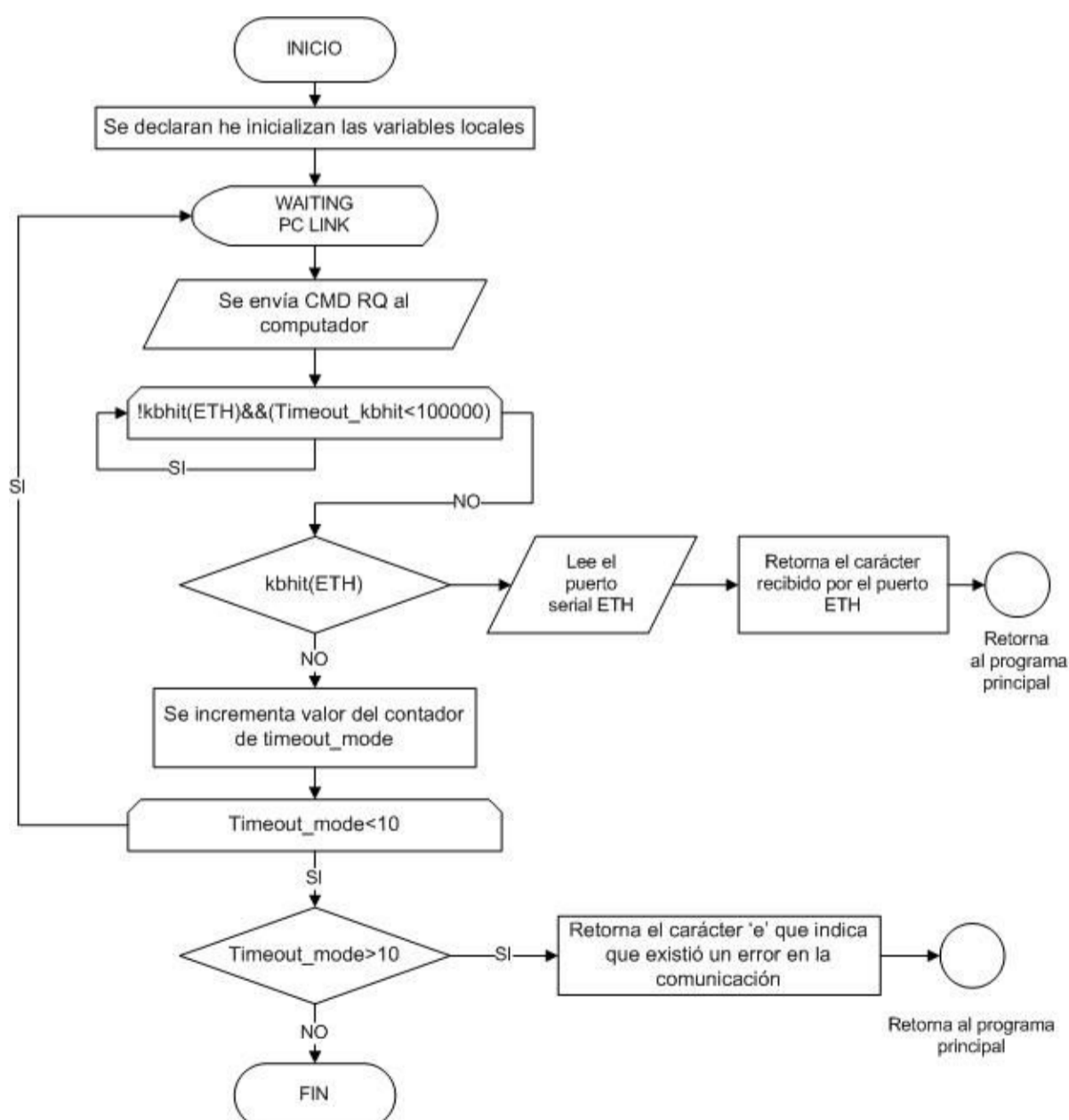
El código necesario para realizar la transmisión de datos a través del puente serial Ethernet, no es extenso, ni complicado, ya que la conversión de protocolo serial a Ethernet es realizada internamente por el convertidor serial a Ethernet y es transparente para el usuario.

El primer paso a realizar es la configuración un puerto serial en el micro-controlador, por el cual se enviará en protocolo serial los datos hacia el puente, tal como fue realizada en el numeral 3.2.1.2.

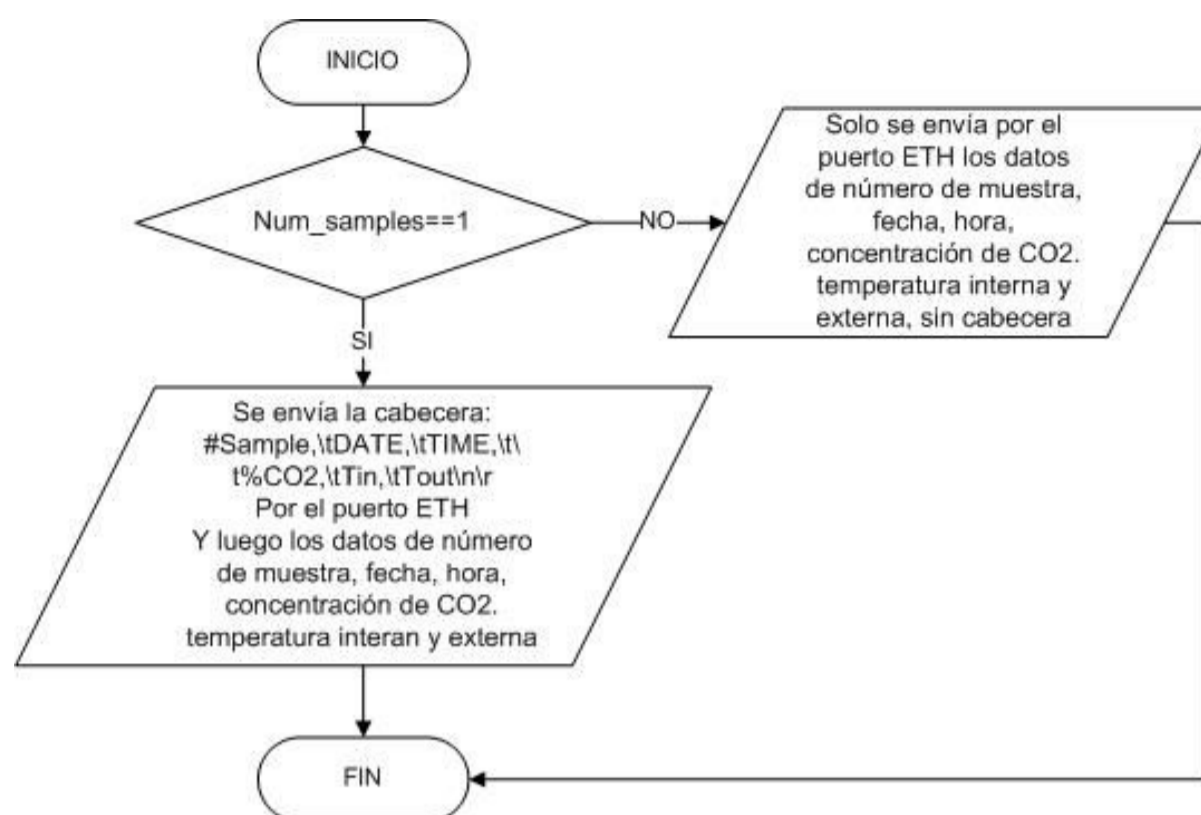
```
#use rs232(baud=4800,parity=N,xmit=PIN_D5,rcv=PIN_D6,force_sw,STREAM=ETH,bits=8)
```

A continuación se utiliza la subrutina PC\_LINK, que tiene como función establecer la comunicación con el computador y cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura 3.7.

Una vez que la comunicación con el computador ha sido establecida, el micro-controlador envía la información mediante la subrutina SEND\_DATA\_ETH cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 3.8.



**Figura 3.7.** Diagrama de flujo de la subrutina PC\_LINK, para realizar la comunicación con el computador.

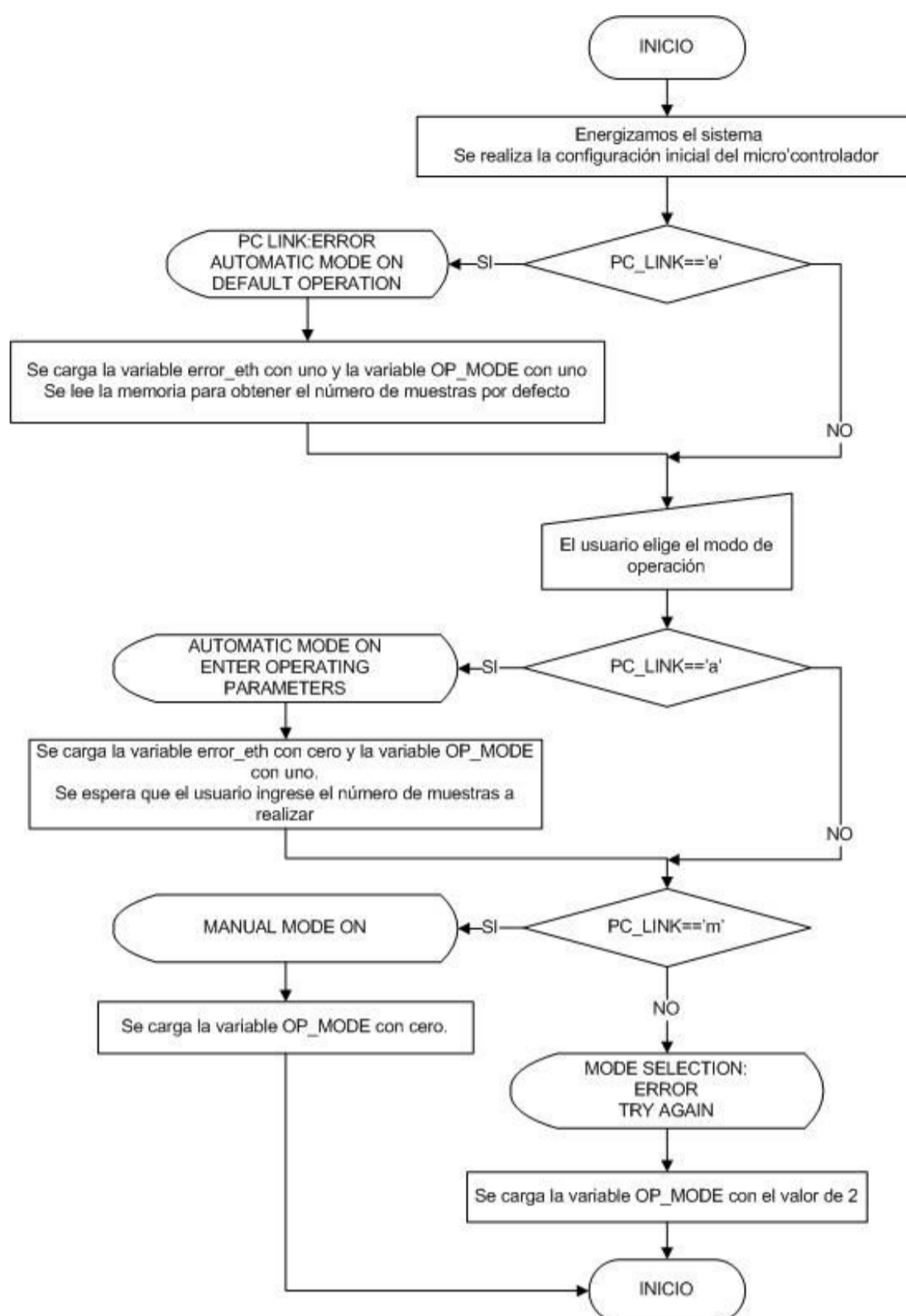


**Figura 3.8.** Subrutina SEND\_DATA\_ETH, para el envío de datos por el puerto Ethernet.

### 3.2.6 MODOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO

A pesar de que el sistema es diseñado para operar de manera autónoma, este también dispondrá de una opción para ser operado manualmente por una persona a través de un computador.

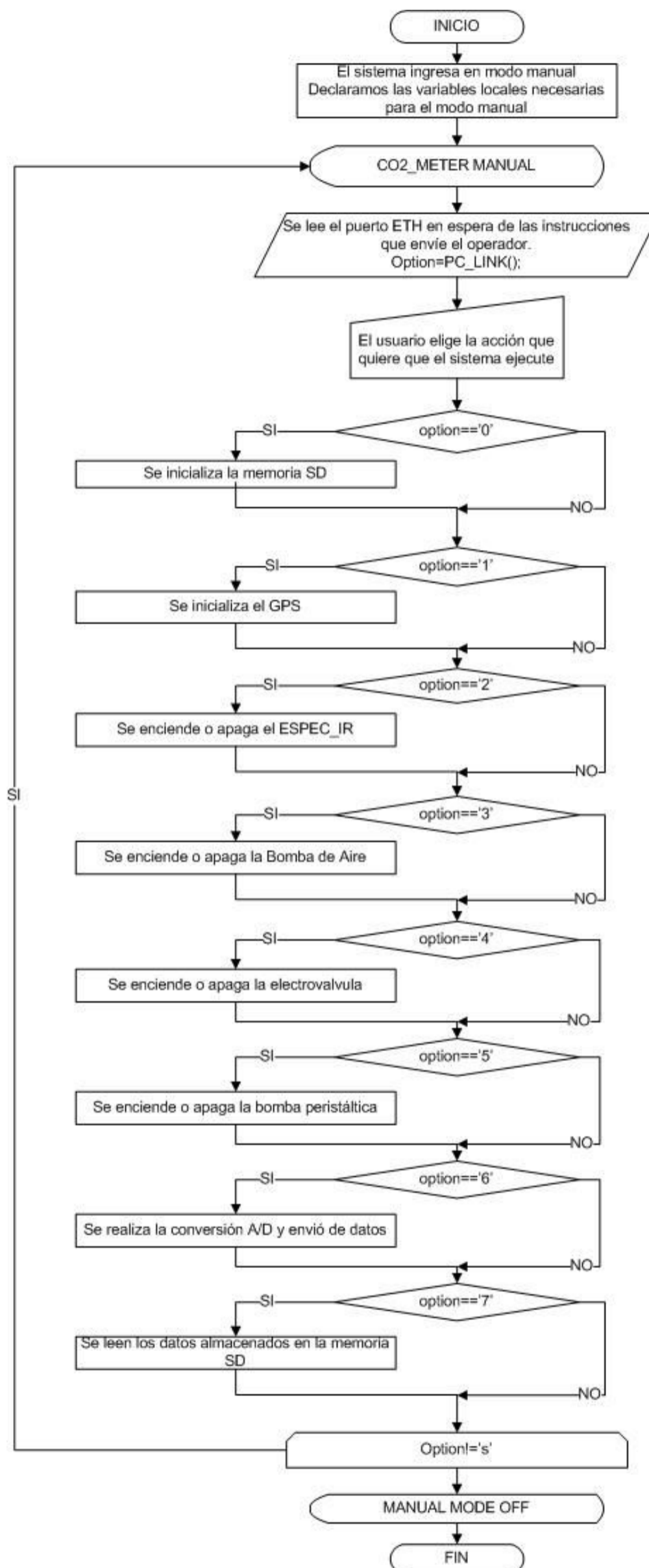
En la Figura 3.9, se muestra el diagrama de flujo de la subrutina implementada para la selección del modo de operación. Una vez que el sistema ha sido encendido, intentará establecer conexión con el computador a través del puerto Ethernet, para recibir el comando que le indique en qué modo de operación se realizarán las mediciones; si luego de un determinado tiempo el sistema no recibe ninguna orden a través del puerto Ethernet, el sistema pasara a modo automático por defecto.



**Figura 3.9.** Subrutina para seleccionar el modo de operación del sistema.

### 3.2.6.1 Modo Manual

En este modo, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 3.10, quien opere el sistema podrá decidir la cantidad de muestras que el sistema adquiere, el tiempo de precalentamiento del espectrómetro infrarrojo o el momento en que las bombas y electroválvulas son activadas o desactivadas. Este modo de operación se podrá utilizar principalmente para la verificación del funcionamiento de todos los elementos del sistema o cuando se requiera hacer mediciones rápidas, en lugares donde no se pueda instalar el instrumento por un determinado período de tiempo, por razones de logística o seguridad.



**Figura 3.10.** Diagrama de flujo del modo de operación manual del sistema.



### 3.2.6.2 Modo Automático

El modo automático, será el modo normal de operación y se utilizará en los casos donde se requiera una monitorización por un mediano o largo período de tiempo y existan las condiciones para la instalación del instrumento.

En la Figura 3.11 se detalla el diagrama de flujo del modo de operación automático.

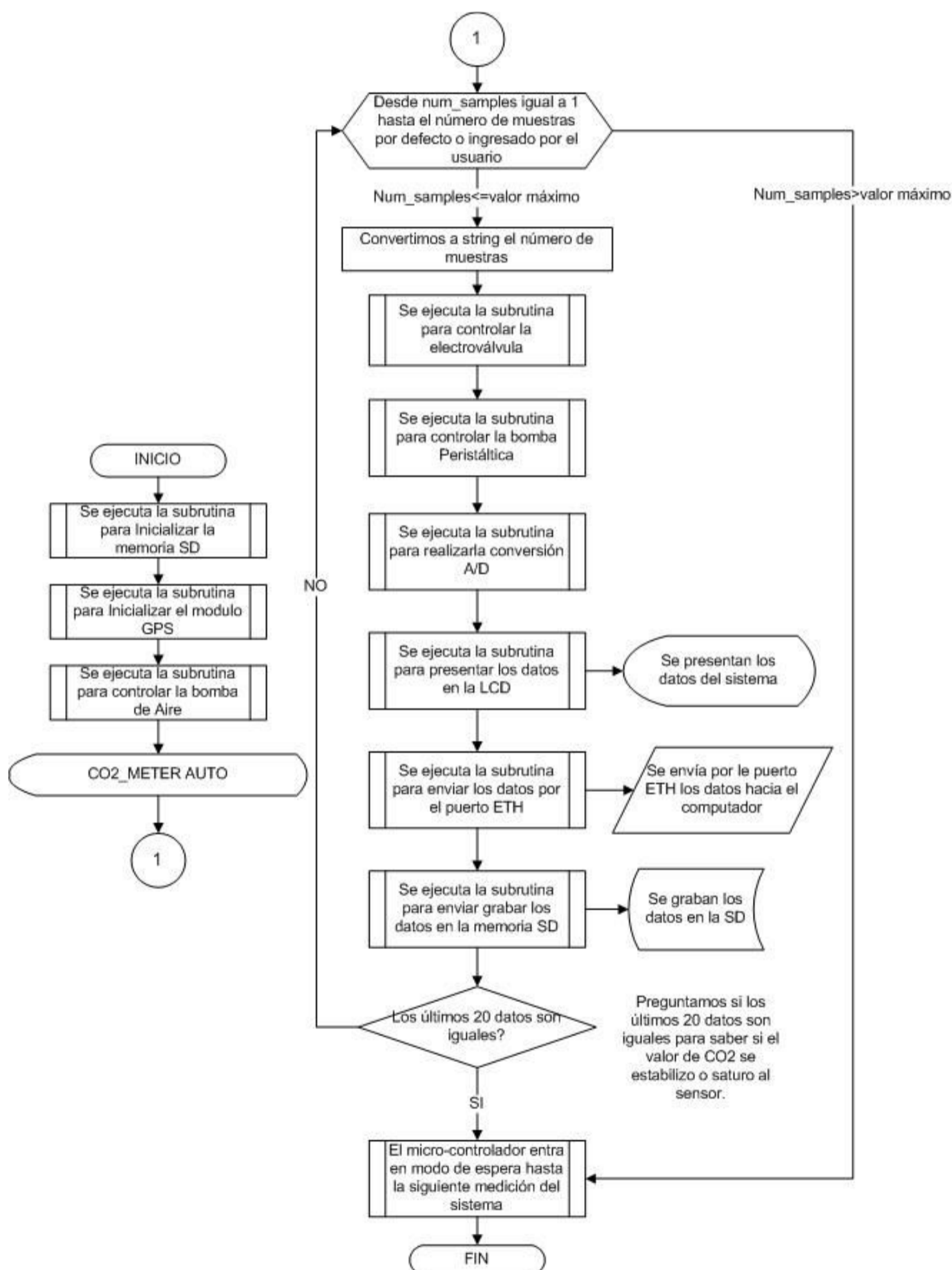
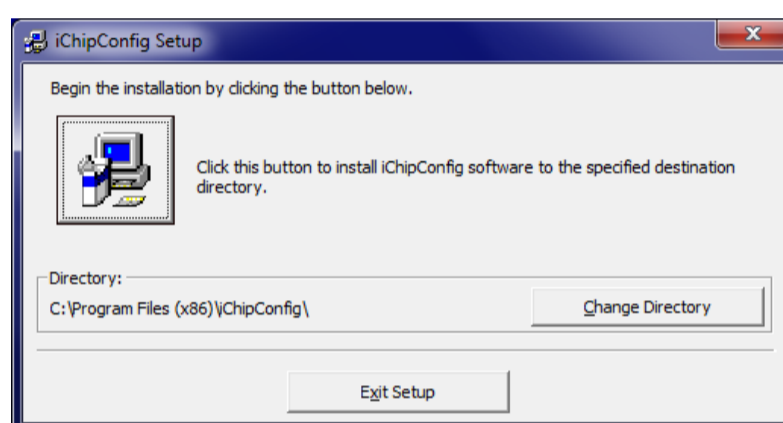


Figura 3.11. Diagrama de flujo del modo de operación automático del sistema.

### 3.3 CONFIGURACIÓN DEL CONVERTIDOR DE PROTOCOLO SERIAL A ETHERNET

#### 3.3.1 INSTALACIÓN DEL UTILITARIO ICHIPCONFIG

Para realizar la configuración del puente convertidor NanoLan Reach de protocolo serial a protocolo Ethernet, se debe instalar el utilitario iChipConfig como se muestra en la Figura 3.12.

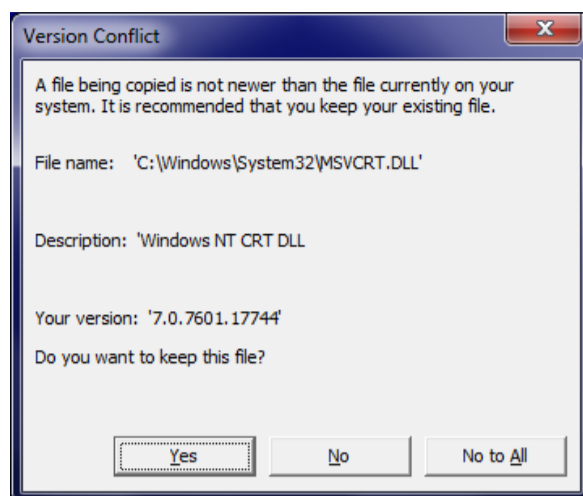


**Figura 3.12.** Ventana de instalación el utilitario iChipConfig.

De acuerdo al fabricante, el computador debe disponer del sistema operativo Windows XP y un puerto serial COM.

Debido a que el utilitario fue actualizado por última vez en el año 2012, los requerimientos del sistema son obsoletos, por lo tanto se procedió a instalar el utilitario sobre el sistema operativo Windows 7. Durante la instalación se generaron reportes de librerías incompatibles, como se muestra en la Figura 3.13, estos problemas se solucionan seleccionando la carpeta Archivos de programa (x86) como carpeta de destino de la instalación y seleccionando la opción YES cuando el instalador informa sobre un conflicto de versiones y pregunta si se desea mantener la versión actual del archivo que tiene el conflicto.

Con respecto a la disponibilidad de puerto serial físico, la mayoría de computadores actuales ya no se fabrican con estos puertos físicos, este problema se puede solucionar utilizando un convertidor serial a Ethernet que existen disponibles en el mercado.

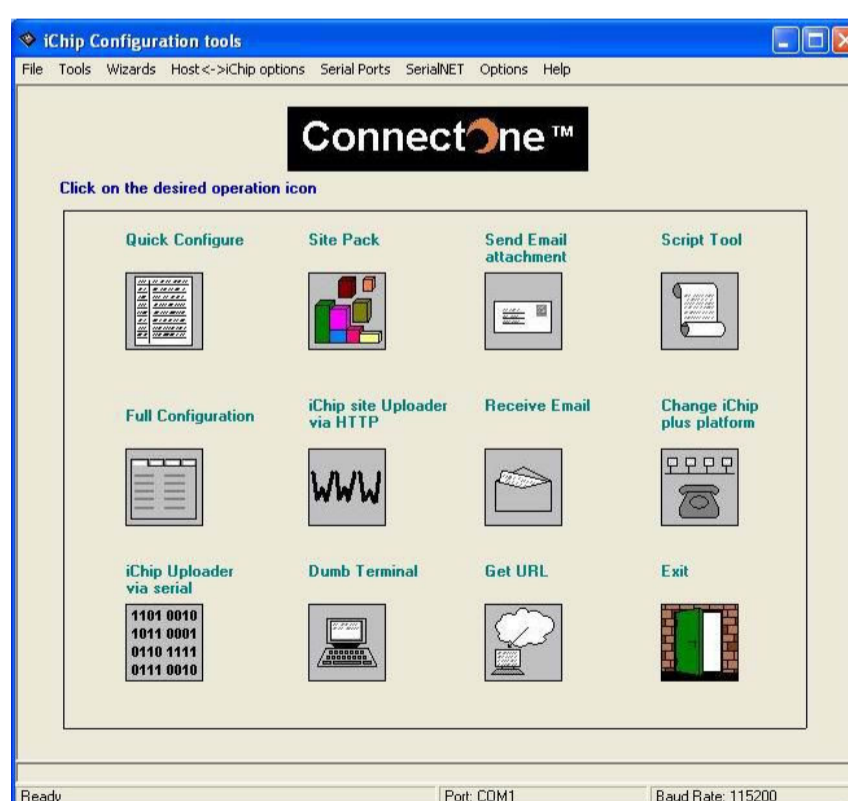


**Figura 3.13.** Ventana que informa sobre el conflicto de las versiones.

Una vez que el utilitario ha sido instalado, se debe seguir el procedimiento que se detalla en el manual del fabricante [57]. A continuación se explican los puntos más importantes y necesarios de la configuración del puente convertidor para inicializarlo.

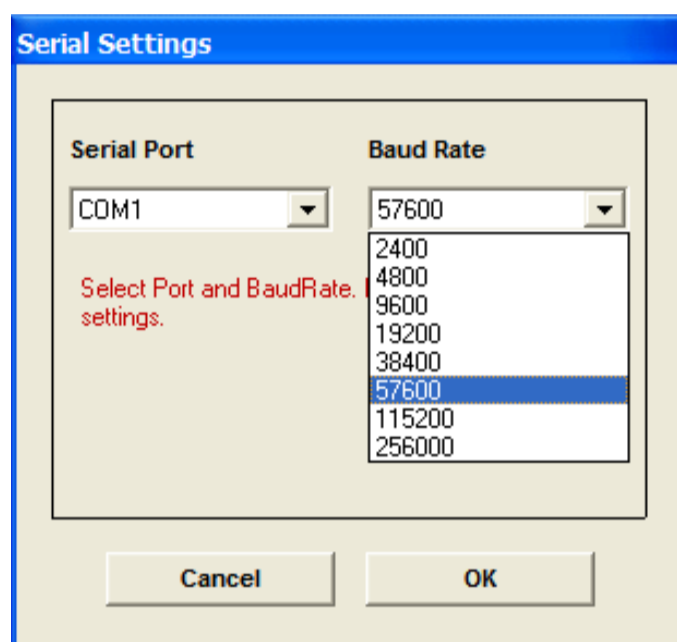
### 3.3.2 CONFIGURACIÓN DEL CONVERTIDOR SERIAL A ETHERNET MEDIANTE EL UTILITARIO ICHIPCONFIG A TRAVÉS DEL PUERTO SERIAL

Cuando se ejecuta el utilitario aparece la ventana que se muestra en la Figura 3.14, donde se debe seleccionar la opción “Quick Configure”, que aparece en la parte superior izquierda de la ventana.



**Figura 3.14.** Ventana de herramientas para la configuración del convertidor serial a Ethernet.

Una vez seleccionada la opción “Quick Configure”, se abre la ventana de la Figura 3.15, donde se puede configurar el puerto serial que se va a utilizar para la comunicación y la velocidad a la que queremos conectarnos con el convertidor, por defecto la velocidad es 115200 baudios, la misma que puede ser modificada una vez se ingrese a la configuración del convertidor.



**Figura 3.15.** Ventana para la configuración de la conexión serial.

Si la conexión a través del puerto serial fue exitosa se obtendrá el mensaje de la Figura 3.16. Si la conexión no fue exitosa, el programa volverá a la ventana de configuración de la conexión serial, donde se deberá seleccionar otra velocidad de conexión.



**Figura 3.16.** Mensaje de conexión exitosa entre el computador y el convertidor serial a Ethernet.

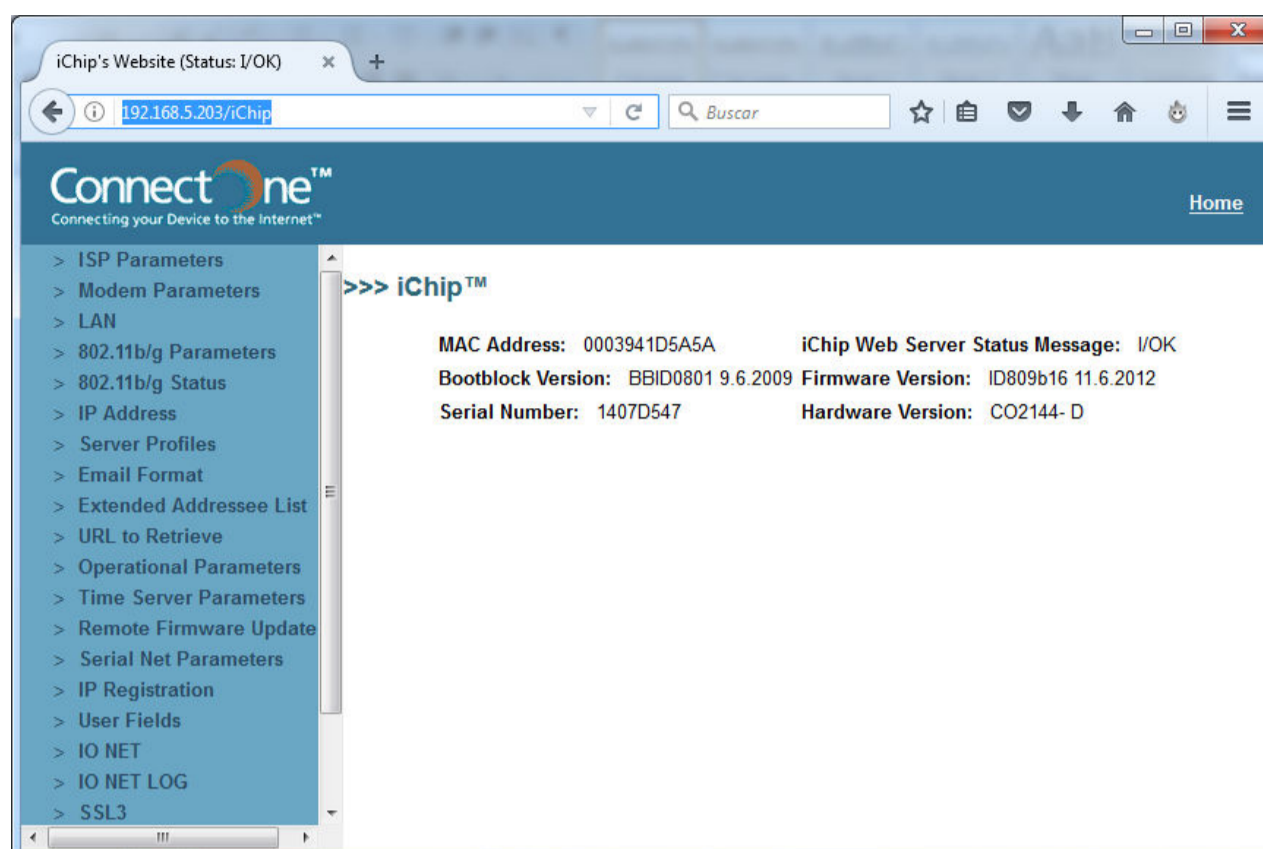
En la Figura 3.17, se presenta la ventana de configuración rápida. En la cual se, puede asignar al dispositivo la dirección IP que nos permita acceder a la configuración mediante un buscador web, además se puede conocer su dirección MAC.

**Figura 3.17.** Ventana de configuración rápida del convertidor serial a Ethernet.

A continuación se puede abandonar el utilitario iChipConfig e ingresar al dispositivo por medio de un navegador web.

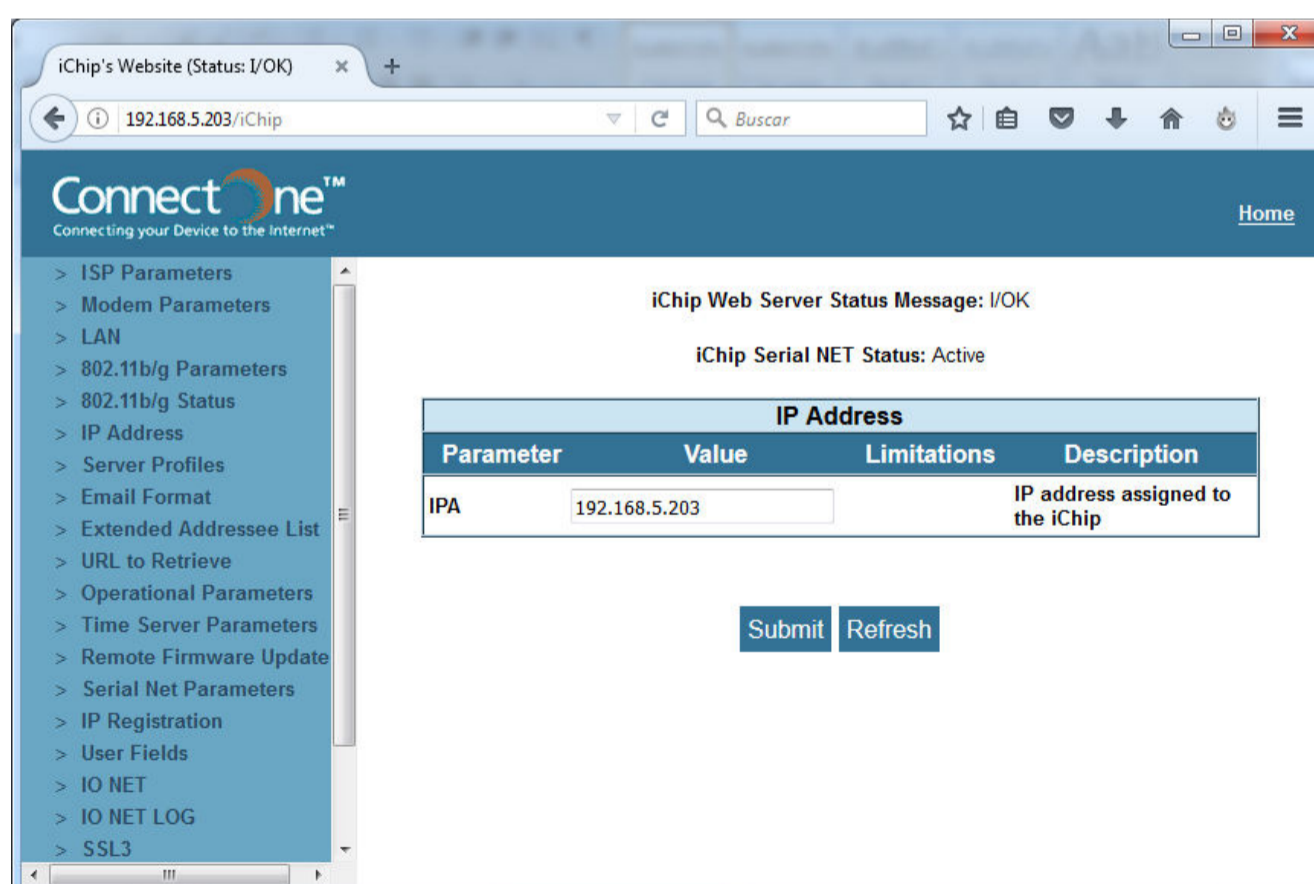
### 3.3.3 CONFIGURACIÓN DEL CONVERTIDOR SERIAL A ETHERNET A TRAVÉS DE UN NAVEGADOR WEB

Una vez que se ha asignado una dirección IP al convertidor serial a Ethernet, se debe asignar una dirección IP al computador en el mismo segmento de red, luego de esto, en cualquier navegador web que se disponga, se digita la dirección IP del dispositivo y se ingresa a la ventana que se muestra en la Figura 3.18.



**Figura 3.18.** Ventana de inicio del dispositivo mediante un navegador web.

Tal como se puede observar en la Figura 3.19 y Figura 3.20, mediante el menú de opciones que se encuentra en la parte izquierda de la ventana, se puede ingresar a toda la configuración del dispositivo. Se puede asignar una nueva dirección IP, se puede configurar los parámetros de la red serial, indicar la dirección IP del servidor al cual se va a enviar los datos, etc.



**Figura 3.19.** Configuración de la dirección IP del convertidor serial a Ethernet, mediante un navegador web.

The screenshot shows a web browser window with the URL 192.168.5.203/iChip. The page title is "iChip's Website (Status: I/OK)". The main content area is titled "Connect One™" with the tagline "Connecting your Device to the Internet™". A navigation menu on the left lists various configuration options, with "Serial Net Parameters" selected. The main content area displays a table of "Serial Net Parameters" with columns for Parameter, Value, Limitations, and Description.

Parameter	Value	Limitations	Description
HSRV	192.168.5.200:23	64 chars	Host Server & Port
DSTR		32 chars	Disconnection String
<input checked="" type="checkbox"/> Send DSTR			
LPRT	23	0..65,535	Listen Port
MBTB	2048	0..2048	Max bytes to buffer
MTTF	100	0..65,535	Max timeout to Flush (ms)
FCHR		4 chars	Flush Character
MCBF	0	0..1460	Maximum characters before Flush
IATO	0	0..65,535	Inactivity Timeout (sec)
SNSI	4,8,N,1,0	9 chars	Serial Net Serial Interface
STYP	0	0..2	Socket Type
AWS	3	0..3, 100, 200-203	Activate Web Server
SNRD	0	0..3600	Serial Net Reinitialization Delay
PTD	0	0..65,535	Packets to Discard

**Figura 3.20.** Configuración de la red serial del convertidor serial a Ethernet mediante un navegador web.

### 3.4 DESARROLLO DE LA INTERFÁZ GRÁFICA

Para realizar el control del sistema de medición de la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto en fuentes naturales de agua, se implementó una interfaz gráfica en el software de programación gráfica LabVIEW 2103.

#### 3.4.1 PANTALLA DE INICIO

En la Figura 3.21 se presenta la pantalla de inicio de la interfaz gráfica que permite controlar y acceder a la información del sistema automático.

La pantalla contiene un esquema general del sistema, así como un menú de opciones, mediante el cual, el usuario puede operar el sistema tanto en modo manual como automático. Además de los modos de operación, el usuario puede acceder a una ventana de información mediante la opción ACERCA o cerrar la aplicación, mediante la opción SALIR.

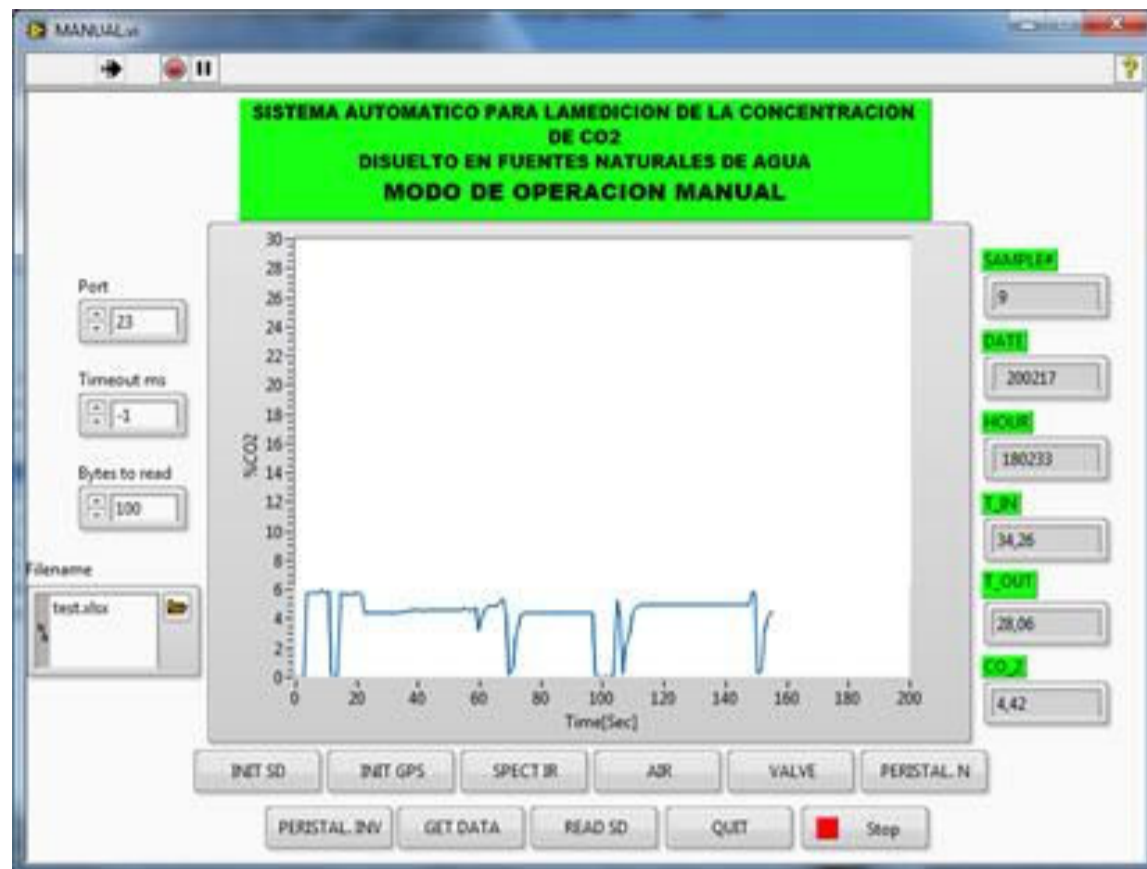


**Figura 3.21.** Pantalla de inicio de la interfaz gráfica para el control del sistema.

#### 3.4.2 MODO DE OPERACIÓN MANUAL

Si el usuario elige el modo manual de operación, se desplegará la ventana que se muestra en la Figura 3.22.





**Figura 3.22.** Ventana para la operación manual del sistema.

La ventana de operación manual, está compuesta de cuatro zonas principales. La primera zona ubicada en la parte izquierda, permite al usuario configurar el puerto por el cual el servidor va a escuchar al instrumento instalado en campo, el tiempo de espera hasta que se realice la conexión, la cantidad de bytes de información a recibir y el nombre del archivo que se generará con los datos del sistema. En la zona central se presenta una gráfica de la variación de los valores de la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto. En la zona derecha el usuario puede observar el número de la muestra realizada, la fecha y hora cuando se realiza la muestra, el valor numérico de la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto, la temperatura del agua en el interior de la cámara de equilibrio y por último la temperatura del agua en la fuente. En la cuarta y última zona ubicada en la parte inferior de la ventana, está dispuesto un menú que permite operar los componentes principales del sistema, de manera individual como se describe a continuación:

- INIT SD: inicializa la memoria SD para almacenar los datos obtenidos por el sistema.
- INIT GPS: inicializa el receptor GPS y obtiene los datos de fecha y hora.
- SPECT IR: enciende o apaga el espectrómetro infrarrojo.
- AIR: enciende o apaga la bomba para la circulación del aire y el gas.

- VALVE: enciende o apaga la electroválvula, que permite el ingreso de aire o gas al espectrómetro.
- PERISTAL\_N: enciende o apaga la bomba peristáltica, que realiza la circulación del agua hacia el interior de la cámara de equilibrio.
- PERISTAL\_INV: enciende y apaga la bomba peristáltica, en sentido contrario, para evacuar el agua de la cámara de equilibrio.
- GET DATA: inicia la secuencia para obtener las muestras de %CO<sub>2</sub>.
- READ SD: Lee los datos almacenados en la memoria SD y genera el archivo de datos del sistema.
- QUIT: indica al sistema que el modo de operación manual ha concluido.
- STOP: detiene la ejecución del programa y cierra la ventana.

### 3.4.3 MODO DE OPERACIÓN AUTOMÁTICO

Si el usuario elige el modo de operación automático, se despliega una ventana similar a la ventana de operación manual, la única diferencia se encuentra en la cuarta zona, como se muestra en la Figura 3.23.



**Figura 3.23.** Ventana para la operación automática del sistema.

En esta ventana no está dispuesto el menú para operar los elementos del sistema, únicamente se puede ingresar el número de muestras que el sistema va a realizar en cada ciclo de medición y leer los datos contenidos en la memoria SD.

#### 3.4.4 VENTANA INFORMATIVA

Si el usuario selecciona la opción ACERCA, se despliega una ventana informativa, tal como se muestra en la Figura 3.24.

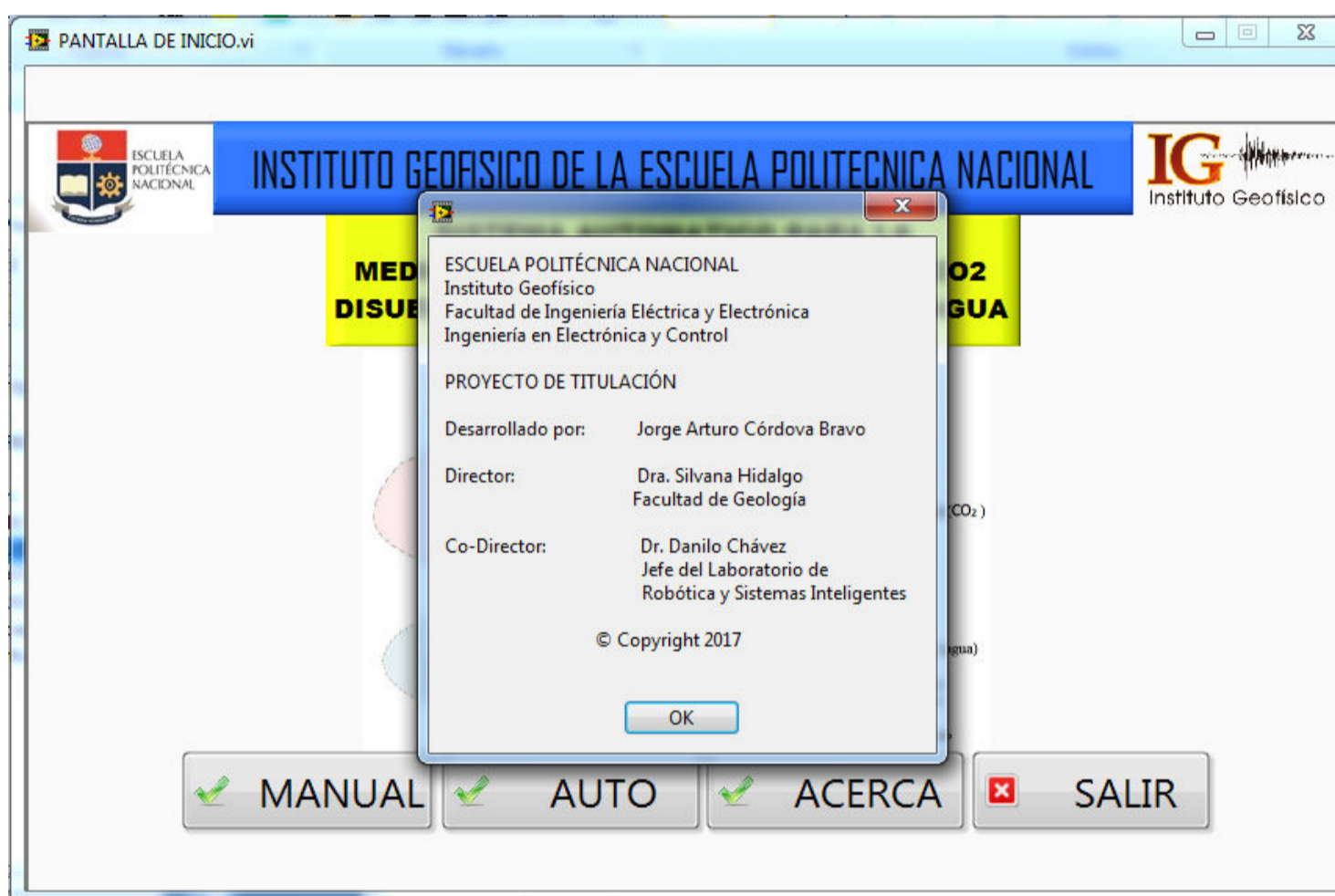


Figura 3.24. Ventana informativa del programa.

LabVIEW 2013, dispone de una herramienta para generar un archivo de instalación de la interfaz desarrollada, esto permite utilizar el programa en otros computadores, sin la necesidad de instalar LabVIEW, la única condición que deben cumplir, es disponer del sistema operativo Windows.

## **CAPÍTULO 4**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Una vez que el diseño e implementación del hardware y del software ha sido concluida, en este capítulo se presentan los resultados del proceso de verificación del funcionamiento, calibración del instrumento y de las pruebas de campo realizadas.

##### **4.1.1 VERIFICACIÓN DE LA INICIALIZACIÓN, LECTURA Y ESCRITURA DE DATOS EN LA MEMORIA SD**

###### **4.1.2 INICIALIZACION**

En la Figura 4.1 se muestra las formas de onda en el proceso de inicialización de la memoria SD en modo SPI. La onda amarilla corresponde al nivel de voltaje de la línea CS, que activa o desactiva la memoria SD, la onda azul corresponde a la línea CLK que envía la señal de reloj a la memoria SD para sincronizar el envío de datos, la onda roja corresponde a la línea MOSI por la cual el micro-controlador envía la información a la memoria SD y por último la onda verde corresponde a la línea MISO por la cual la memoria SD responde a los comandos enviados por el micro-controlador. También se muestra la trama de los comandos enviados y las respuestas de la memoria SD.

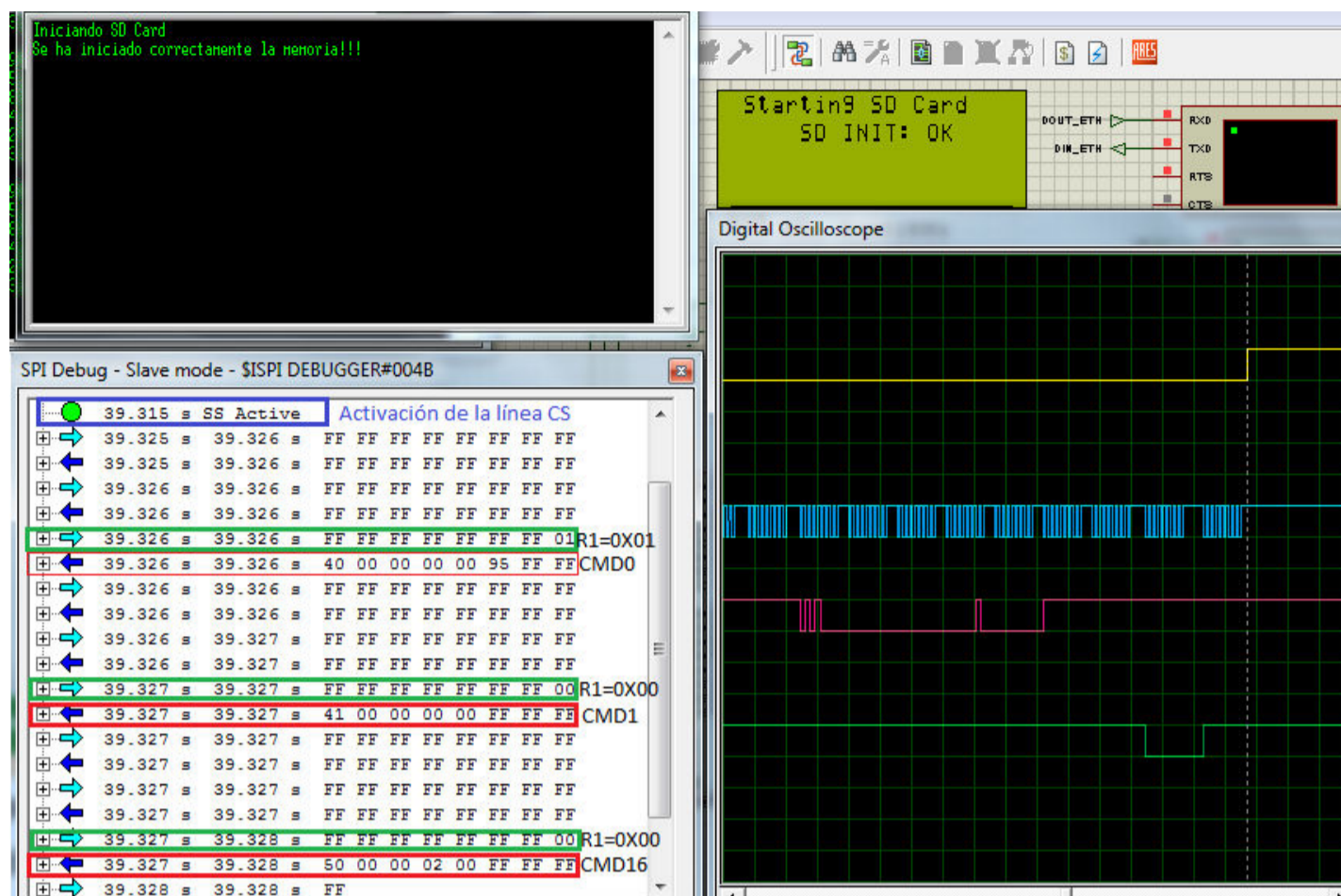


Figura 4.1. Simulación del proceso de inicialización de la memoria SD e modo SPI.

### 4.1.3 LECTURA Y ESCRITURA DE DATOS

En la Figura 4.2, se muestra el resultado de la simulación del proceso de escritura y lectura de datos en la memoria SD, aquí se puede observar la trama de los comandos CMD24 que le indica a la memoria que un dato va a ser escrito y el CMD17 que le indica a la memoria que un dato va a ser leído. También se puede observar mediante una consola, los mensajes de confirmación de cada acción.

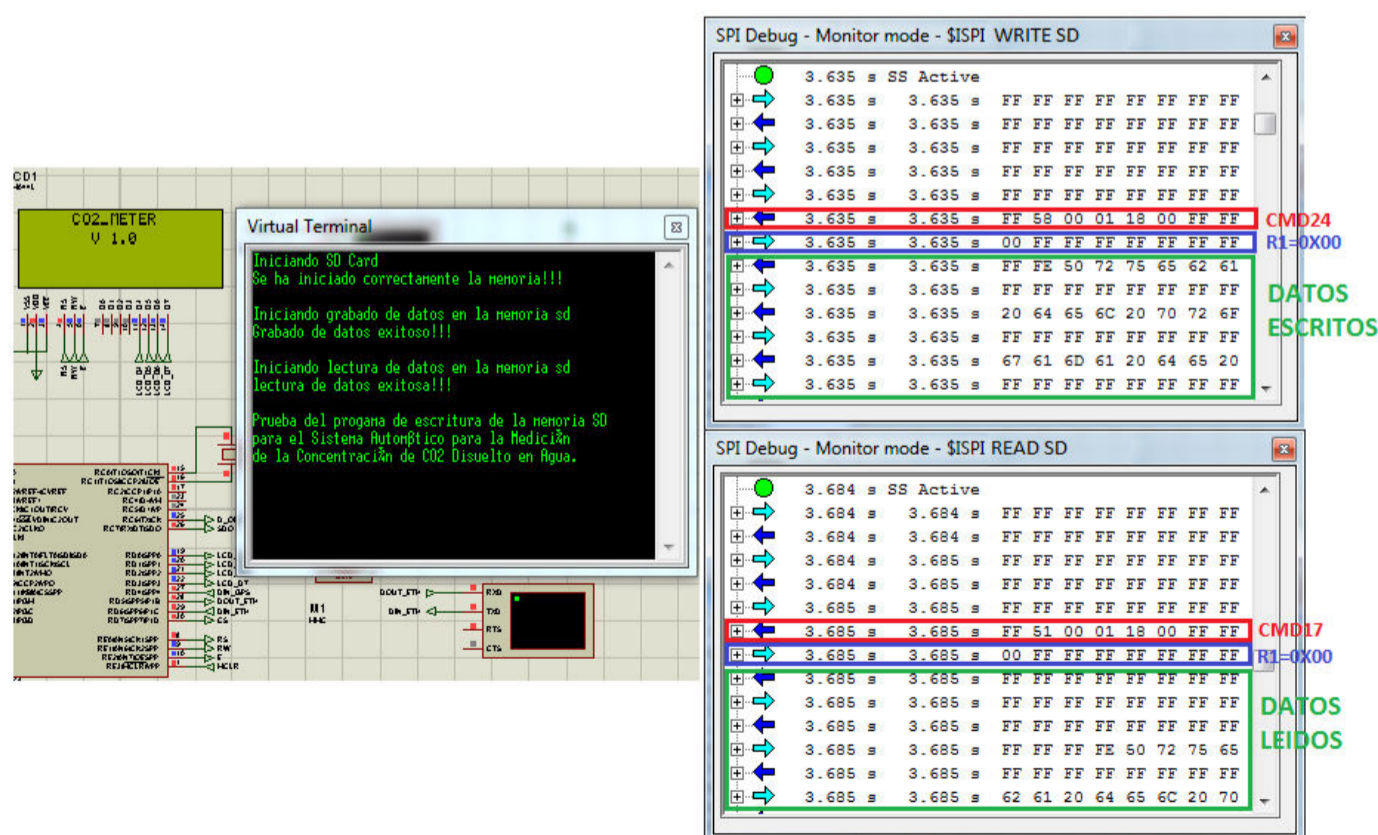


Figura 4.2. Simulación del proceso de escritura y lectura de datos en la memoria SD.

En la Figura 4.3, se observa a través del programa Hyperterminal de Windows, los datos enviados por el sistema automático y así como el proceso de escritura y lectura de la memoria SD real.

Y en la Figura 4.4, se verifica que efectivamente los datos fueron grabados en la memoria, mediante la utilización el programa de análisis digital forense WINHEX, desarrollado por la empresa X-Ways Software Technology AG; este programa permite ingresar y verificar a nivel de clusters de memoria los datos que se encuentran en la tarjeta

```

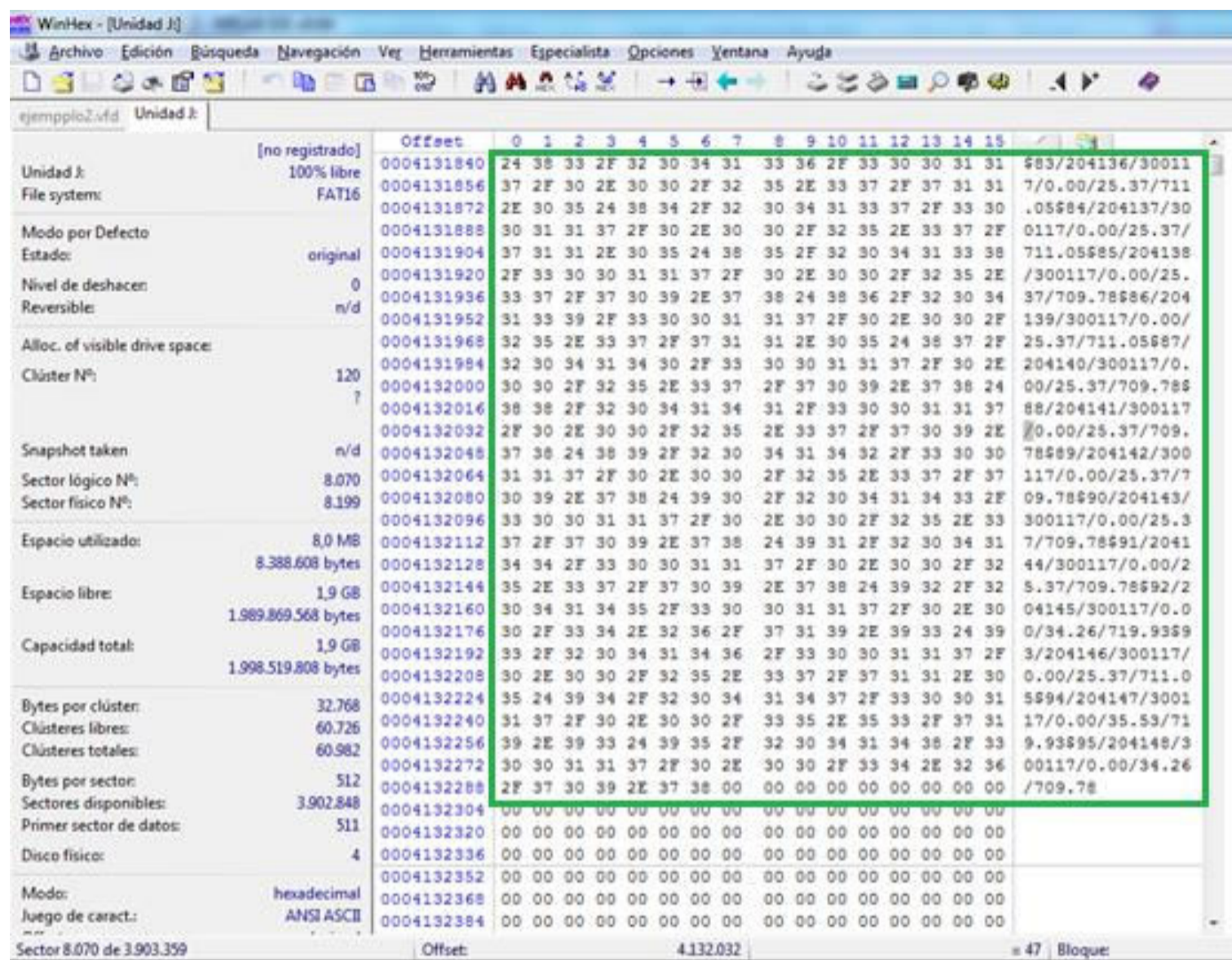
CO2 - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
#Sample,    DATE,    TIME,    %CO2,    Tin,    Tout
1,          300117, 203800,    0.00,    24.10, 708.51
2,          300117, 203801,    0.00,    24.10, 708.51
3,          300117, 203802,    0.00,    25.37, 707.24
4,          300117, 203803,    0.00,    24.10, 707.24
5,          300117, 203804,    0.00,    24.10, 707.24
6,          300117, 203805,    0.00,    24.10, 707.24
7,          300117, 203806,    0.00,    24.10, 707.24
8,          300117, 203807,    0.00,    25.37, 707.24
9,          300117, 203808,    0.00,    24.10, 707.24
10,         300117, 203809,    0.00,    24.10, 708.51
11,         300117, 203810,    0.00,    22.83, 707.24
12,         300117, 203811,    0.00,    22.83, 707.24
13,         300117, 203812,    0.00,    25.37, 711.05
Iniciando grabado de datos en la memoria sd
Grabado de datos exitoso!!!

Iniciando lectura de datos en la memoria sd
lectura de datos exitosa!!!

$1/203752/300117/0.00/24.10/708.51$2/203800/300117/0.00/24.10/708.51$3/203801/300117/0.00/25.37/707.24$4/203802/300117/0.00/24.10/707.24$5/203803/300117/0.00/24.10/707.24$6/203804/300117/0.00/24.10/707.24$7/203805/300117/0.00/24.10/707.24$8/203806/300117/0.00/25.37/707.24$9/203807/300117/0.00/24.10/707.24$10/203808/300117/0.00/24.10/708.51$11/203809/300117/0.00/22.83/707.24$12/203810/300117/0.00/2
Connected 0:14:37  ANSI  TCP/IP  SCROLL  CAPS  NUM  Capture  Print echo

```

**Figura 4.3.** Verificación del proceso de escritura y lectura de datos en la memoria SD real mediante el programa Hyperterminal de Windows.



**Figura 4.4.** Comprobación de la escritura de datos del sistema automático en la memoria SD real mediante el programa WINHEX.

## 4.2 CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE CO<sub>2</sub>

### 4.2.1 INTRODUCCIÓN

A pesar de que, el fabricante del sensor infrarrojo para CO<sub>2</sub>, garantiza la calibración del sensor en el proceso de fabricación [24], es necesario y obligatorio verificar que, una vez que el sensor ha sido integrado al sistema, proporcione las medidas correctas. También es obligatorio verificar que el resultado que nos entrega la conversión A/D en el microcontrolador no presente errores y que los programas, tanto del microcontrolador como de la interfaz gráfica funcionen correctamente.

### 4.2.2 COMPROBACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL CERO DEL INSTRUMENTO

Para realizar la comprobación del cero del instrumento se utilizó una botella con una mezcla de gas estándar compuesta de H<sub>2</sub>S y N<sub>2</sub>, elaborada por la empresa GASCO [58], con un volumen de 1,6 litros de gas, como la que se muestra en la

Figura 4.5. Estas mezclas tienen una alta precisión y son desarrolladas específicamente para la calibración de sensores para la detección de gases y han sido utilizadas anteriormente para la calibración de los sensores de otros equipos que dispone el IG-EPN.

Además el fabricante garantiza que son elaboradas bajo las normas ISO9001:2008.



**Figura 4.5.** Botella que contiene la mezcla de gases de precisión de H<sub>2</sub>S y Nitrógeno.

La botella dispone de una válvula reguladora como la que se muestra en la Figura 4.6. Esta válvula proporciona el gas bajo demanda, es decir solo permite la salida del gas cuando en la línea existe una presión negativa, generada en este caso por la bomba de aire del instrumento a calibrar.

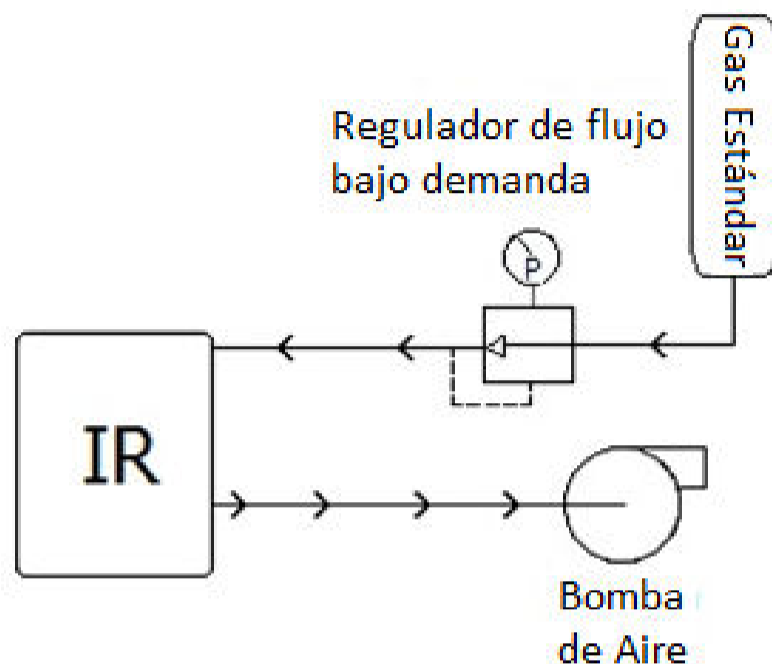


**Figura 4.6.** Regulador de flujo bajo demanda GASCO Serie 75 [58].

Para iniciar con la comprobación, se procede a conectar el regulador GASCO a la botella que contiene el gas y luego la salida del regulador hacia el espectrómetro infrarrojo, tal como se presenta en el diagrama de la Figura 4.7.



Esta configuración también se cumple para la comprobación o calibración del valor máximo del rango del instrumento.



**Figura 4.7.** Diagrama de conexión de los elementos para la calibración del sensor IR.

En la Figura 4.8, se muestra la disposición física de los elementos para la ejecución de la prueba.

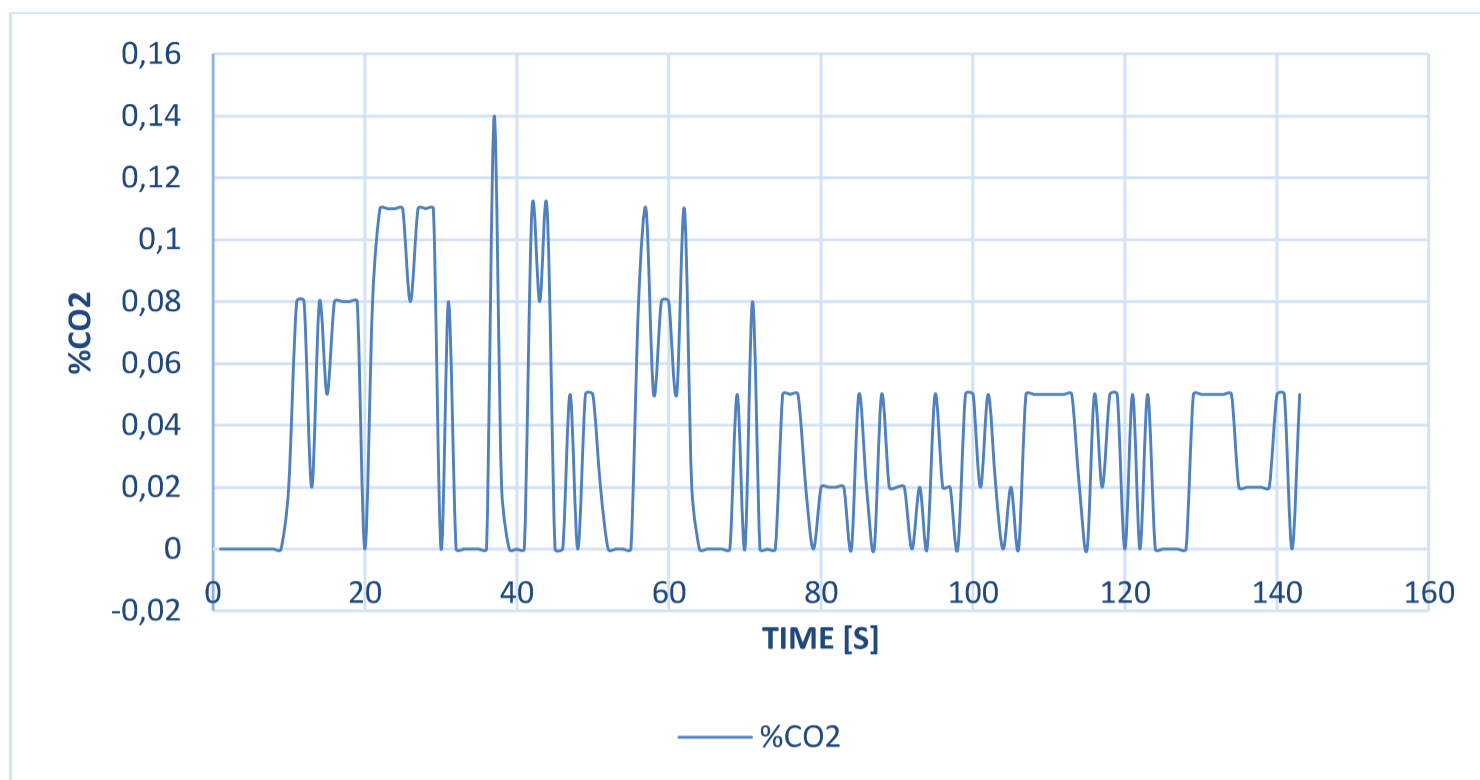


**Figura 4.8.** Equipo conectado a la botella que contiene la mezcla de precisión de H<sub>2</sub>S-Nitrógeno y al computador para registrar los datos de la calibración.

#### 4.2.2.1 Prueba con la mezcla Ácido Sulhídrico-Nitrógeno

La mezcla está compuesta por ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) con una concentración de 10ppm y nitrógeno (N<sub>2</sub>), que es el elemento de balance.

En la curva de la Figura 4.9, se presentan los resultados de la prueba de la verificación del valor mínimo del instrumento.



**Figura 4.9.** Curva de respuesta del Sensor infrarrojo a la mezcla H<sub>2</sub>S-N<sub>2</sub> durante la verificación del valor mínimo (cero del instrumento).

En la Tabla 2.3, se presentaron las especificaciones técnicas del espectrómetro infrarrojo. En estas especificaciones, el fabricante indica que la estabilidad del cero del sensor es de  $\pm 2\%$  del rango, que para este caso es  $30\%CO_2$ . Por lo tanto el error para la estabilidad del cero en función del valor de porcentaje de la concentración de  $CO_2$ , será el expresado en la ecuación (4.1).

$$Error_{zero\ stability} = \frac{2\% \cdot 30\%CO_2}{100\%} = 0,6\%CO_2 \quad (4.1)$$

Si, se observa los valores de la curva de la Figura 4.9, al máximo valor que se alcanza durante la circulación de la mezcla H<sub>2</sub>S-N<sub>2</sub>, es de  $0,14\%CO_2$ ; este valor de concentración está bastante por debajo del error de estabilidad del cero que el fabricante garantiza.

#### 4.2.2.2 Prueba con agua ozonificada

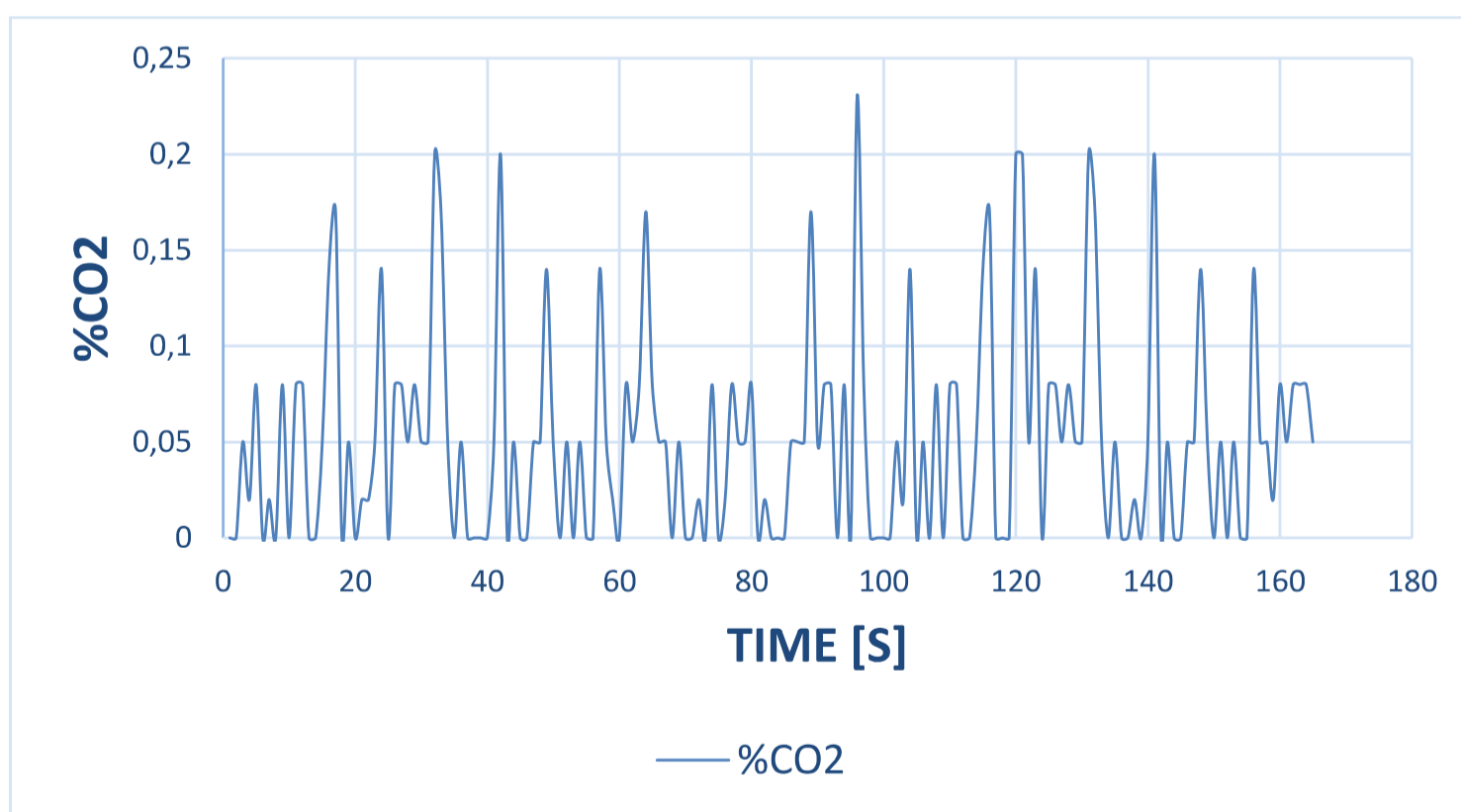
Luego de comprobar la correcta operación del sensor infrarrojo en el mínimo valor, se procede a comprobar el funcionamiento de todo el sistema utilizando una botella con tres litros de agua ozonificada, para asegurar que la presencia de  $CO_2$  es casi nula.

El agua ozonificada se obtuvo mediante un ozonificador Dibel-Live SR-491, el mismo que se muestra en la Figura 4.10.



**Figura 4.10.** Ozonificador Dibel-Live SR-491.

En la Figura 4.11 se muestra la curva de respuesta del instrumento cuando circula agua ozonificada por el sistema.



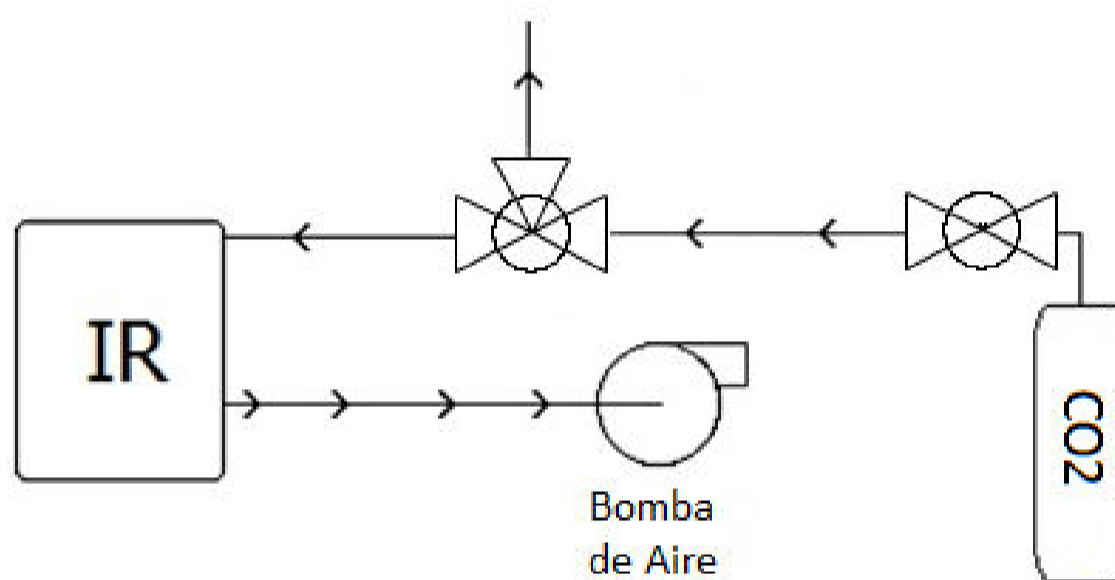
**Figura 4.11.** Concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en agua ozonificada.

Como se puede observar en la curva de la Figura 4.11, el valor máximo que alcanza la medición es 0,23% de concentración de CO<sub>2</sub>. Una vez más se puede observar que los valores están dentro del error para la estabilidad del cero.

### 4.2.3 COMPROBACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL VALOR MÁXIMO DEL RANGO DEL INSTRUMENTO

Para la comprobación de la estabilidad del sensor en el máximo valor del rango, se utilizó un tanque de CO<sub>2</sub> puro para extinción de incendios, que contiene 2Kg de CO<sub>2</sub> a una presión de 250 bares.

Debido a que la presión del CO<sub>2</sub> contenido en la botella sobrepasa excesivamente la presión máxima que puede soportar el espectrómetro, se utilizó una válvula manual de tres vías para aliviar el exceso de presión durante la prueba. La conexión de los elementos se realizó de acuerdo al diagrama que se presenta en la Figura 4.12.



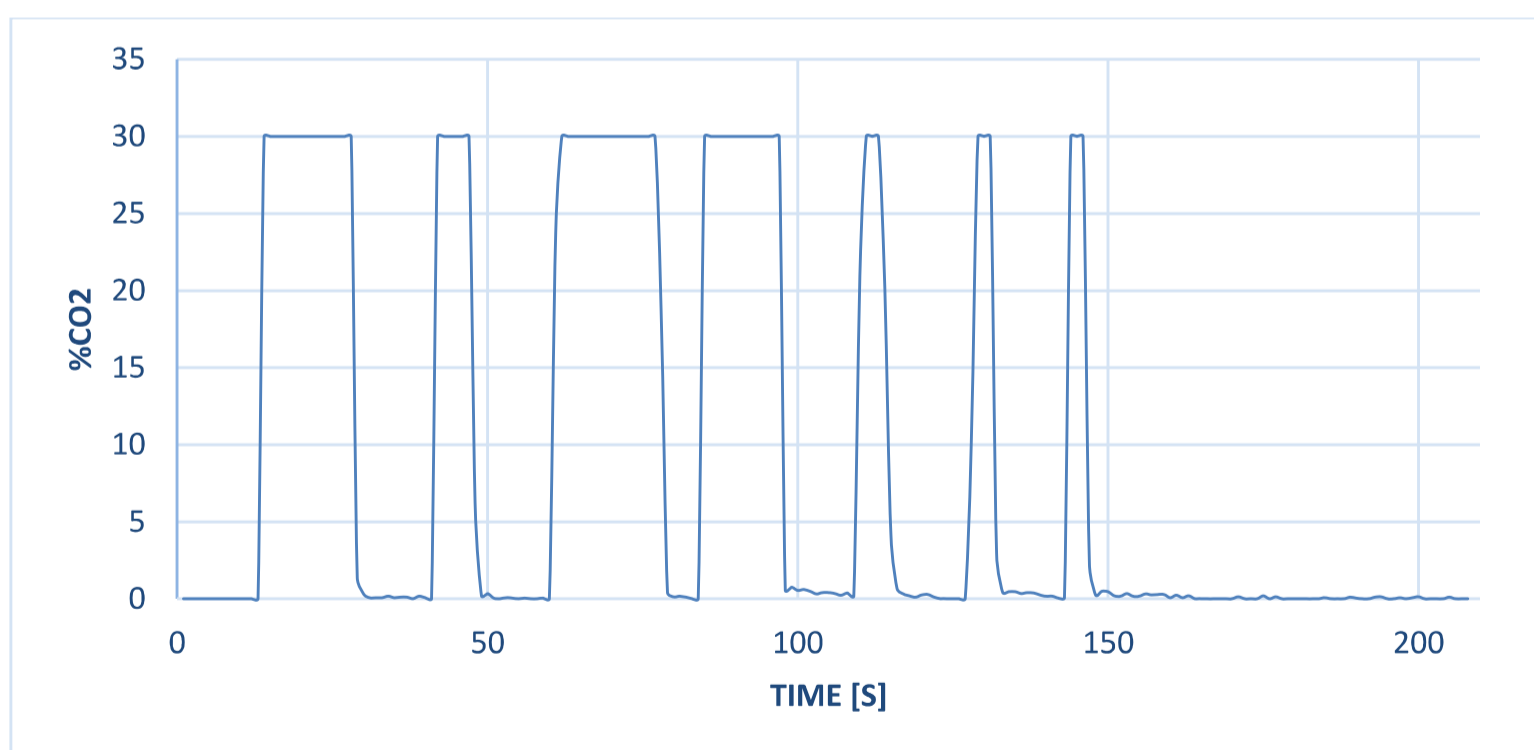
**Figura 4.12.** Diagrama de conexión del cilindro de CO<sub>2</sub> puro para la prueba de máxima escala del espectrómetro infrarrojo.

En la Figura 4.13, se muestra el cilindro de CO<sub>2</sub> y la válvula de tres vías utilizados para la prueba del valor máximo del sensor infrarrojo.



**Figura 4.13.** Cilindro de CO<sub>2</sub> y válvula de tres vías.

En la Figura 4.14 se presenta la curva de respuesta del sensor cuando circula CO<sub>2</sub> puro a través del mismo. En esta curva se puede observar que, cada vez que se envía un pulso de CO<sub>2</sub> puro, el sensor se satura inmediatamente.



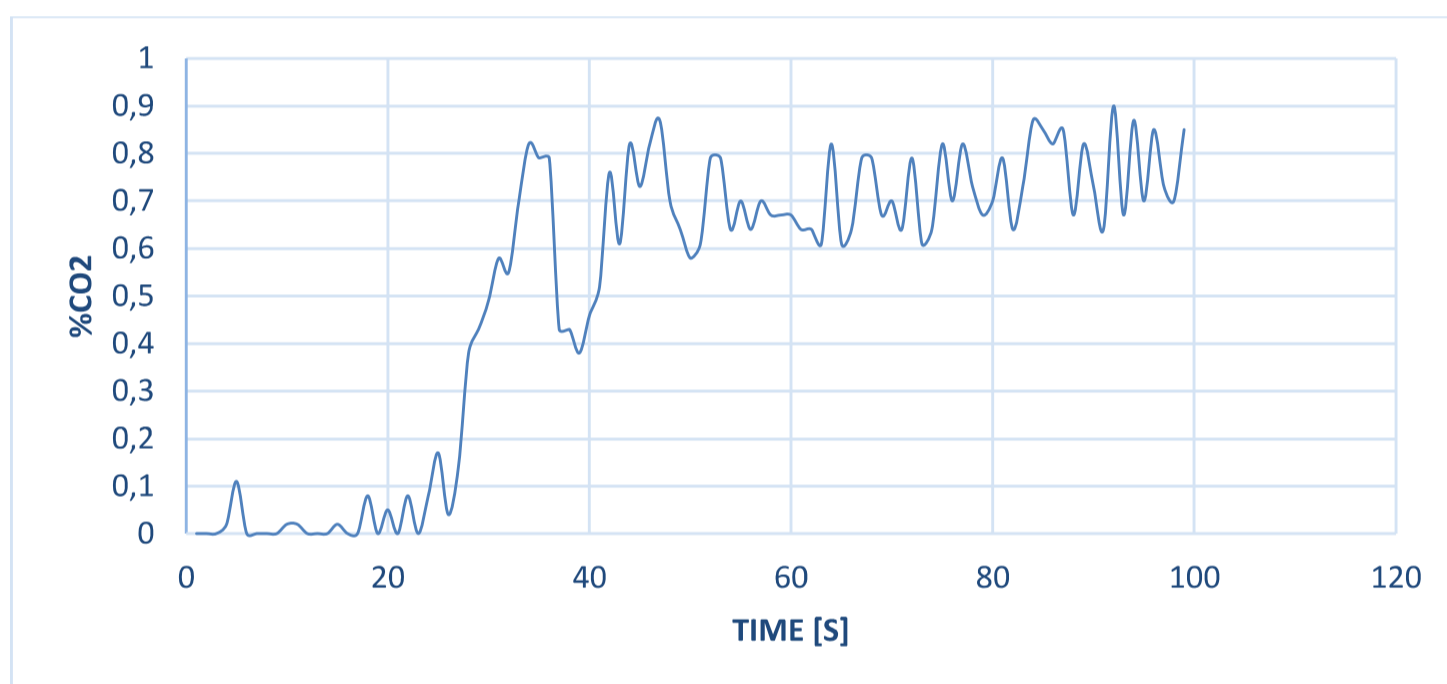
**Figura 4.14.** Respuesta del sensor infrarrojo a varios pulsos de CO<sub>2</sub> puro.

#### 4.2.4 COMPROBACIÓN DE LA RESPUESTA DEL INSTRUMENTO A ESCALAS INTERMEDIAS

##### 4.2.4.1 Prueba con una mezcla Dióxido de Azufre-Dióxido de Carbono

La mezcla utilizada en esta prueba, está compuesta por dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) con una concentración de 10ppm, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) con una concentración de 3000ppm y aire al 20,9% como elemento de balance.

Para poder entender los resultados presentados en la Figura 4.15, se debe tener en cuenta que 1 millón de partes equivale al 100% en volumen, por lo tanto una concentración de 3000 partes por millón de  $\text{CO}_2$ , equivale al 0,3% en porcentaje por volumen.



**Figura 4.15.** Curva de respuesta del sensor infrarrojo a la mezcla de  $\text{SO}_2$ - $\text{CO}_2$ -Aire.

Como se puede observar en la curva de la Figura 4.15, los valores que entrega el sensor infrarrojo oscilan entre el 0,6% y 0,9%. Por lo tanto si se toma el 2% de error de precisión, que el fabricante garantiza, el cual como se había mencionado anteriormente equivale al 0,6% en concentración de  $\text{CO}_2$ , los valores entregados por el sensor infrarrojo están dentro del rango correcto de la respuesta que se espera.

#### 4.2.4.2 Prueba utilizando una disolución conocida de CO<sub>2</sub>

Para esta prueba se utilizó, los elementos que se listan a continuación:

- Botella plástica con un volumen de tres litros.
- Dos mangueras para suero.
- Válvula manual de vidrio de tres vías, Figura 4.13.
- Tanque de CO<sub>2</sub>, Figura 4.13.
- Balanza de precisión OHAUS Explorer EX6202 [59].
  - Sensibilidad: 0,01 gr
  - Repetibilidad: 0,01 gr
  - Linealidad: ± 0,02gr
- Dos litros de agua.

##### a) Preparación de los elementos para la realización de la disolución de CO<sub>2</sub>

Una vez que todos los elementos están listos, se procede a pesar la botella vacía, para conocer su peso, tal como se muestra en la Figura 4.16.



**Figura 4.16.** Pesaje de la botella de plástico vacía.

Luego de conocer el peso de la botella, se coloca dos litros de agua dentro de ella, dado que la densidad del agua es 1000gr/L el peso total que se debe obtener es de 2056,78 tal como se muestra en la Figura 4.17.



**Figura 4.17.** Pesaje de la botella de plástico con dos litros de agua.



Una vez que se tiene dos litros en la botella, se procede a cerrar la botella con una tapa, donde se colocó dos mangueras pequeñas para ingresar al gas durante la elaboración de la disolución y para la entrada y salida del agua durante la prueba en el instrumento.

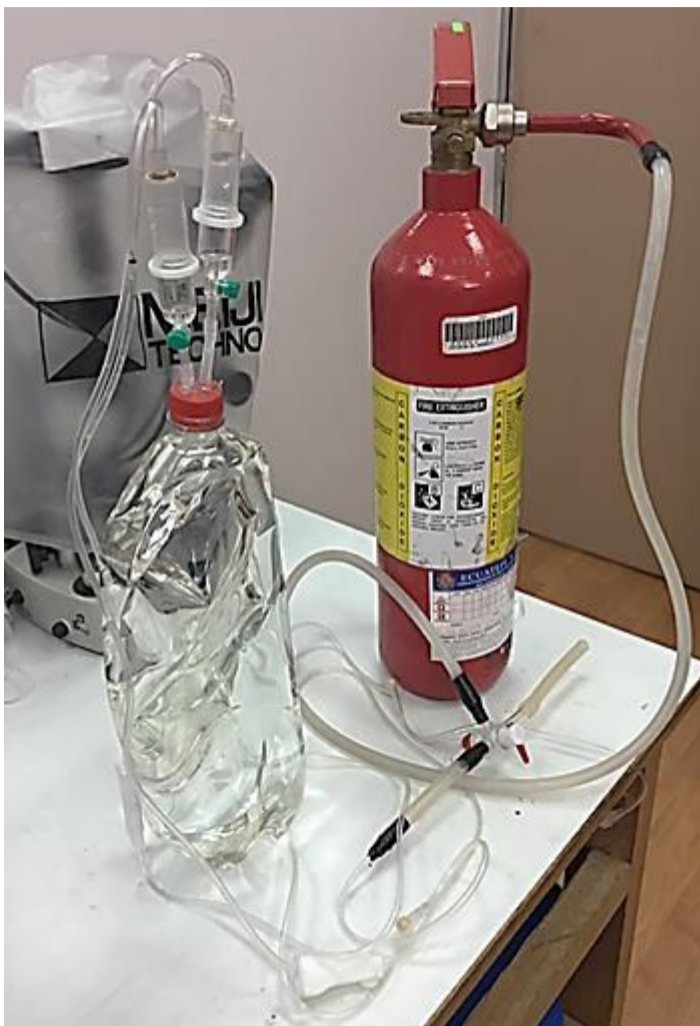
Luego de que se ha colocado la tapa, se procede a realizar la medición del peso total, tal como se muestra en la Figura 4.18



**Figura 4.18.** Medición del peso total de la botella con dos litros de agua y la tapa con las mangueras.

Tal como se puede observar en la figura anterior, el peso total es de 2070,74 gramos, antes de la disolución del CO<sub>2</sub>.

Una vez que se conoce el peso total de los elementos, se procede a retirar todo el aire de la botella y a realizar la conexión de la botella con el cilindro de CO<sub>2</sub>, mediante la válvula de tres vías y las mangueras para suero fisiológico, tal como se muestra en la Figura 4.19.



**Figura 4.19.** Conexión de la botella que contiene el agua con el cilindro de CO<sub>2</sub>, para la realización de la disolución de CO<sub>2</sub>.

Una de las mangueras, permanece sellada para evitar la fuga del CO<sub>2</sub>, mientras que por la otra manguera se procede a introducir el CO<sub>2</sub> en la botella.

### b) Disolución

Para esta prueba el objetivo es obtener una disolución de CO<sub>2</sub> entre el 15 y 20%, por lo cual es necesario conocer la masa que se necesita para lograr la disolución deseada.

Se conoce que a condiciones estándar STP, una mol de CO<sub>2</sub> ocupa el volumen de 24,4 litros.

Si se desea que el CO<sub>2</sub> ocupe el 15% en un volumen de agua de 2 litros a condiciones ambientales actuales, entonces el volumen deseado de CO<sub>2</sub> es 0,3 litros.

Si se aplica la ecuación general de los gases:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (4.2)$$

Se calcula el volumen de CO<sub>2</sub> deseado a STP, para poder calcular la masa requerida.

Si, se asume como constante la presión, entonces la ecuación (4.6) se reduce a:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (4.3)$$

Si el sensor de temperatura del instrumento registra una temperatura ambiental de 21,71°C (294,86°K) al momento de realizar la disolución, tal como se muestra en la Figura 4.20, entonces:

$$V_{CO_2 \text{ STP deseado}} = \frac{298,15^\circ K \cdot 0,3L}{294,86^\circ K} = 0,3033L \quad (4.4)$$



**Figura 4.20.** Temperatura ambiente (To) registrada por el instrumento al momento de realizar la disolución.

Si una mol de CO<sub>2</sub>=43,99 gr, entonces:

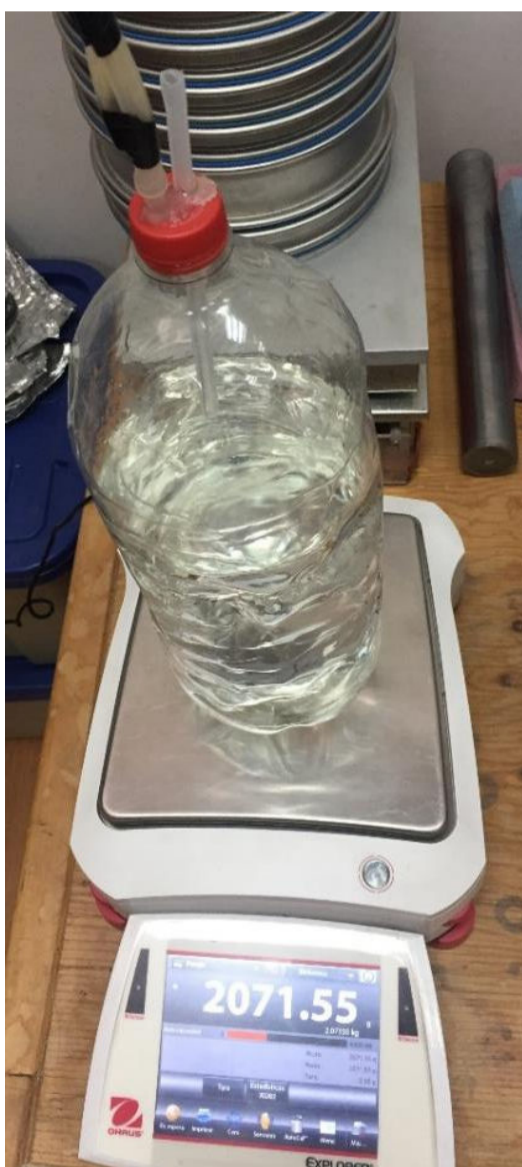
$$\text{Gramos } CO_2 \text{ STP necesarios} = \frac{0,3033L \cdot 43,99gr}{24,4L} = 0,546gr \quad (4.5)$$

Del resultado de la ecuación (4.6), se conoce que la masa de CO<sub>2</sub> necesaria para lograr una disolución del 15% en dos litros de agua es 0,546 gramos.

A continuación se procede a ingresar el  $\text{CO}_2$  dentro de la botella con agua, en tres pulsos de 3 segundos aproximadamente, luego de esto se procede a agitar la botella para provocar que el  $\text{CO}_2$  dentro de la botella se disuelva en el agua.

Luego de disolver el  $\text{CO}_2$  en el agua, el siguiente paso es desconectar todas las mangueras de la botella para permitir el ingreso de aire y la salida del gas que no se disolvió, con el objetivo de reestablecer las condiciones de presión.

Una vez que las condiciones de presión han sido reestablecidas, se procede a realizar la medición del peso de la botella de agua con el  $\text{CO}_2$  disuelto, tal como se observa en la Figura 4.21, el nuevo peso de la botella es 2071,55 gramos.



**Figura 4.21.** Medición del peso de la botella con agua luego de la disolución del  $\text{CO}_2$ .

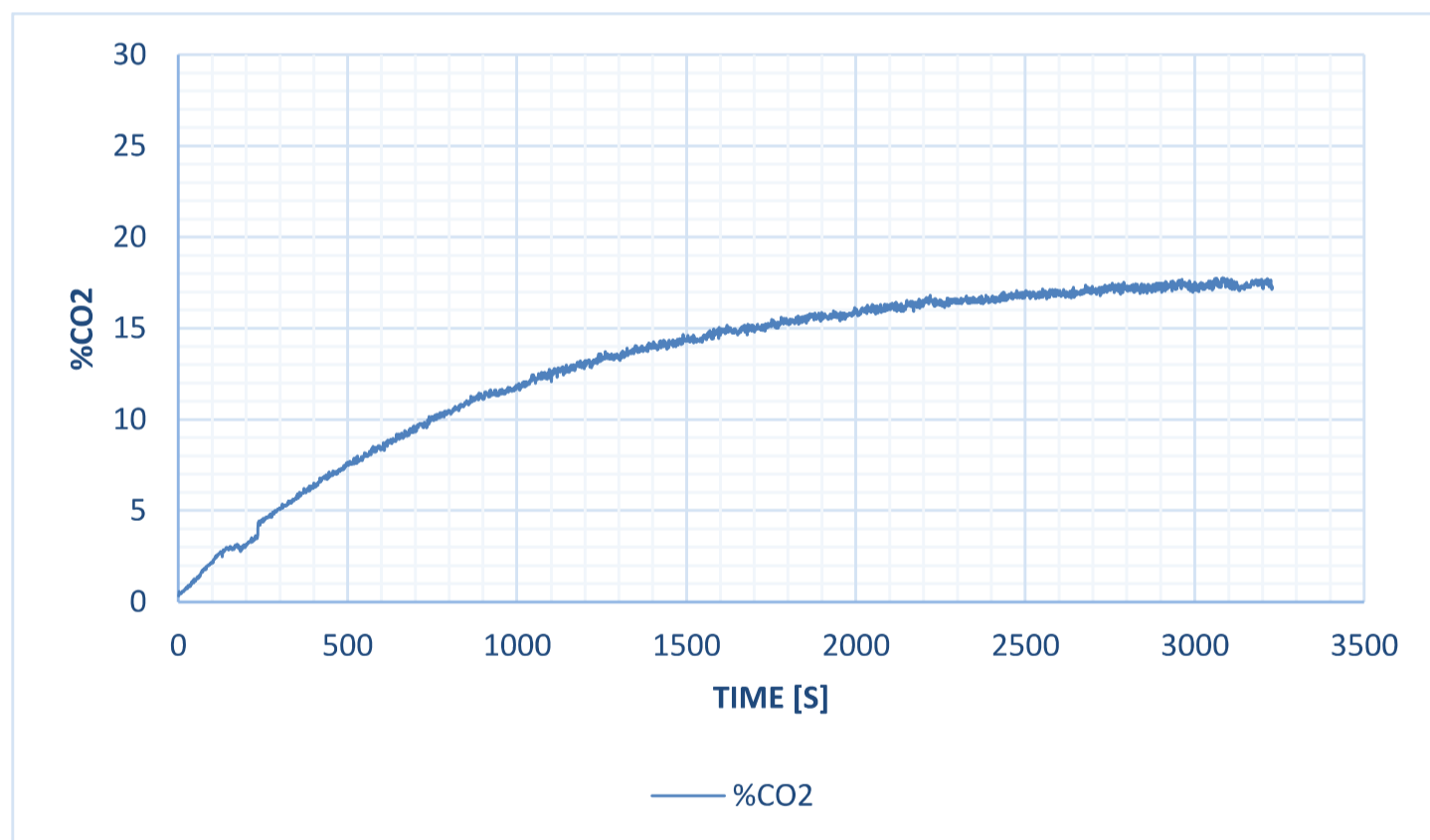
A partir de los resultados presentados en la Figura 4.18 y Figura 4.21, se conoce que la diferencia de peso de la botella antes y después de la disolución de  $\text{CO}_2$  es 0,81 gramos. Por lo tanto 0,81 gramos de  $\text{CO}_2$  a condiciones STP ocupará un volumen de 0,449 litros. Si se aplica nuevamente la ecuación (4.3) se obtiene el

volumen que ocupa esa masa de CO<sub>2</sub> en las condiciones ambientales al momento de realizar la disolución.

$$V_{CO_2 \text{ a condiciones ambientales}} = \frac{294,86^{\circ}K \cdot 0,449L}{298,15^{\circ}K} = 0,44L \quad (4.6)$$

El valor de 0,44 litros calculado en la ecuación (4.6) con respecto a los 2 litros de agua, representan el 22% de la disolución, pero debido a que la cámara de equilibrio tiene en su interior 0,45 litros (450ml) de agua sin CO<sub>2</sub>, de las pruebas anteriores, el volumen total del agua al momento de realizar la medición de la concentración será 2,45 litros, por lo tanto los 0,44 litros de CO<sub>2</sub> representan el 17,95% del volumen total de la disolución.

En la Figura 4.22 se presenta la curva de respuesta del sistema automático, para la disolución realizada.



**Figura 4.22.** Curva de respuesta del sistema automático para una disolución de CO<sub>2</sub> de 17,95%Vol.

Como se puede observar en la figura anterior, la curva se hace lineal a un valor aproximado de 17,5%, mientras que el valor calculado es 17,95%. Por lo tanto si se toma en consideración el error de precisión que indica el fabricante y el cual es  $\pm 2\%$  del rango [24], el valor medido está dentro del rango esperado.

### 4.3 PRUEBA DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

Para comprobar el adecuado funcionamiento de los sensores de temperatura, se comparó los valores presentados por el sistema automático con los valores presentados por un multímetro FLUK 179 TRUE RMS, cuyas características se presentan en la Tabla 4.1 y una termocupla tipo K marca FLUKE tal como se muestra en la Figura 4.23.

En la declaración de prácticas de calibración, el mismo que no constituye un certificado de calibración, el fabricante certifica que el multímetro fue calibrado durante el proceso de fabricación, siguiendo las normas de calidad ISO-9001 y que los procedimientos de medición e instrumentos utilizados durante el proceso de calibración son trazables a las unidades del sistema internacional. El multímetro FLUKE que se utilizó en estas pruebas fue fabricado en el mes de noviembre del año 2013.



**Figura 4.23.** Multímetro FLUKE 179 TRUE RMS y termocupla tipo K utilizados para la comprobación de los sensores de temperatura.

**Tabla 4.1.** Características técnicas del multímetro FLUK 179 TRUE RMS [61].

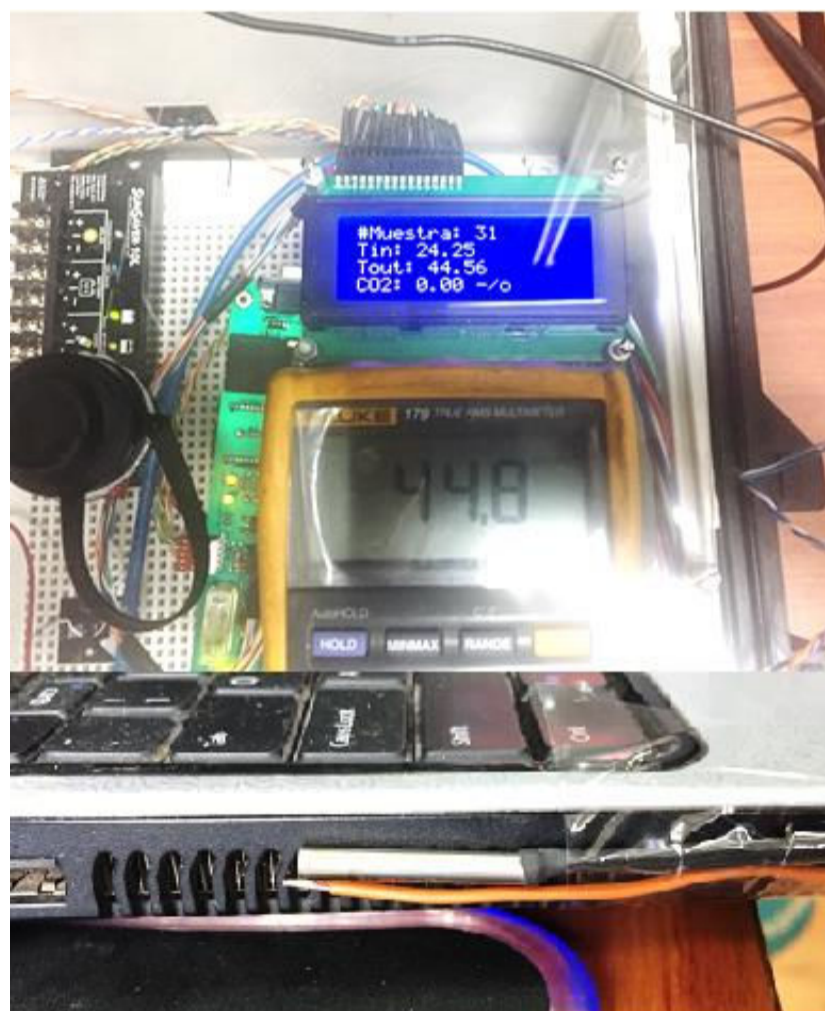
		<b>Fluke 179</b>
<b>AC Amps</b>	<b>Range</b>	0.01 mA to 10.00A 20A overload for (30 seconds)
	<b>Accuracy</b>	± (1.5% of reading plus 3 counts)
	<b>Crest Factor</b>	≤ 3
	<b>AC Response</b>	45 Hz to 1 kHz
<b>DC Amps</b>	<b>Range</b>	0.01 mA to 10.00A (20A overload for 30 seconds)
	<b>Accuracy</b>	± (1.0% of reading plus 3 counts)
<b>Volts AC</b>	<b>Range</b>	0.1 mV to 1000V
	<b>Accuracy</b>	45 Hz to 500 Hz 1% of rdg + 3 counts 500 Hz to 1 kHz 2% of rdg + 3 counts
	<b>AC Response</b>	45 Hz to 1 kHz
<b>Volts DC</b>	<b>Range</b>	0.1 mV to 1000V
	<b>Accuracy</b>	± (0.09% of reading plus 2 counts)
<b>Resistance</b>	<b>Range</b>	0.1Ω to 50.00 MΩ
	<b>Best Accuracy</b>	± (0.9% of reading plus 1 count)
<b>Capacitance</b>	<b>Range</b>	1 nF to 9999 μF
	<b>Best Accuracy</b>	± (1.2% of reading plus 2 counts)
<b>Hz</b>	<b>Range</b>	Voltage Input: 2 Hz to 100 kHz Current Input: 2 Hz to 30 kHz
	<b>Accuracy</b>	± (0.1% of reading plus 1 count)
<b>Temp</b>	<b>Range</b>	-40°C to +400°C, -40°F to +752°F
	<b>Accuracy</b>	°C 1% + 10, °F 1% + 18

El sensor RTD que mide la temperatura interna de la cámara de equilibrio se encuentra dentro de un encapsulado térmico, que permite dar estabilidad a la medición de la temperatura, así como sellar el orificio por donde el sensor ingresa a la cámara de equilibrio, tal y como se muestra en la Figura 4.24.



**Figura 4.24.** Sensor RTD montado sobre un encapsulado para el acople con la cámara de equilibrio.

La prueba realizada consistió en encender el multímetro FLUKE, colocar la termocupla y el RTD a la salida de la ventilación de una laptop y comparar los valores que entregan cada equipo, como se muestra en la Figura 4.25

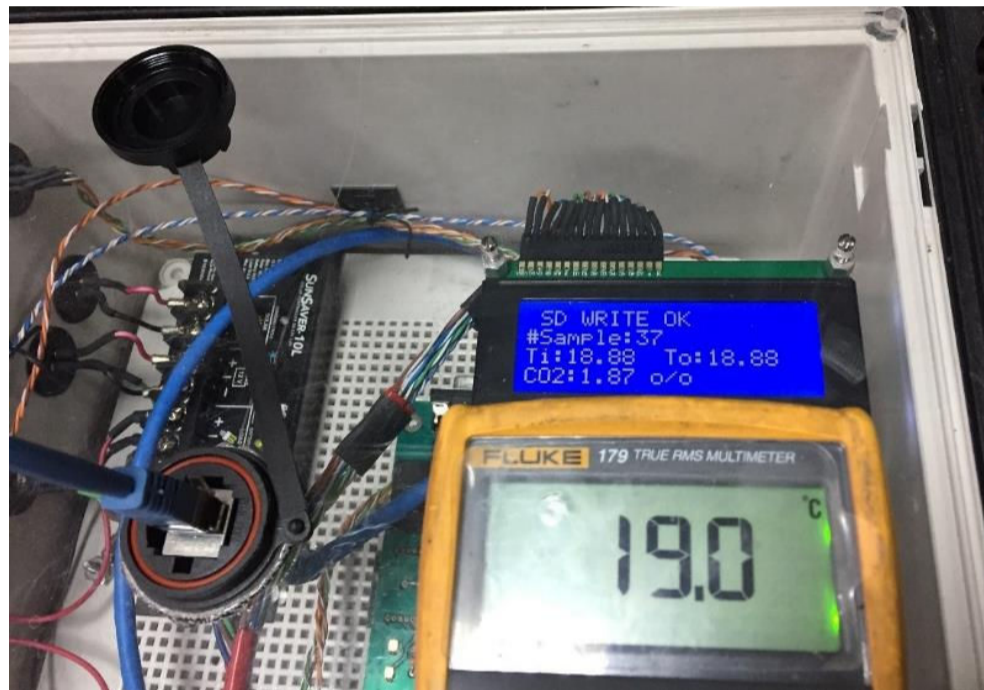


**Figura 4.25.** Prueba de funcionamiento de los sensores de temperatura del sistema automático.



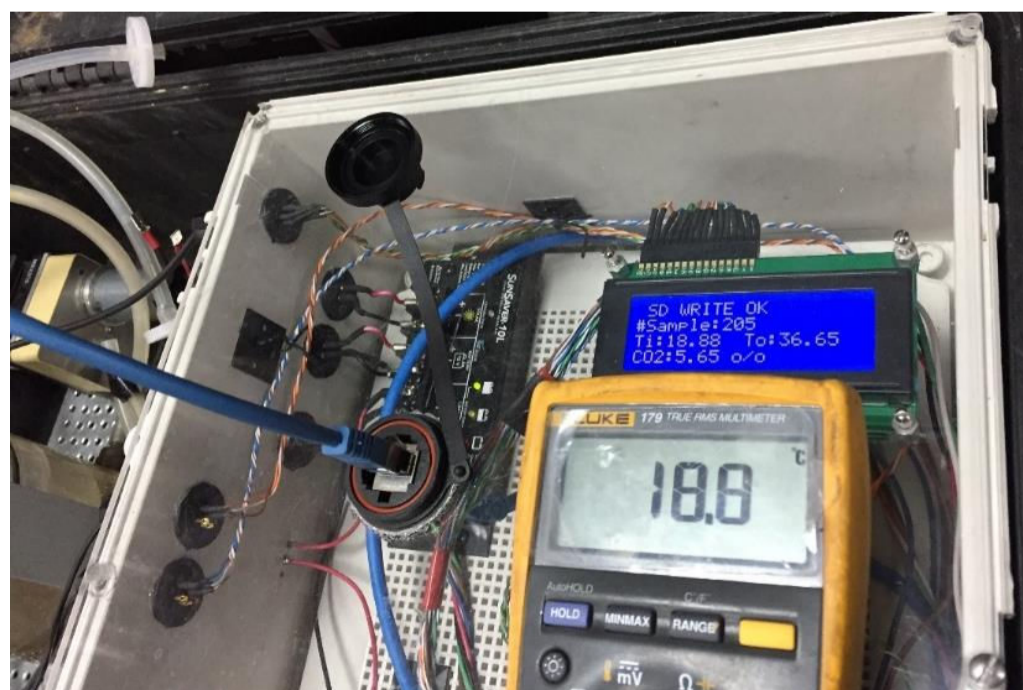
En días posteriores una segunda prueba consistió en simplemente medir la temperatura ambiental que registraban cada uno de los sensores, tanto los dos RTD del sistema automático, así como la termocupla FLUKE, tal y como se muestra en la Figura 4.26.

Se observa que los valores que entregan los dos RTDs del sistema son iguales y existe una diferencia de  $0,12^{\circ}\text{C}$  con el valor que muestra el multímetro FLUKE.



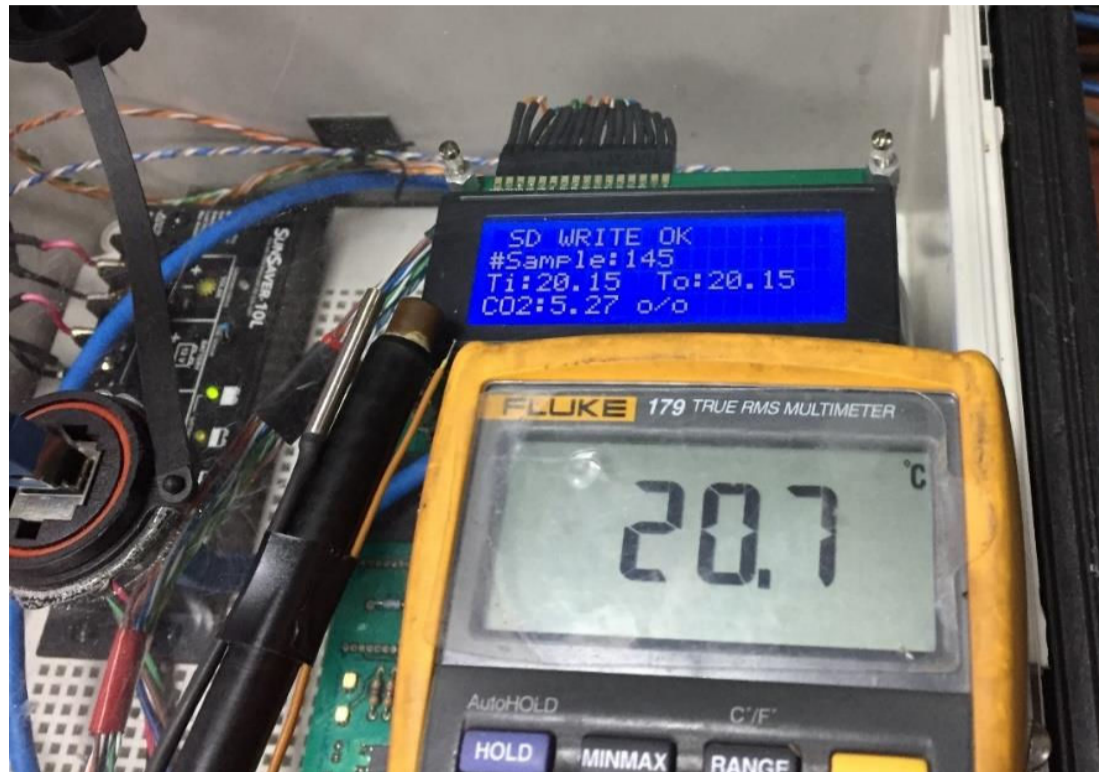
**Figura 4.26.** Segunda prueba del funcionamiento de los sensores RTD del sistema.

A continuación, con el RTD2 que se encuentra fuera de la cámara de equilibrio, se mide la temperatura corporal de una persona, mientras que la termocupla y el RTD1 restante continúan midiendo la temperatura ambiental. En la Figura 4.27 se muestra los valores de temperatura que presenta el sistema.



**Figura 4.27.** Valores de temperatura ambiental y corporal que muestran los RTDs del instrumento y la termocupla de referencia.

Por último, nuevamente se colocan juntos los tres sensores para medir la temperatura ambiental, tal como se muestra en la Figura 4.28.



**Figura 4.28.** Valores de temperatura ambiente, registrados por los tres sensores, durante las pruebas realizadas.

#### **4.4 PRUEBA DE TRANSMISIÓN DE DATOS MEDIANTE EL RADIO ENLACE**

Luego de haber realizado la calibración del instrumento, se procede a verificar el funcionamiento de la transmisión de datos a través del radio enlace entre el medidor de la concentración de CO<sub>2</sub> y la computadora donde se ejecuta la aplicación que recibe los datos, mediante la realización de dos pruebas de transmisión.

La primera prueba se llevó a cabo al interior de las oficinas del Área de Instrumentación del IG-EPN y la segunda en los exteriores del edificio de Ingeniería Civil de la EPN.

Durante la primera prueba se realiza la conexión de los elementos del radio enlace tal como se muestra en la Figura 4.29.

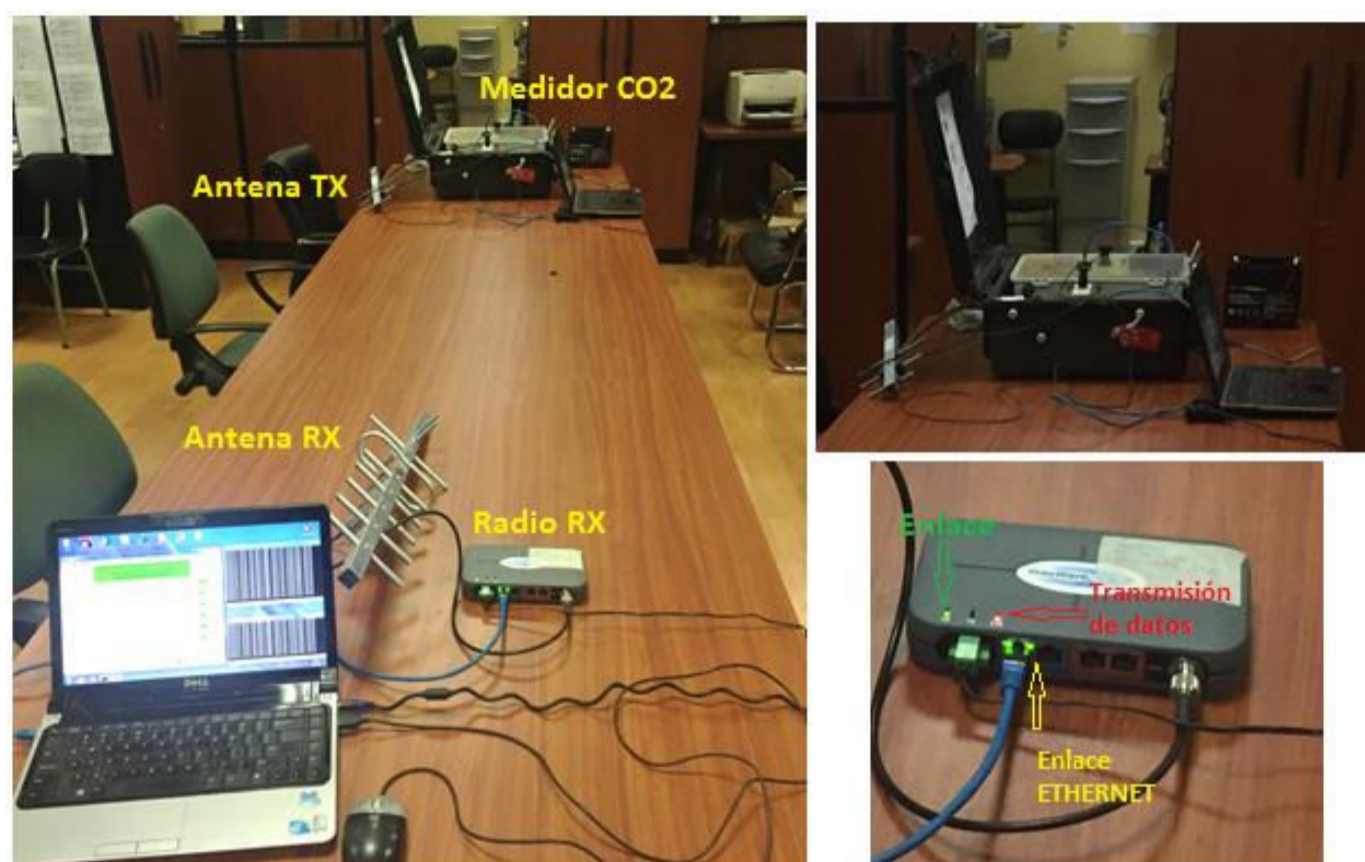


Figura 4.29. Primera prueba de transmisión de datos mediante radio enlace.

En la Figura 4.30 se muestra la recepción de los datos en el computador donde se ejecuta la interfaz gráfica y la respuesta de ping del medidor de CO<sub>2</sub> disuelto y del radio transmisor instalado dentro del instrumento.

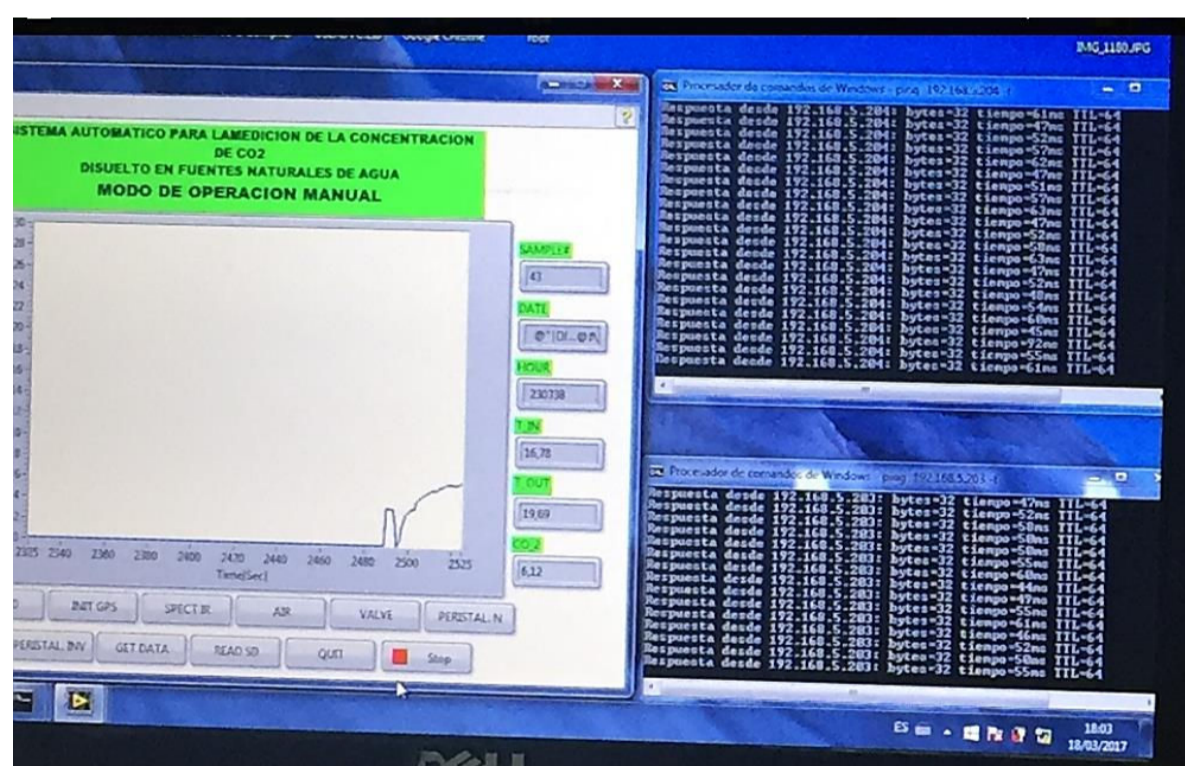


Figura 4.30. Recepción de datos a través del radio enlace.

La segunda prueba se realizó en los exteriores del edificio de Ingeniería Civil donde se encuentran las instalaciones del IG-EPN.

El computador con el software de recepción se ubicó en la terraza del edificio y el medidor de CO<sub>2</sub> se ubicó en el área de los parqueaderos del edificio, tal como se muestra en la Figura 4.31.



**Figura 4.31.** Segunda prueba de transmisión de datos mediante radio enlace.

#### 4.5 PRUEBAS DE CAMPO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO

Una vez que se han realizado la calibración y pruebas de funcionamiento en el laboratorio, se procede a elegir los sitios donde se realizarán las pruebas de campo. Para la elección de los sitios de las pruebas de campo, se tomó en consideración la dificultad del acceso con el instrumento y la información en la Tabla 2.1. De los sitios mencionados en la Tabla 2.1, se escogen Palmira y Santa Ana, debido a que la concentración de CO<sub>2</sub> medida en estas fuentes en estudios anteriores y con técnicas diferentes [23], no supera la escala máxima del sensor y es lo suficientemente alta como para observar los cambios de la concentración durante el proceso de medición.

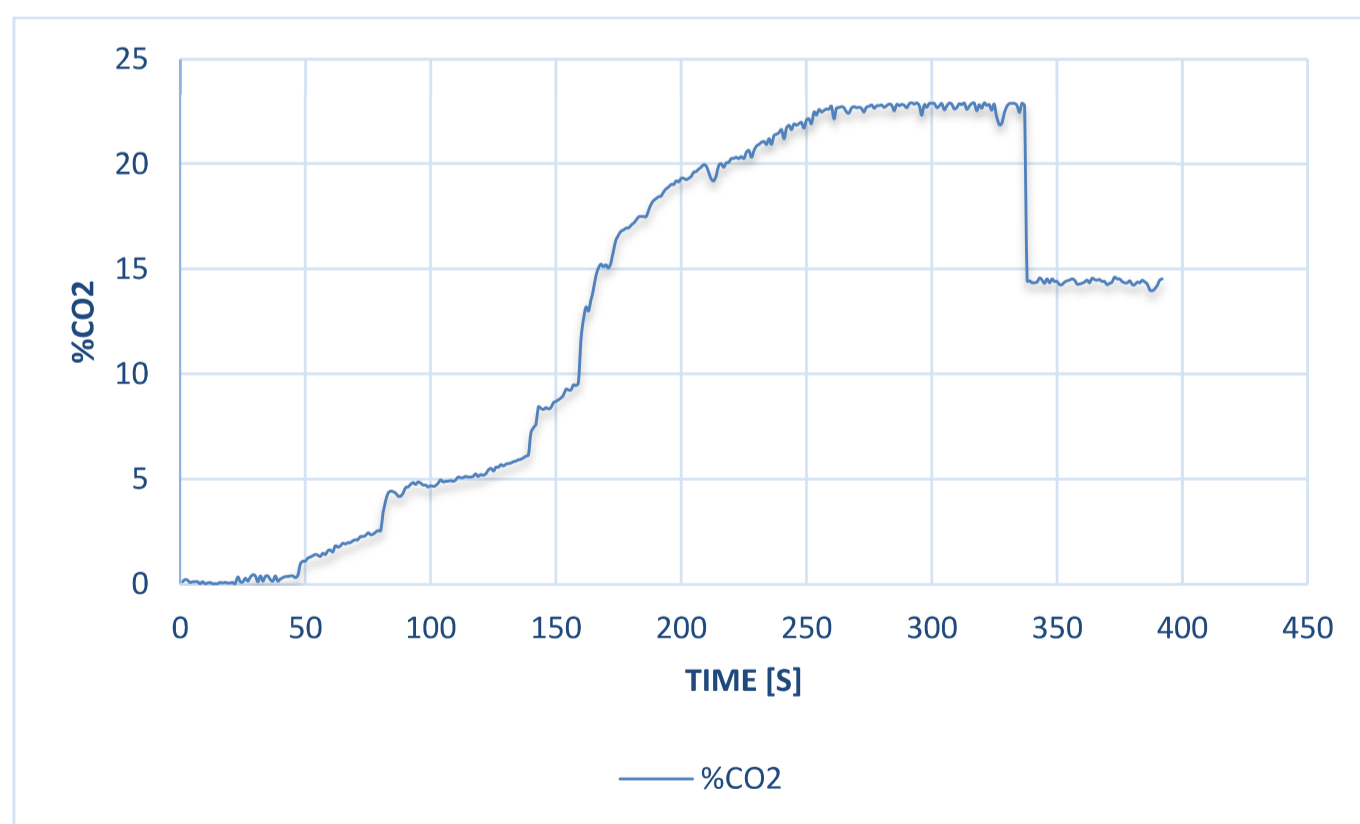
#### 4.5.1 PRUEBAS EN LA FUENTE TERMAL SANTA ANA

En la Figura 4.32 se muestra la instalación de los equipos en la fuente Santa Ana durante las pruebas de campo del sistema automático.



**Figura 4.32.** Instalación del sistema automático en la fuente termal Santa Ana.

En la Figura 4.33 se muestra la curva resultante de las mediciones de la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en la fuente Santa Ana.



**Figura 4.33.** Curva obtenida durante la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en la fuente termal Santa Ana.

Los cambios bruscos de pendiente de la curva mostrada en la figura anterior entre los 50 y 210 segundos deben al ingreso de pequeñas burbujas de  $\text{CO}_2$ .

A partir del segundo 260 la curva se estabiliza en  $22,3\% \text{CO}_2 \pm 0,5\%$  aproximadamente, que es un valor muy similar al valor medido en [23].

A partir del segundo 340, el valor de la concentración de  $\text{CO}_2$  cae bruscamente al 14,5% en promedio, esto se debió al ingreso de agua por la línea de succión del gas. Lo que ocasionó el ingreso de agua, fue un cambio de nivel físico del instrumento, que hizo que este se inclinara y que el agua dentro de la cámara de equilibrio se mueva hacia el lado de la línea de succión del gas.

#### 4.5.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA FUENTE TERMAL PALMIRA

La segunda prueba de operación del sistema automático para la medición de la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto en fuentes naturales de agua, se llevó a cabo en la fuente termal Palmira. En la Figura 4.34 y Figura 4.35 se muestra la instalación del sistema en la fuente termal Palmira.

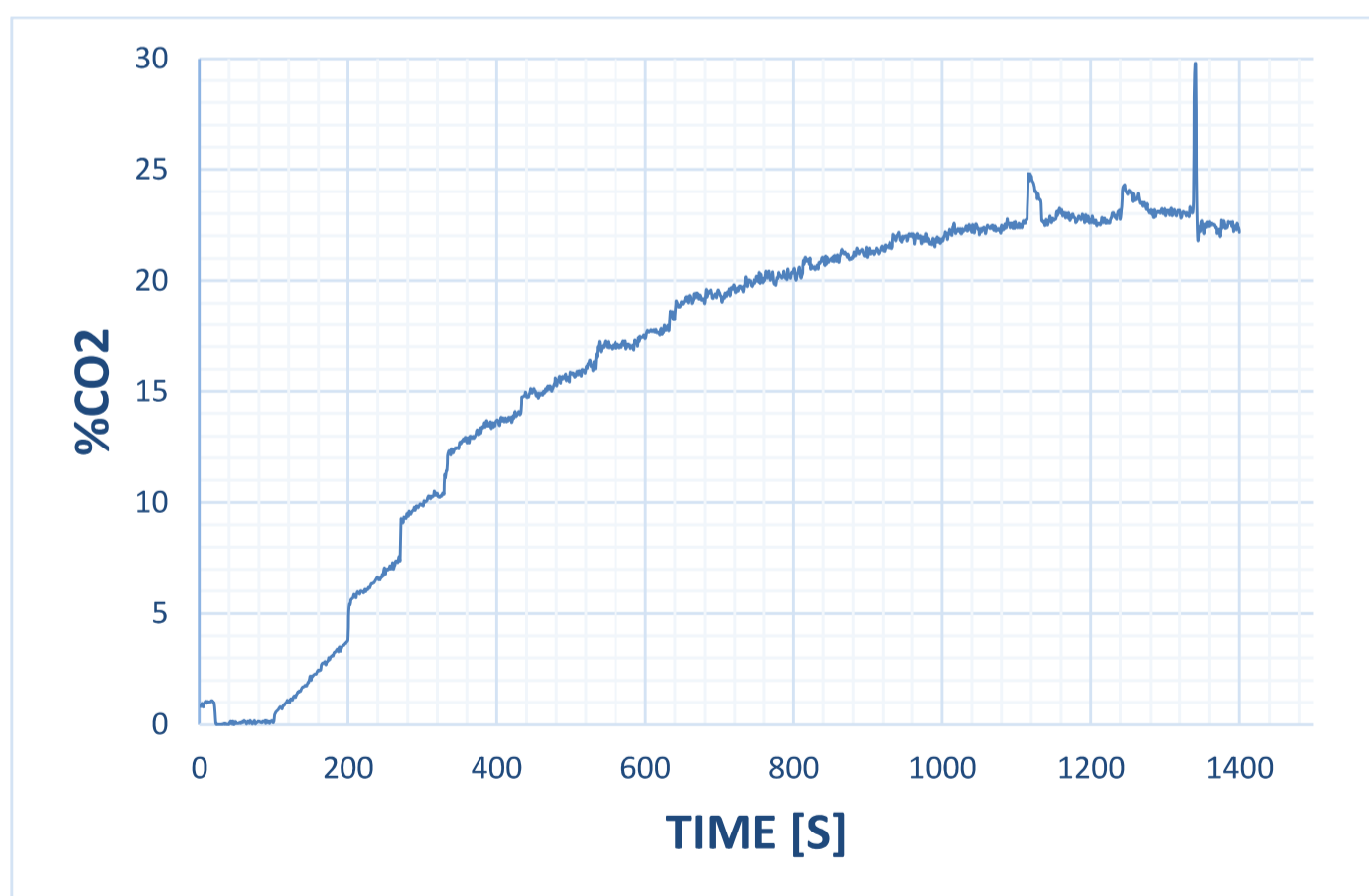


**Figura 4.34.** Instalación de los equipos para realizar las pruebas de medición de la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto en agua, en la fuente Palmira.



**Figura 4.35.** Proceso de medición de la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto en la fuente termal Palmira.

Una vez concluidas las mediciones se obtiene como resultado la curva que se presenta en la Figura 4.36.



**Figura 4.36.** Curva de la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto en agua, obtenida durante la medición en la fuente Palmira.

En la Figura 4.36, se puede observar claramente que el valor de la concentración de CO<sub>2</sub> se estabiliza en aproximadamente 22,7%, dicho valor es muy cercano al valor obtenido en [23], en donde las mediciones se realizaron varios años atrás y con otras técnicas. También se puede observar tres picos que sobrepasan el valor de estabilización, estos se deben a pequeñas burbujas de gas que ingresan por la línea de agua.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Se puede concluir que el objetivo principal de este proyecto ha sido alcanzado, debido a que los datos obtenidos durante las pruebas de laboratorio del instrumento desarrollado en el presente trabajo fueron los que se esperaban de acuerdo con los cálculos realizados. También los valores obtenidos durante las pruebas de campo resultaron muy similares con los datos obtenidos de la investigación realizada en [23], la misma que se llevó a cabo varios años atrás y con un método diferente al utilizado en el presente proyecto.
- Durante la elaboración del presente proyecto se observó que existe una gran variedad de métodos para medir la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en agua, cuya aplicación práctica depende en gran medida de los objetivos que se quieran alcanzar y de las condiciones del lugar donde se requiera hacer las mediciones.
- Durante la investigación y recopilación de información para el desarrollo de este proyecto, se pudo observar que la monitorización de la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en fuentes naturales de agua, especialmente las que se encuentran o nacen de los volcanes, es un parámetro de referencia muy importante para mejorar la vigilancia volcánica.
- Se implementó una tarjeta de control basada en un microcontrolador PIC, que permite controlar todos los elementos eléctricos, electrónicos y electromecánicos del sistema y que funciona adecuadamente, tal como se comprobó en las pruebas de laboratorio y campo.
- Como parte de la tarjeta de control antes mencionada, se implementó también un circuito que permite acondicionar, digitalizar y almacenar las

señales generadas por el espectrómetro infrarrojo y los dos sensores de temperatura tipo RTD.

- En la tarjeta de control se dispuso un puerto Ethernet, mediante el cual se puede realizar una conexión con un computador para obtener los datos del sistema o con un radio transmisor digital, para transmitir los datos hacia los servidores del IG-EPN.
- Se implementó una interfaz gráfica en Labview, que nos permite controlar el instrumento y acceder a sus datos, tanto en modo manual como automático. Esta interfaz puede ser instalada en cualquier computador que disponga sistema operativo Windows, sin la necesidad de instalar todo el paquete del programa Labview, es decir, puede ser utilizada como una aplicación independiente.
- Se implementó y se comprobó el enlace de radio para el control remoto del Sistema Automático para la Medición de la Concentración de CO<sub>2</sub> Disuelto en Fuentes Naturales de Agua y mediante el cual se realizó la transmisión de los datos hacia el computador donde se ejecuta la interfaz gráfica.
- Durante las pruebas de laboratorio se comprobó, que a pesar de disponer de botellas de mezclas de gases para calibración, cuando se tiene un sensor que mide concentraciones relativamente altas, se hace necesario elaborar disoluciones para su calibración y que el método que se desarrolló en el numeral 4.2.4.2 es válido, siempre y cuando se registre adecuadamente los pesos de cada componente y se tome en consideración los factores que pueden influir a la hora de medir el peso de los componentes con una balanza de precisión.
- Durante las pruebas de campo, se observó que, durante el transporte del agua desde la fuente hacia la cámara de equilibrio, puede existir el ingreso de burbujas de gas que pueden provocar errores en la medición o de hecho arruinarla completamente, ya que de acuerdo con [23], la concentración de CO<sub>2</sub> burbujeante es de aproximadamente el 98%. Estos efectos se pueden observar claramente al inicio de la curva presentada en la Figura 4.33, donde

la pendiente inicial es muy elevada y al final de la curva presentada en la Figura 4.36 donde se tiene un pico que llega hasta el máximo valor del rango del sensor infrarrojo.

- Se observó también, que otro efecto que puede hacer que la medición sea completamente anulada, es el ingreso de agua por la línea de succión de la mezcla aire-gas, como se observa al final de la curva presentada en la Figura 4.33.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Durante la realización de las pruebas de laboratorio, se debe tener especial cuidado con no sobrepasar la presión máxima que puede soportar el sensor infrarrojo, para ellos basta utilizar una válvula manual de tres vías, para que el exceso de presión durante la prueba sea regulado por una de las salidas, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 4.12.
- Cuando se realicen las mediciones en campo, se debe prestar atención con la nivelación de la caja que contiene los elementos. La nivelación se debe hacer de tal manera que la cámara de equilibrio quede completamente perpendicular al plano horizontal; de no hacerlo correctamente, existe el riesgo de que el nivel del agua sea mayor en el lado de la línea de succión de la mezcla aire-gas y esta ingrese hacia los filtros, los cuales se taparán y la medida no será válida.
- Debido a la presencia de sales en el agua de fuentes naturales, es necesario verificar cada cierto tiempo que las mangueras o entradas de la bomba peristáltica y de la cámara de equilibrio no se encuentren tapadas por la acumulación de sales.
- En el extremo de la manguera de la línea de succión se debe colocar una malla para evitar el paso de material sólido con un tamaño de partículas lo suficientemente grande como para taponar las mangueras o las entradas de la cámara de equilibrio.

- Se debe también tener cuidado con los filtros en el sub-sistema aire-gas, se deben comprobar periódicamente para verificar que no existen taponamientos de los mismos.
- Para mejorar la integración del sistema a la red de vigilancia volcánica, sería ideal buscar la manera de integrar la interfaz gráfica al módulo de adquisición SEISCOMP3, que es el programa que procesa los datos de la actividad sísmica y volcánica en el IG-EPN.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Inguaggiato, L. Calderone, C. Inguaggiato, S. Morici, F. Vita, «Dissolved CO<sub>2</sub> in natural waters: development of an automated monitoring system and first application to Stromboli volcano (Italy),» *Ann. of Geophys.*, vol. 54, nº 2, pp. 209-218, 2011. [Online]. Available: [www.annalsofgeofysics.eu/index.php/annals](http://www.annalsofgeofysics.eu/index.php/annals). DOI: 10.4401/ag-5180.
- [2] P. Hernández, J. Salazar, Y. Shimoike, T. Mori, K. Notsu, N. Pérez, «Diffuse emission of CO<sub>2</sub> from Miyakejima volcano, Japan,» *Chem. Geo.*, vol. 177, pp. 175-185, 2001.
- [3] C. Oppenheimer, D.M. Pyle and J. Barclay, Volcanic Degassing, special publication N° 213, London: Geological Society, pp. 26-47, 2013.
- [4] D. Granieri, G. Chiodini, W. Marzocchi, R. Avino, «Continuous monitoring of CO<sub>2</sub> soil diffuse degassing at Phlegraean Fields (Italy): influence of environmental and volcanic parameters,» *E. and Plan. Scien. Lett.*, vol. 212, pp. 167-179, 2003.
- [5] F. Viveiros, C. Cardellini, T. Ferreira, S. Caliro, G. Chiodini, C. Silva, «Soil CO<sub>2</sub> emissions at Furnas volcano, Sao Miguel Island, Azores archipelago: Volcano monitoring perspectives, geomorphologic studies, and land use planning application,» *J. Geophys. Res.*, 115, B12208, DOI: 10.1029/2010JB007555.
- [6] R. A. ESPAÑOLA, «Diccionae fr rio de la lengua española,» REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, 2016. [Online]. Available: <http://www.dle.rae.es>. [Último acceso: 19 Noviembre 2016].
- [7] D. Andrade, S. Hidalgo, M. Monzier, J. Eissen, B. Beate, «Tipos de fenómenos volcánicos asociados a las erupciones del Atacazo-Ninahuilca y Pululahua,» 2nd ed., Quito, Corporacion Editorial Nacional, 2012, p. 38.
- [8] G. Chiodini, R. Cioni, M. Guidi, B. Raco, L. Marini, «Soil CO<sub>2</sub> flux measurements in volcanic and geothermal areas,» *App. Geochem.*, [Online]. Vol. 13, N° 5, pp. 543-552 Available: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292797000760](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292797000760).

- [9] C. Cardellini, G. Chiodini, F. Frondini, D. Granieri, J. Lewicki, L. Peruzzi, «Accumulation chamber measurements of methane fluxes: application to volcanic-geothermal areas and landfills,» *App. Geochem.*, vol. 18, pp. 45-54, 2003.
- [10] alertatierra, «alertatierra,» alertatierra, 2016. [Online]. Available: <http://alertatierra.com/geologicos/volcanes/tipos-e-intensidad-de-las-erupciones-volcanicas>. [Last access: November 2016].
- [11] C. Capasso, S. Inguaggiato, «A simple method for the determination of dissolved gases in natural waters. An application to thermal waters from Vulcano Island,» *Applied Geochemistry*, vol. 13, nº 5, pp. 631-642, 1998.
- [12] U. A. d. Madrid, «Universidad Autonoma de Madrid,» 2008. [Online]. Available: [https://www.uam.es/departamentos/ciencias/quimica/estruct/quimica1/materiales/Tema6\\_1.pdf](https://www.uam.es/departamentos/ciencias/quimica/estruct/quimica1/materiales/Tema6_1.pdf). [Last access: November 2016].
- [13] F. Wikimedia, «WIKIPEDIA,» Fundación Wikimedia, 20 Mayo 2001. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Henry](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Henry). [Last access: November 2016].
- [14] A. J. M. Ávila, «Universidad de Granada: COMPUTATIONAL CHEMISTRY,» 2012. [Online]. Available: [http://www.ugr.es/~mota/QIA\\_SEMINARIO-1.pdf](http://www.ugr.es/~mota/QIA_SEMINARIO-1.pdf). [Last access: November 2016].
- [15] M. Beychok, «ChemEngineering,» 2016. [Online]. Available: [https://chemengineering.wikispaces.com/Henry's+Law#cite\\_note-4](https://chemengineering.wikispaces.com/Henry's+Law#cite_note-4). [Last access: November 2016].
- [16] The Engineering ToolBox, [Online]. Available: [http://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d\\_1148.html](http://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d_1148.html). [Last access: November 2016].
- [17] J. M. G. Mañas, «Universidad del País Vasco: Curso de Biomoléculas,» Universidad del País Vasco, [Online]. Available: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/ph/medida.htm#m2>. [Last access: November 2016].

- [18] acrilux, «acrilux,» 2016. [Online]. Available: <http://acrilux.com.ec/files/PROPIEDADES.pdf>. [Last access: November 2016].
- [19] acrilico-y-policarbonato, «acrilico-y-policarbonato.com,» 2016. [Online]. Available: <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html>. [Last access: November 2016].
- [20] C. S. d. I. C. España, «mncn: museonacionaldecienciasnaturales,» 2016. [Online]. Available: [http://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es\\_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia\\_de\\_gases.pdf](http://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia_de_gases.pdf). [Last access: December 2016].
- [21] "Non-Dispersive Infrared", Edinburgh Instruments Ltd., Tech. Note, Livingston, 2014.
- [22] "How to measure CO2" App. note, vaisala, 2013. [Online]. Available: <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228ES-A.pdf>. [Last access: December 2016].
- [23] S. Inguaggiato, S. Hidalgo, B. Beate and J. Bourquin, «Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc,» *Geofluids*, n° doi: 10.1111/j.1468-8123.2010.00315.x, 210.
- [24] *GASCARD NG*, Edinburgh Instruments Ltd., Livingston, 2011.
- [25] M. A. Pérez García, J. C. Álvarez Antón, J. C. Campo Rodríguez, Fco. J. Ferrero Martín, G. J. Grillo Ortega, *Instrumentación Electrónica*, 2nd. ed., Madrid, España: Thomson, 2008, Cap. 6: Sensores de temperatura de resistencia metálica, pp. 207-226.
- [26] M. A. Pérez García, J. C. Álvarez Antón, J. C. Campo Rodríguez, Fco. J. Ferrero Martín, G. J. Grillo Ortega, *Instrumentación Electrónica*, 2nd. ed., Madrid, España: Thomson, 2008, Cap. 13: Termopares, pp. 333-345.
- [27] Wikimedia, «WIKIPEDIA,» Fundación Wikimedia, 20 Mayo 2001. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Peristalsis>. [Último acceso: Diciembre 2016].

- [28] T.-R. C. PUMP, «T-REX CONCRETE PUMP,» 2016. [Online]. Available: <http://www.trexpump.com/como-funciona-una-bomba-peristaltica>. [Last access: December 2016].
- [29] G. D. T. GmbH, «Peristaltic Pumps,» Puchheim, 2011.
- [30] *Micro Diaphragm Gas Sampling Pumps*, KNF, Freiburg, 2015.
- [31] *Electroválvulas de mando directo*, CAMOZZI, [Online]. Available: [www.camozzi.com](http://www.camozzi.com).
- [32] *PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet*, Microchip Technology Incorporated, Chandler, 2006.
- [33] *ERM2004-2\_Series\_Datasheet*, EastRising Technology Co. Limited, Guangdong, China, 2013.
- [34] *Nano LANReach Data Sheet Ver. 1.16*, Connect One, San José, CA, 2009.
- [35] *SanDisk SD Card Product Family OEM Product Manual Version 2.2*, SanDisk Corporation, Milpitas, CA, 2007.
- [36] "GPS 18X", *Tech. Spec.*, Garmin Ltd., Olathe, KS, 2011.
- [37] *LMx24, LMx24x, LMx24xx, LM2902, LM2902x, LM2902xx, LM2902xxx Quadruple Operational Amplifiers*, Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, 2015.
- [38] *HCC/HCF40107B DUAL 2-INPUT NAND BUFFER/DRIVER*, SGS-THOMSON Microelectronics, Geneva, Switzerland, 1994.
- [39] DS275 Line-Powered RS-232 Transceiver Chip, Dallas Semiconductor, Dallas, Texas.
- [40] *PC817 Series High Density Mounting Type Photocoupler*, SHARP, Osaka, 2016.
- [41] *MC78XX/LM78XX/MC78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator*, Fairchild Semiconductor Corporation, 2001.
- [42] *LM117/217/317 1.2V TO 37V VOLTAGE REGULATOR*, STMicroelectronics, Geneva, Switzerland, 2004.
- [43] *LM1117/LM1117I 800mA Low-Dropout Linear Regulator*, National Semiconductor Corporation, 2001.



- [44] *Precision Temperature-Sensing With RTD Circuits*, Microchip Technology Inc., Chandler, AZ, 2003.
- [45] *SanDisk Secure Digital Card Product Manual Version 1.9*, SanDisk Corporation, Sunnyvale, CA, 2003.
- [46] *Zeners 1N4728A - 1N4752A*, Fairchild Semiconductor Corporation, Sunnyvale, CA, 2001.
- [47] Wikimedia, «WIKIPEDIA,» Fundación Wikimedia, 20 Mayo 2001. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Transceptor>. [Último acceso: 20 Diciembre 2016].
- [48] E. F. Schubert, "Light-Emitting Diodes Second Edition", New York: Cambridge University Press, 2006. pp. 107-111.
- [49] *IRFZ44N HEXFET® Power MOSFET*, International Rectifier, California, 2001.
- [50] *L293x Quadruple Half-H Drivers*, Texas Instrument, Dallas, Texas, 2016.
- [51] *FGR2 Ethernet 900 MHz Industrial Radio*, Freewave Technologies, Inc, Boulder, CO, 2017.
- [52] PELICAN, «PELICAN,» PELICAN PRODUCTS, INC., 2017. [Online]. Available: <https://www.pelican.com/us/es/product/watertight-protector-hard-cases/large-case/standard/1600/>. [Last access: January 2017].
- [53] K. Betke, "The NMEA 0183 Protocol", NMEA, New Bern NC 28564-3435, 2001.
- [54] *CCS C Compiler Manual PCB / PCM / PCH*, Custom Computer Services Inc., BROOKFIELD, WI 53008 U.S.A., 2015.
- [55] C. A. HENAO y E. Duque Cardona, "Manejo De Una Memoria SD/MMC con un PIC16F87x"., *Scie. Tech.*, 2010, nº 44, pp. 316-320.
- [56] Antonio, «Tutoriales PIC,» blogger, 2013. [Online]. Available: <http://picfernalía.blogspot.com/2013/04/interfaz-con-tarjetas-sd-protocolo-spi.html>. [Last access: December 2016].
- [57] Suky, «TODOPIC,» Simple Machines, 10 Enero 2010. [Online]. Available: <http://www.todopic.com.ar/foros/index.php?PHPSESSID=5um1mn38sveb974vmm7s8ite26&topic=27786.0>. [Last access: December 2016].

- [58] *iChip Config Utility User Manual v. 2.4.95*, Connect One Ltd., San Jose, CA 95128, 2012.
- [59] *Gasco Precision Calibration Mixtures*, GASCO 2017 [Online]. Available: <http://www.gascogas.com>. [Last access: February 2017].
- [60] *Explorer Balances Instruction Manual*, OHAUS Corporation, 2016. [Online]. Available: <http://mx.ohaus.com/es-MX/ExplorerPrecision-16>. [Last access: February 2017].
- [61] FLUKE, Fluke Inc., 2017. [En línea]. Available: <http://en-us.fluke.com/products/digital-multimeters/fluke-179-digital-multimeter.html#resources>. [Último acceso: 14 febrero 2017].

## **ANEXOS**

- **ANEXO A:** Trabajos de previos
  - A-1:** Dissolved CO<sub>2</sub> in natural waters: development of an automated monitoring system and first application to Stromboli volcano (Italy)
  - A-2:** Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc
  
- **ANEXO B:** Diagramas esquemáticos del circuito electrónico
  
- **ANEXO C:** Especificaciones técnicas
  - C-1:** Sentencias NMEA 0183 GPS GARMIN 18X LVC
  - C-2:** Asignación de pines para varios modelos de memorias SD
  - C-3:** Puente serial-ethernet Nano Land Reach

**ANEXO A**  
**TRABAJOS PREVIOS**

## **ANEXO A-1**

**Dissolved CO<sub>2</sub> in natural waters: development of an automated monitoring system and first application to Stromboli volcano (Italy)**

## Dissolved CO<sub>2</sub> in natural waters: development of an automated monitoring system and first application to Stromboli volcano (Italy)

Salvatore Inguaggiato<sup>1,\*</sup>, Lorenzo Calderone<sup>1</sup>, Claudio Inguaggiato<sup>2</sup>, Sabina Morici<sup>1</sup>, Fabio Vita<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Palermo, Palermo, Italy

<sup>2</sup> Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Palermo, Italy

### Article history

Received March 11, 2011; accepted May 25, 2011.

### Subject classification:

Gas–water interaction, Dissolved CO<sub>2</sub>, Fluid geochemistry, Geochemical monitoring.

### ABSTRACT

The study of geochemical parameters applied to natural systems has provided improved knowledge of geochemical mechanisms of gas/rock dissolution in natural waters that are linked to gas–water and/or water–rock interaction processes. Here we present the results of our studies focused on the development of an automated monitoring system for measuring the amount of dissolved CO<sub>2</sub> in natural waters. The system is based on the principle of a dynamic equilibrium between water and the air as the host gas. The P<sub>CO<sub>2</sub></sub> measurements were carried out every four hours, and the equilibration time was around 20 minutes. Moreover, application to the thermal aquifer of Stromboli volcano during the 2009–2010 period is shown and analyzed. The data highlight a clear correlation between the changes in the P<sub>CO<sub>2</sub></sub> in the thermal aquifer and the changes in volcanic activity.

### Introduction

Over the last 15 years, fluid geochemistry as applied to active volcanic areas has markedly improved our knowledge of the physico-chemical relationships between magmatic and crustal fluids. This improvement has allowed the formulation of geochemical models that are more and more refined, and that are suitable for an understanding of the geochemical variations linked to changes in volcanic activity [Bonfanti et al. 1996a, Bonfanti et al. 1996b, Capasso et al. 2000, Inguaggiato et al. 2000, Inguaggiato et al. 2005, De Gregorio et al. 2007, Inguaggiato et al. 2010, Inguaggiato et al. 2011]. Within this framework, many studies have addressed the monitoring of geochemical parameters that can help in the collection of information relating to the levels of volcanic activity. Geochemical surveillance of an active volcano is aimed at recognizing possible signals that are related to changes in the volcanic activity. Indeed, as a consequence of magma depressurization inside the "plumbing system" and/or of the refilling of the magma reservoirs from new batches of gas-rich melt, the volatiles dissolved in the magma are progressively released according to their relative

solubilities in the basaltic melt. As they approach the surface, the fluids discharged during magma degassing can interact with shallow aquifers and/or can be released along the main volcano-tectonic structures.

High-frequency acquisition of geochemical parameters is a target of many studies that are aimed at improving our knowledge of a volcanic system and at highlighting short-term variations in volcanic activity. The first step is to select the "sensitive" parameters to be monitored, and to select an adequate frequency for the data acquisition. The next step is to identify the "sensitive" sites where the monitoring instrumentation needs to be installed.

Continuous monitoring of geochemical parameters often needs complex equipment. Furthermore, on active volcanoes, the best monitoring sites are often located in areas that are difficult to reach and are sometimes dangerous, like active crater areas. For these reasons, in many cases, it is better to search for suitable sites for monitoring systems in peripheral areas of a volcanic system.

The aim of this study was both to develop an automated and remote monitoring system for measurement of P<sub>CO<sub>2</sub></sub> in equilibrium with the natural ground-waters, and to test such in the field by measuring cold and thermal waters located in active volcanic areas (i.e., Etna and Stromboli volcanoes). Finally, considering that Stromboli volcano is characterized by high frequency of strombolian activity, we carry out a long-term test of the prototype of this automated system in a Stromboli thermal aquifer, to investigate possible relationships between P<sub>CO<sub>2</sub></sub> and summit volcanic activity.

### Geochemical approach to monitoring volcanic fluids

Shallow magma located beneath active volcanoes releases volatiles both during eruptive activity (active degassing) and during inter-eruptive periods (passive degassing). Fumarolic fluids in active volcanic areas arise directly from the magma, and in order of abundance, their

composition is characterized mainly by  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $HF$  and  $HCl$  (condensable gases), and by some non-condensable gases ( $He$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ).

However, during their migration towards the surface, steam and gas can condense and/or dissolve in shallow fluids, such as ground-water, giving origin to hydrothermal aquifers. In terms of mass balance, the relative contributions of each degassing process are mainly dependent on the type of volcanism and on the intensity of the volcanic activity.

Considering their high mobility relative to magma, volatiles can provide useful indications about the state of the volcanic activity. There are always gas emissions in a volcanic system during paroxysmal activity, and these are often the only visible manifestations during the inter-eruptive periods (solphataric activity).

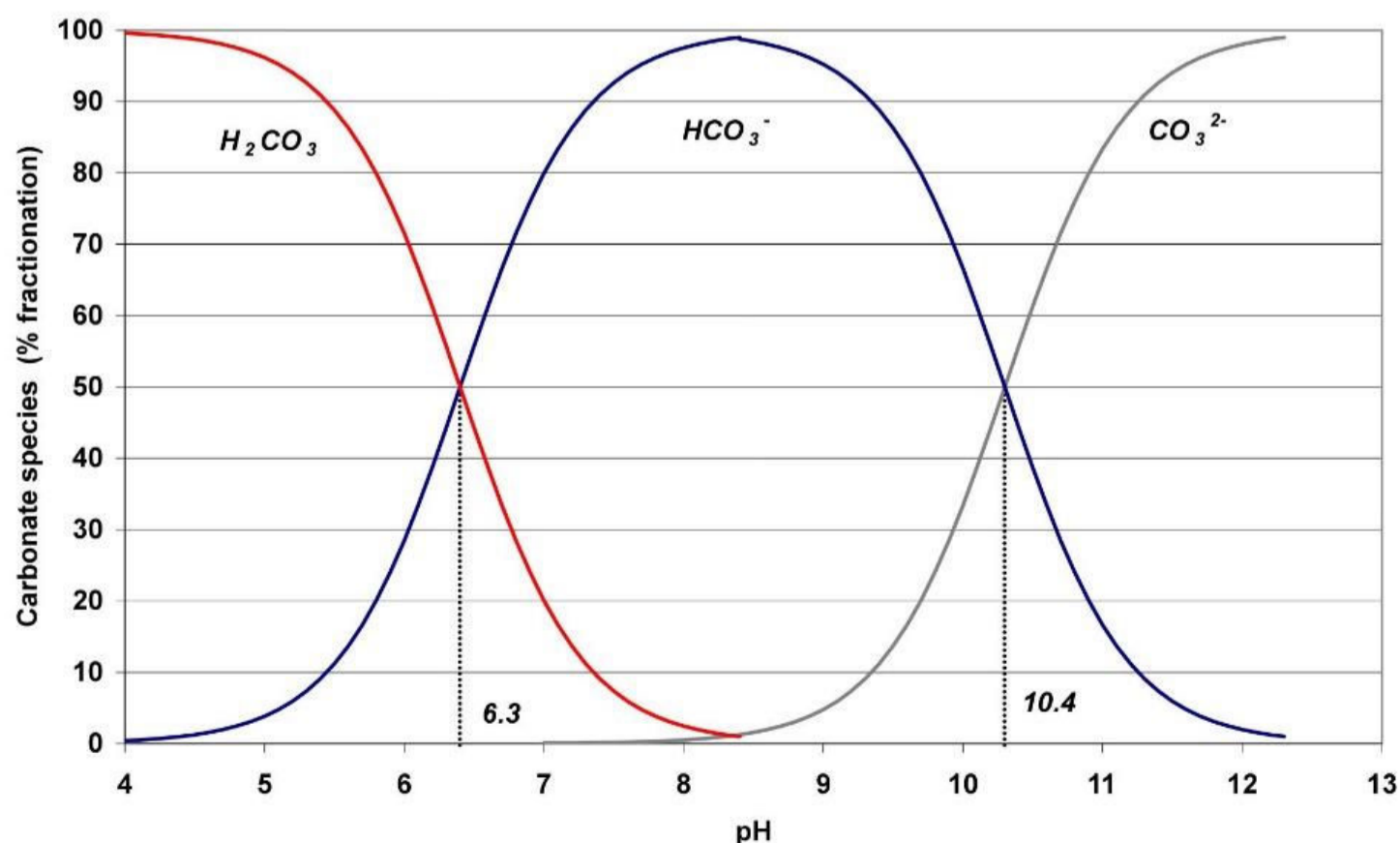
Gas-water interaction processes modify the pristine physico-chemical characteristics of shallow fluids, thus providing useful information regarding both the origin of the fluids and the degree of this interaction at depth. In many cases, significant geochemical changes have been observed in the thermal states of some shallow ground-waters located near active volcanic systems [Capasso and Inguaggiato 1998, Capasso et al. 2000, Inguaggiato et al. 2000, Inguaggiato et al. 2005, Inguaggiato et al. 2010]. This suggests that the relevant input of magmatic gas into the shallow aquifer occurs before changes in the level of volcanic activity; i.e., before eruptions and explosions, and before increases in the number of fumarolic vents and the total volatiles flux [Inguaggiato et al. 2011, Capasso et al. 2005, Carapezza et al. 2004].

The thermal waters, therefore, look promising as targets for geochemical monitoring of active volcanoes. They might represent probable connections with the deep-gas sources, such as a volcano magma chamber and/or deep-seated geothermal reservoirs.

To provide better insight into the importance of hydrothermal systems associated with active volcanoes, the geochemical behaviors of several chemical parameters of naturally discharged fluids have been reported. Within an overall geochemical model, these parameters can provide important information regarding possible changes in volcanic activity. Among these, there are:

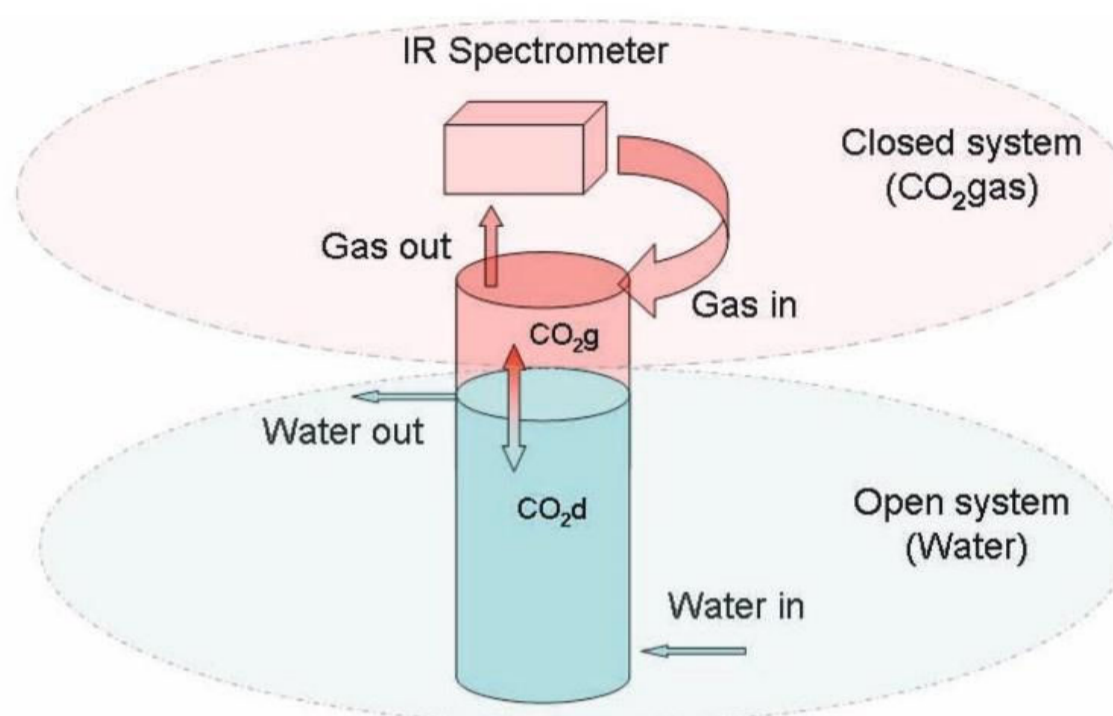
- *pH and  $P_{CO_2}$* : pH measurements provide indications about the presence of acid fluids that reach the surface, and that can interact with ground-waters and change their normal physico-chemical characteristics. In particular, acid fluids can be represented by acid condensates that are rich in  $HF$ ,  $HCl$  and sulfur species, or by pure gas phases, like  $CO_2$ , which once dissolved in an aquifer, results in a decrease in pH. On the basis of the chemical balance between carbon species in solution and pH, it is possible to estimate the partial pressure of the  $CO_2$  in equilibrium with the aquifer ( $P_{CO_2}$ ). Therefore, both pH and  $P_{CO_2}$  provide good indications of the degree of the gas-water interaction processes [Inguaggiato et al. 2000, Carapezza et al. 2004, Inguaggiato et al. 2005, Inguaggiato et al. 2011].

- *Temperature*: Measurements of the well/spring temperatures, coupled with their water discharge, can provide information about the energy transfer from both the hot and the deep fluids towards the surface. This energy



**Figure 1.** Stability fields of the carbon species (as indicated) in pure water on the basis of the water pH. The pHs of 6.3 and 10.3 (vertical dotted lines) indicate the inflection points, where the ratios of the carbon species are equal to 1.0 (for the  $H_2CO_3$ - $HCO_3^-$  and  $HCO_3^-$ - $CO_3^{2-}$  pairs).



DISSOLVED CO<sub>2</sub> IN THE STROMBOLI AQUIFER

**Figure 2.** Schematic representation of the automated monitoring system for measuring  $P_{\text{CO}_2}$ . There are two main circuits: an open water system, driven by a peristaltic pump that pumps the water from the well, and a closed gas system that is driven by a small gas pump that circulates the  $\text{CO}_2$  between the head-space of the equilibration chamber and the IR spectrometer.

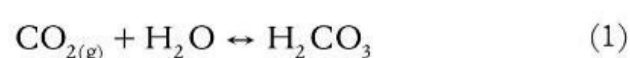
transfer can result in significant variations in the average temperatures of shallow aquifers, with an increase in the water temperature that can overlap, and exceed, the normal seasonal oscillations of an aquifer [Bonfanti et al. 1996a, Bonfanti et al. 1996b].

- *Conductivity:* Measurements of the electrical conductivity of natural waters can provide information about their salinity. Changes in salinity can indicate changes in the end-member mixing (meteoric and sea waters) and/or the input of deep and saline fluids.

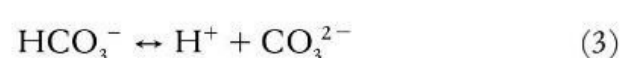
- *Phreatic level:* Close to volcanic areas, the ground-water levels can be influenced by interactions between volcanic and shallow fluids. Indeed, under particular conditions, the gas accumulation in the soils caused by high gas efflux along active tectonic structures can produce temporary decreases in both the permeability and the flow of the ground-water, thus resulting in increases in the local phreatic level [Capasso et al. 1999].

#### Dissolution of CO<sub>2</sub> in natural waters: theoretical principles

The CO<sub>2</sub> released from a magma batch during magma degassing processes produces a series of physico-chemical reactions as it interacts with shallow fluids during its rise towards the surface. During its dissolution in water, CO<sub>2</sub> reacts with H<sub>2</sub>O, forming carbonic acid



Carbonic acid is a weak acid that is ionized in natural waters through the following reactions:



The equilibria of these reactions are ruled by the constants  $K_1$  and  $K_2$ , with values of  $10^{-6.4}$  in Equation (2) and  $10^{-10.3}$  in Equation (3), in pure water at 25 °C. Consequently, the ratio among the carbon species of H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> in solution is strongly dependent on the pH, and through simple calculations it is possible to obtain the theoretical percentages of the single species as functions of pH (Figure 1).

Dissolution of CO<sub>2</sub> in water produces a decrease in pH. Therefore, measurement of pH can provide indications on the amounts of dissolved CO<sub>2</sub> in water, and allow calculation of the  $P_{\text{CO}_2}$  in equilibrium with an aquifer:



$$\log K = \log(\text{HCO}_3^-) + \log(\text{H}^+) - \log(\text{CO}_2) \quad (5)$$

$$\text{pH} = \log(\text{HCO}_3^-)/(\text{CO}_2) + \text{pK} \quad (6)$$

Unfortunately, continuous measurements of pH are affected by many technical problems that do not allow the use of pH for long periods of monitoring (weeks to months). This is mainly when the natural waters have high temperatures and/or high salinities. For this reason, we focused our efforts on providing automated equipment to continuously measure the content of the dissolved CO<sub>2</sub> in these natural waters. The system is based on the dynamic equilibrium between gases dissolved in a liquid phase and a host-gas phase (in this case, air). Henry's Law describes this physico-chemical principle: at chemical equilibrium and at constant temperature, a known volume of liquid in contact with a given gas dissolves a quantity of gas that is proportional to the gas pressure on the liquid (Henry's Law). This is expressed by the following relation:

INGUAGGIATO ET AL.

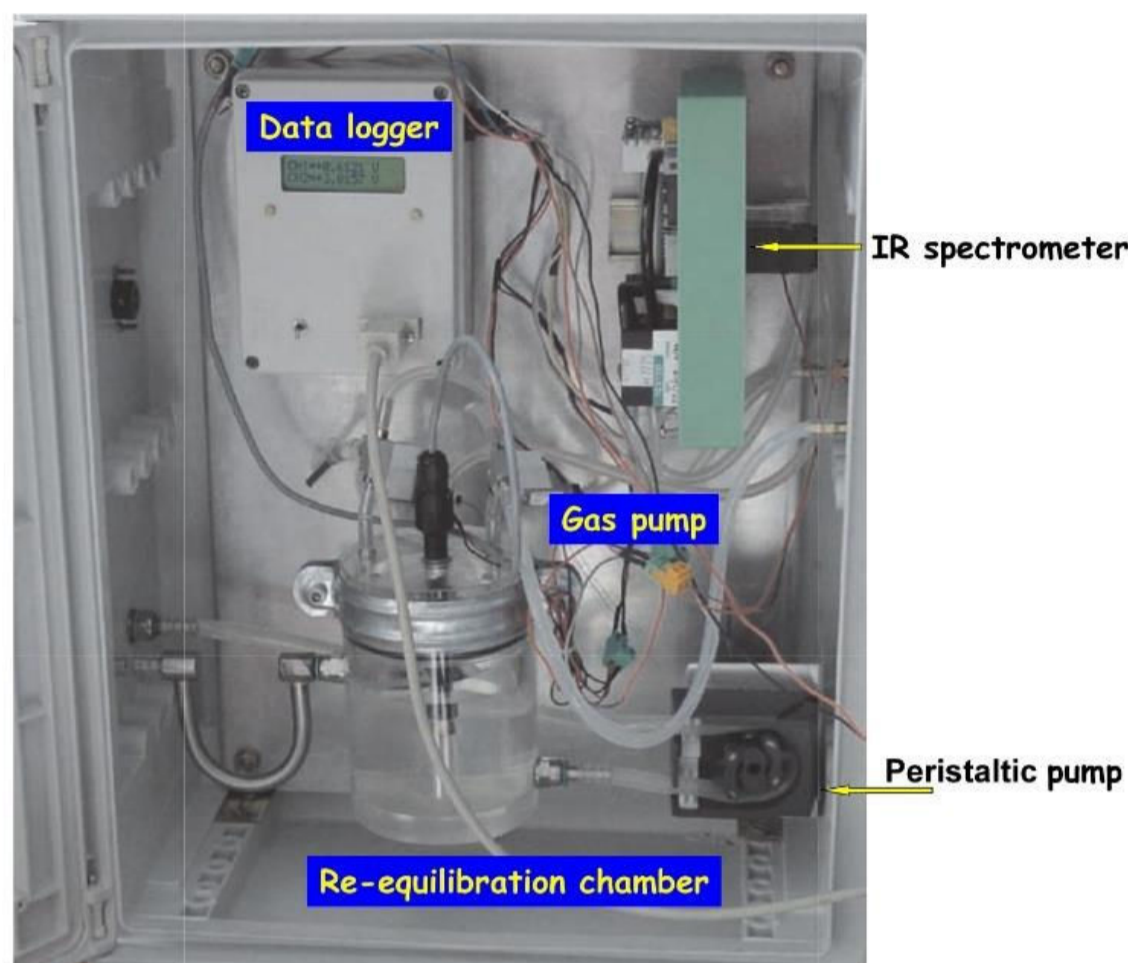


Figure 3. Photograph of the prototype of the continuous monitoring station for measuring dissolved CO<sub>2</sub> in natural waters.

$$K_H = P_i/X_i, \quad (7)$$

where  $P_i$  is the partial pressure of the  $i^{\text{th}}$  gas in the vapor phase (in atmospheres) and  $X_i$  is its molar fraction in the liquid phase. Henry's constant ( $K_H$ ) does not depend on the total gas pressure, and it varies according to both temperature and salinity [Capasso and Inguaggiato 1998].

#### Technical features of the automated system for monitoring $P_{\text{CO}_2}$

The automated system that was designed during the present study is represented by two main circuits: an open-system circuit, where water flows through, and a closed-system circuit, where gases exsolved from and re-equilibrated with the water circulate and are analyzed using an infrared (IR) spectrometer (Figure 2). A peristaltic pump sends the water to a Plexiglas re-equilibration chamber that has a total volume of about 500 mL, with the proportions of 450 mL and 50 mL between the water and the air, respectively. The water level inside the chamber is kept constant by a U-shaped system that discharges any excess water (Figure 3). The water that is circulating inside the open system starts re-equilibrating its dissolved CO<sub>2</sub> with the host gas (the 50 mL of air inside the chamber), according to Henry's Law. The system reaches equilibrium in about 20 min. At the same time, the gas pump allows the circulation of the gas inside the closed-circuit system that is between the re-equilibration chamber and the IR spectrometer. The amount of CO<sub>2</sub> in the circulating gas phase is measured by

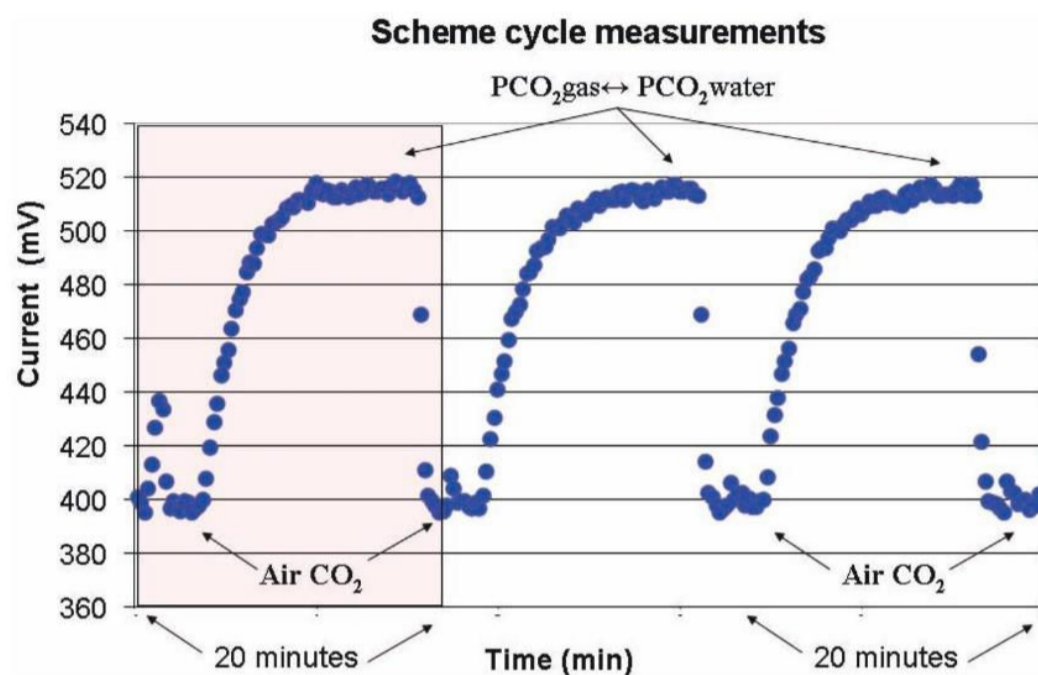
the IR spectrometer, and it increases with time until it reaches the value corresponding to that at complete equilibrium with CO<sub>2</sub> in water:  $P_{\text{CO}_2(\text{gas})} \leftrightarrow P_{\text{CO}_2(\text{water})}$  (Figure 4). The concentration of CO<sub>2</sub> is automatically measured in the air inside the chamber both before and after each re-equilibration cycle. The values of CO<sub>2</sub> reached at the end of the equilibration time (about 20 min) represent the partial pressures of the CO<sub>2</sub> in the natural system being studied at the measured water temperature (Figure 4). The data acquired are recorded by a data logger, and they are then sent by GSM to the Geochemical Acquisition Centre of the INGV in Palermo.

The automated system to measure the dissolved CO<sub>2</sub> comprises the following main items:

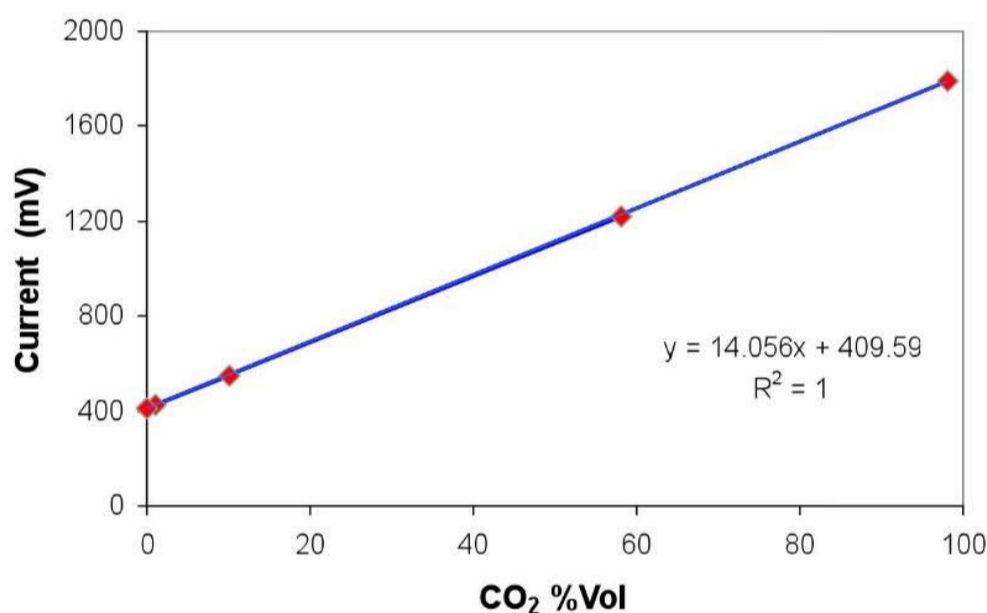
- Re-equilibration chamber (developed at INGV, Palermo);
- Peristaltic pump (Rietschle Thomas, Germany);
- Data logger (developed at INGV, Palermo);
- IR spectrometer (Edinburgh Sensors, UK);
- Gas pump (KNF, Germany);
- Phreatic level sensor (STS, Switzerland);
- Temperature sensor inside the chamber (Analogical Devices, USA);
- Temperature probe inside the well (Analogical Devices, USA);
- Conductivity sensor (B&C, Italy).

#### Laboratory tests and calibration system

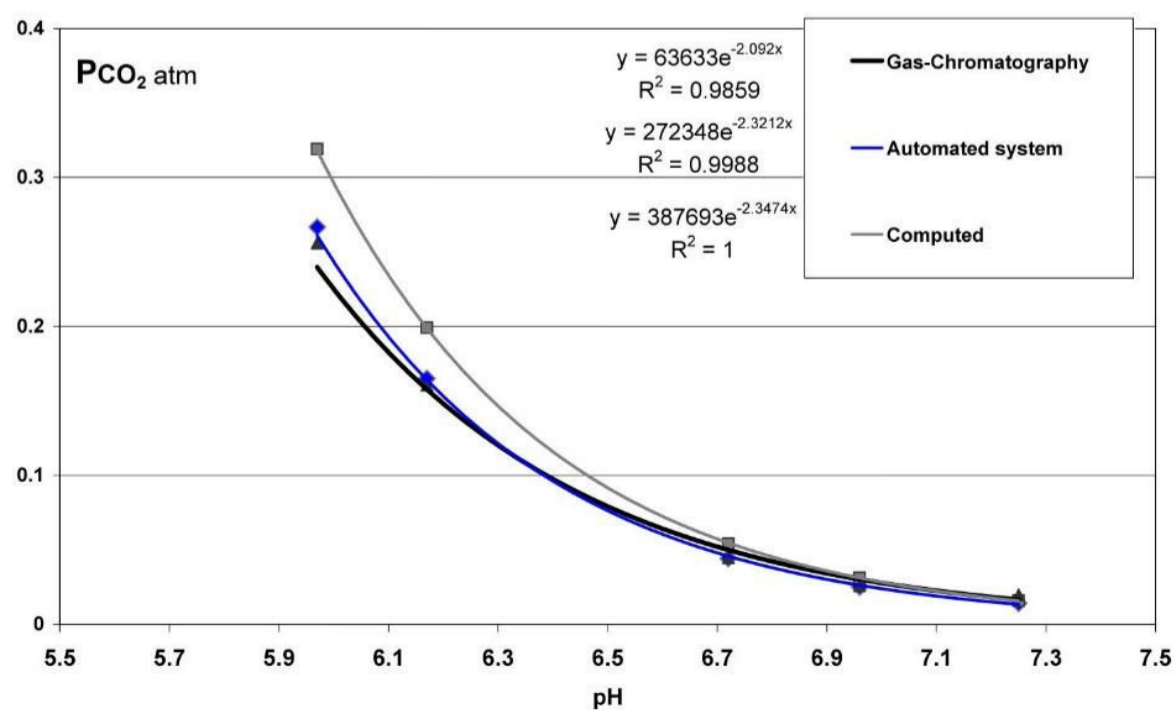
Calibration tests of the IR spectrometer were carried out in the laboratory using standard gas mixtures with different concentrations of CO<sub>2</sub> (range, 0% to 98% vol. CO<sub>2</sub>).

DISSOLVED CO<sub>2</sub> IN THE STROMBOLI AQUIFER

**Figure 4.** Example of measurement cycles of the dissolved CO<sub>2</sub> concentration (mV). These cycles reach equilibrium in 15–20 min. The air CO<sub>2</sub> content is measured both before and after every cycle. Six measurement cycles were performed each day (one every 4 h).

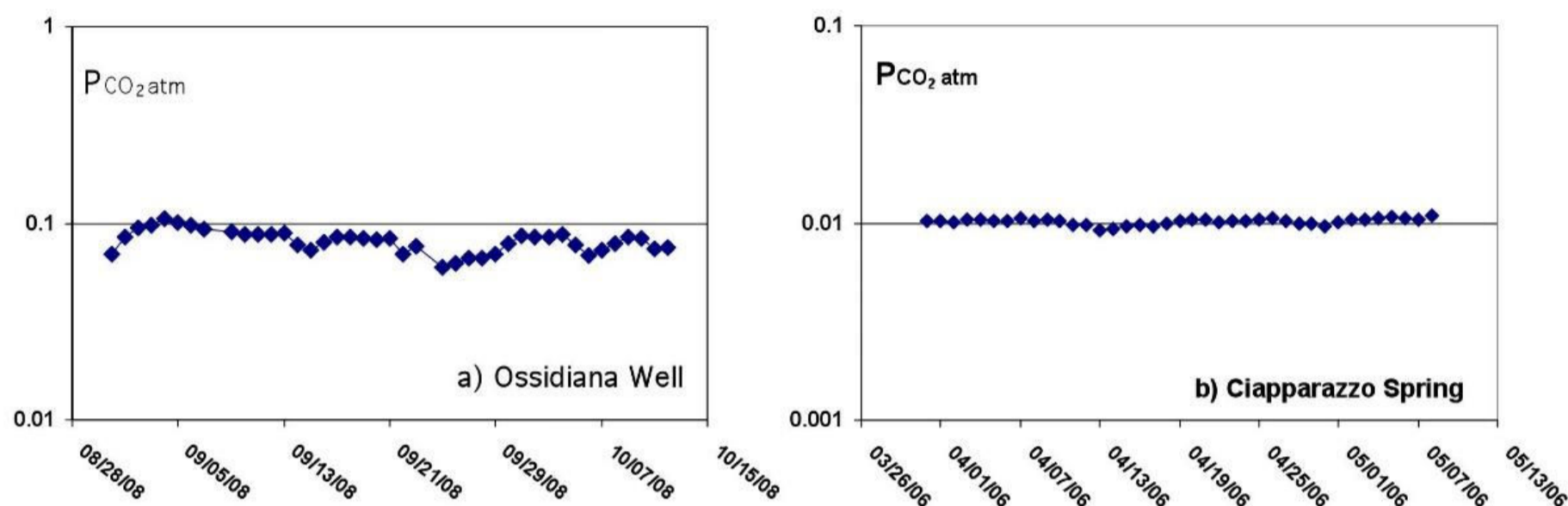


**Figure 5.** Calibration of the IR spectrometer used in the automated monitoring system for  $P_{CO_2}$ , performed with standards of mixed gases with known CO<sub>2</sub> concentrations in air (from 0.034% to 100% vol. CO<sub>2</sub>).



**Figure 6.** Comparisons between CO<sub>2</sub> partial pressures and pHs obtained with the laboratory tests. The three curves represent the best fits of the  $P_{CO_2}$  values both measured (using the automated system and gas chromatography analysis) and computed on the basis of the pH and the HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> content. The different values of  $P_{CO_2}$  and pH were obtained by continually bubbling pure CO<sub>2</sub> through natural water. The data highlight the good correlation between the different ways used for estimating the  $P_{CO_2}$  and the reliability of the automated prototype system.

INGUAGGIATO ET AL.



**Figure 7.** Field measurements of  $P_{\text{CO}_2}$  for the Ossidiana well (a) and the Ciapparazzo spring (b). Ossidiana well (temperature, 40 °C; salinity, 30 mS/cm) is located in the village of Stromboli (Stromboli Island), and Ciapparazzo spring is located on the flank of Mt. Etna (temperature, 13 °C; salinity, 700  $\mu\text{S/cm}$ ).

The good linear response obtained with the IR spectrometer is shown in Figure 5.

Operation system tests were performed using six aqueous solutions at different pHs (range, 5.90 to 7.25) and different amounts of dissolved  $\text{CO}_2$  (range, 0.01 to 0.3 atm  $P_{\text{CO}_2}$ ). To perform this experiment, a 20 L tank of water was used. The aqueous solutions at different pHs were prepared by bubbling pure  $\text{CO}_2$  through the water. The pHs and the bicarbonate contents of the solutions were measured during the experiments, to estimate the corresponding  $P_{\text{CO}_2}$  values. Samples of the dissolved gases ( $\text{CO}_2$ ) were also collected at different pHs for gas-chromatography analysis. Figure 6 shows the  $P_{\text{CO}_2}$  values both as computed and as measured with the different methods (gas chromatography and automated IR spectrometer) plotted against the corresponding pHs. The plot in Figure 6 highlights the good correlation between the  $P_{\text{CO}_2}$  analyzed using gas chromatography and the  $P_{\text{CO}_2}$  analyzed using this new automated IR spectrometer system. Moreover, the computed  $P_{\text{CO}_2}$  values estimated on the basis of the pHs and the  $\text{HCO}_3^-$  contents, also provide good data that are very close to the measured values. Only in the range of pH close to 6.4 (Figure 1, inflection point) are there small differences with the measured values. This is probably due to the strong logarithmic relationship between pH and  $P_{\text{CO}_2}$  at this value, where small differences in pH can result in very large differences in computed  $P_{\text{CO}_2}$ .

#### Short-term experimental test on natural systems

After verifying the good operation of the prototype system in the laboratory, we tested it in the field by measuring natural waters with different physico-chemical characteristics. Therefore, we installed two experimental monitoring systems, one in a cold spring (Ciapparazzo, NW flank of Mt. Etna volcano), and the other in a thermal well (Ossidiana, Stromboli Island). Ciapparazzo spring is located inside a drainage gallery, with a drainage flow of about 700 L/s. This spring is characterized by low temperature and low

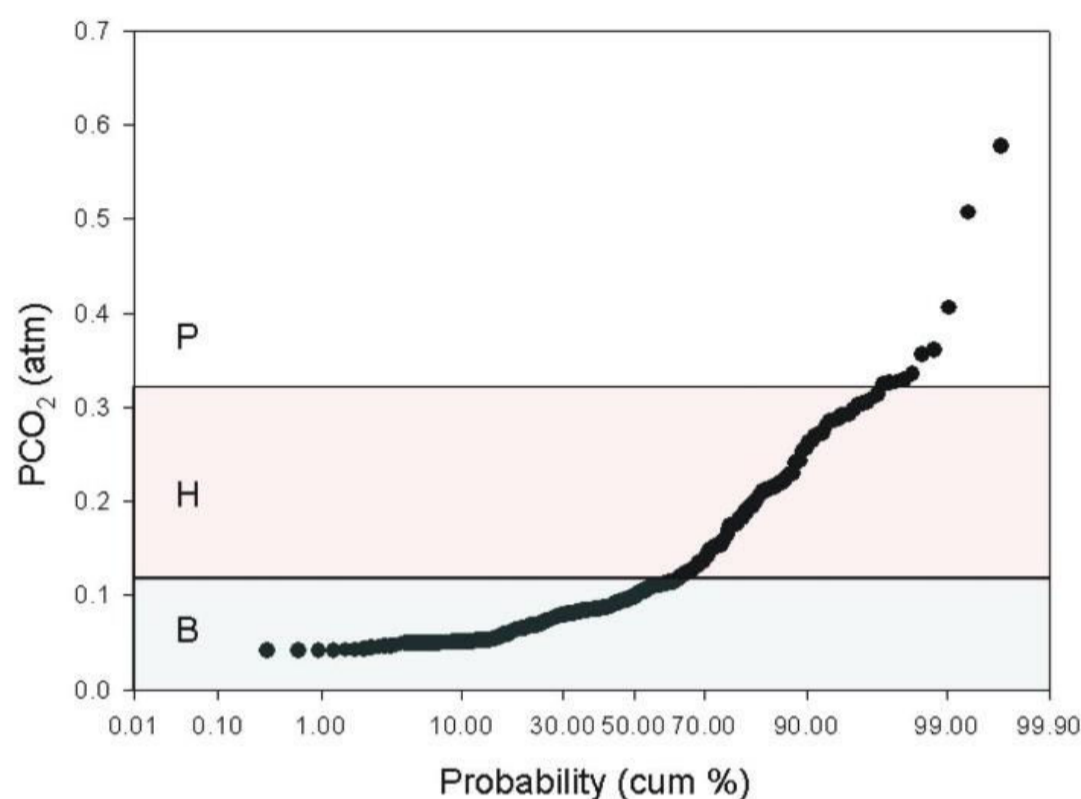
salinity (13 °C and 700  $\mu\text{S/cm}$ , respectively). Ossidiana well is located on the north-east side of Stromboli Island (an active volcano that is characterized by persistent strombolian activity), and it is characterized by temperatures of around 40 °C and high salinity (about 30 mS/cm). The equipment installed in these different natural waters worked successfully, and Figure 7 shows the results of the daily averages of  $P_{\text{CO}_2}$  values acquired over the 2–3 months of observation.

#### Long-term variations in dissolved $\text{CO}_2$

On the basis of the promising results obtained from these first two prototype stations, the geochemical application of this methodology was carried out on Stromboli Island, by installing a revised and improved second version of the prototype monitoring system in a thermal well that had been drilled for scientific purposes (Saibbo Well, on the north-east side of Stromboli Island).

We analyzed the complete  $P_{\text{CO}_2}$  dataset acquired at the Saibbo well station during 2009–2010, which represented the first continuous dataset of dissolved  $\text{CO}_2$  recorded in a well located in an active volcanic system. To improve our knowledge of the behavior of the  $P_{\text{CO}_2}$ , and to link its variations to the different degassing regimes, we processed these  $P_{\text{CO}_2}$  data using a cumulated probability graph [Sinclair 1974]. This graph is shown in Figure 8, where the  $P_{\text{CO}_2}$  is plotted against the cumulated probability for the entire dataset (2009–2010). On the basis of the thresholds identified, we divided these data into three different subsets (B, H and P). Group B includes values below 0.12 atm, which represents about 60% of the total acquired dataset, and it refers to a low degree of gas–water interaction. Group H includes about 40% of the total acquired dataset, with higher values that range between 0.12 atm and 0.32 atm, and which are interpreted as a high degree of gas/water interaction. The third group (P) includes very few data (only 1% of the total acquired dataset), with values up to 0.6 atm.

The histogram of the relative frequencies within the full

DISSOLVED CO<sub>2</sub> IN THE STROMBOLI AQUIFER

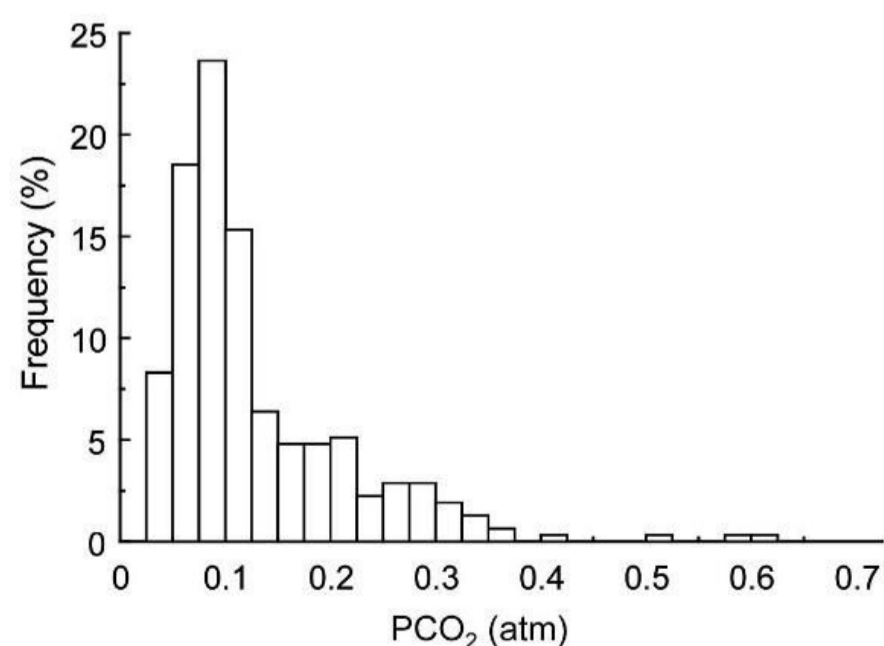
**Figure 8.**  $P_{CO_2}$  values measured for the Saibbo well plotted against cumulated probability of  $P_{CO_2}$  values for the entire dataset (2009-2010). Boxes with letters P, H and B indicate the three subsets defined in this analysis (see main text).

acquired dataset (Figure 9) shows an asymmetric unimodal distribution of  $P_{CO_2}$ , which is centered at around 0.1 atm, with a residual "tail" of values up to 0.6 atm. The average value of  $P_{CO_2}$  (0.1 atm) computed from the data in group B represents the background value during "low" gas–water interactions in the Saibbo well. The right residual tail values (group P) range from 0.4 atm to 0.6 atm and warrant separate discussion and elaboration. Indeed, even though group P includes only about 1% of the  $P_{CO_2}$  dataset — which is insufficient for statistical elaboration — it represents the highest  $P_{CO_2}$  values and it would identify the transient variations due to the very high degree of gas–water interaction.

The daily averages of  $P_{CO_2}$  normalized at standard temperature and pressure (STP) conditions are plotted against time in Figure 10, together with the main explosive events that occurred at the summit craters of Stromboli volcano. Two important behaviors can be seen: an increase in  $P_{CO_2}$  with time from January 2009 to May 2010, with values starting from 0.07 atm that reach 0.60 atm. This behavior suggests a slow and persistent increase in the dissolved gases in the thermal aquifer; moreover, a series of transient increases in  $P_{CO_2}$  were recorded at different times during the 2009-2010 period, thus suggesting sharp and significant increases in the gas–water interactions that are likely to be due to new input of volatiles from deep magmatic sources.

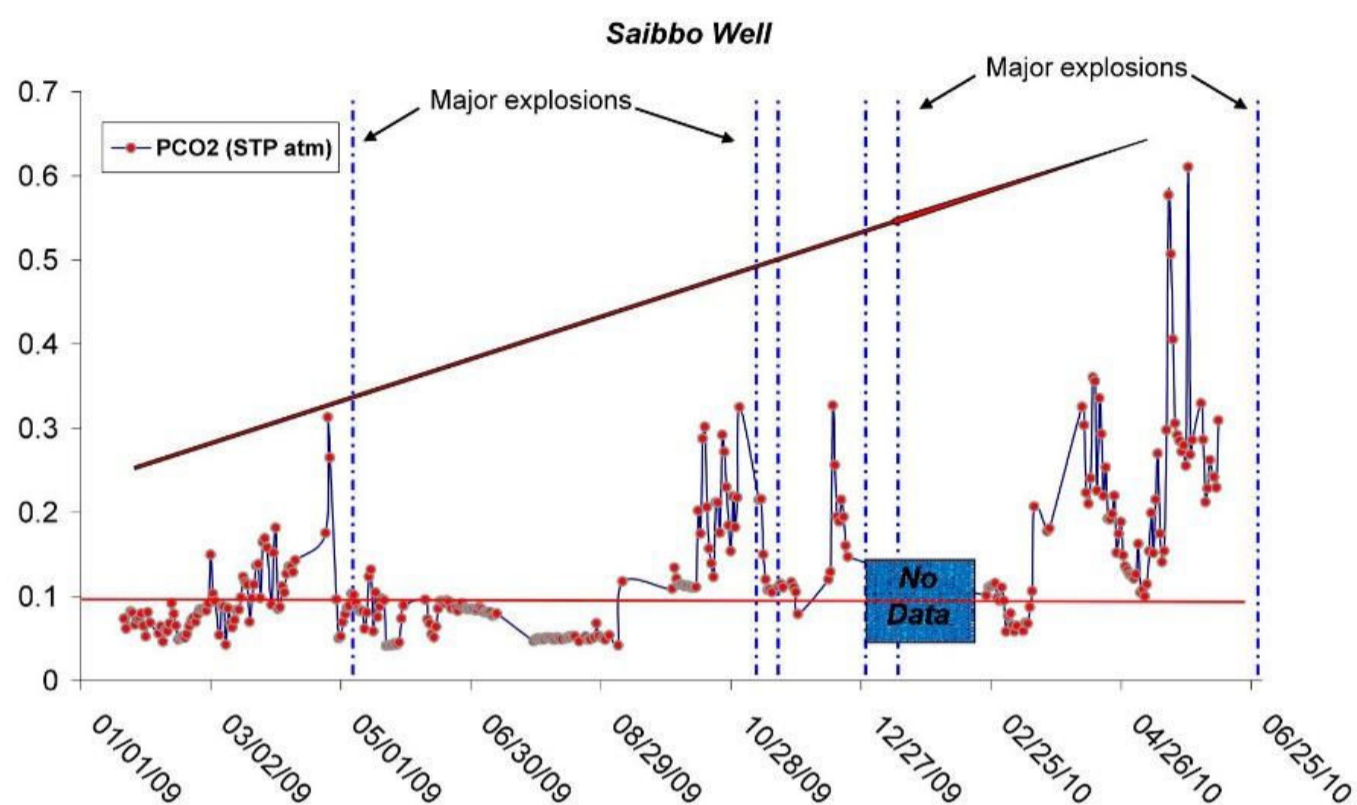
It can also be seen that many of these sharp increases in  $P_{CO_2}$  were followed by increases in the summit volcanic activity. In particular, a slow increase in  $P_{CO_2}$  was recorded from January 2009 (0.07 atm) to April 25, 2009 (0.32 atm). The  $P_{CO_2}$  then quickly returned to background values (0.10 atm), and one week later a paroxysmal event (major explosion) occurred at the summit crater of Stromboli

volcano. The  $P_{CO_2}$  of Saibbo well then remained almost constant until early October 2009, when a new series of sharp increases in  $P_{CO_2}$  were recorded, until November 1, 2009. Then, two major explosions occurred, on November 8 and 24, 2009. A further sharp increase in  $P_{CO_2}$  with a significant peak (up to 0.32 atm) occurred on December 14, 2009, followed by two strong explosions on January 4 and 10, 2010. The first semester of 2010 was characterized by a general increase in  $P_{CO_2}$  driven by two large increments that occurred on April 14, 2010 (0.35 atm), and May 27, 2010 (0.61 atm), and that culminated in a  $P_{CO_2}$  of 0.61 atm. After this large increase in  $P_{CO_2}$ , the explosive activity of Stromboli volcano increased significantly, leading to a major explosive event that occurred on June 30, 2010.

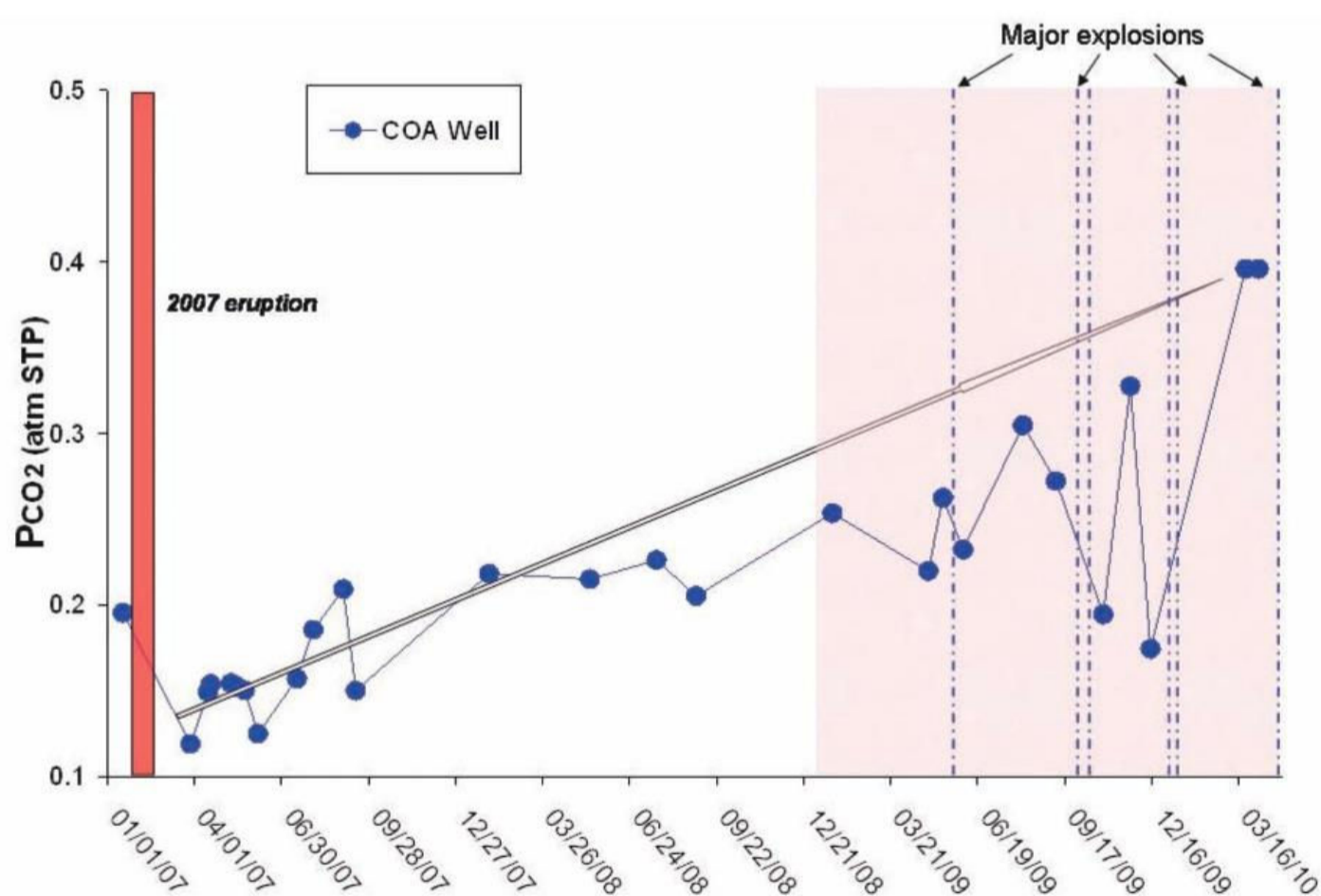


**Figure 9.** Histogram showing the distribution frequency (%) of the  $P_{CO_2}$  values from Saibbo well. The plot shows unimodal distribution of the  $P_{CO_2}$  values centered around 0.1 atm, with residual 'tail' values up to 0.6 atm.

INGUAGGIATO ET AL.



**Figure 10.** Long-term variations of  $P_{\text{CO}_2}$  (STP, atm) for Saibbo well, as acquired from continuous recordings. Vertical blue dashed lines, major explosions from the summit craters of Stromboli volcano from January 2009 to June 2010.



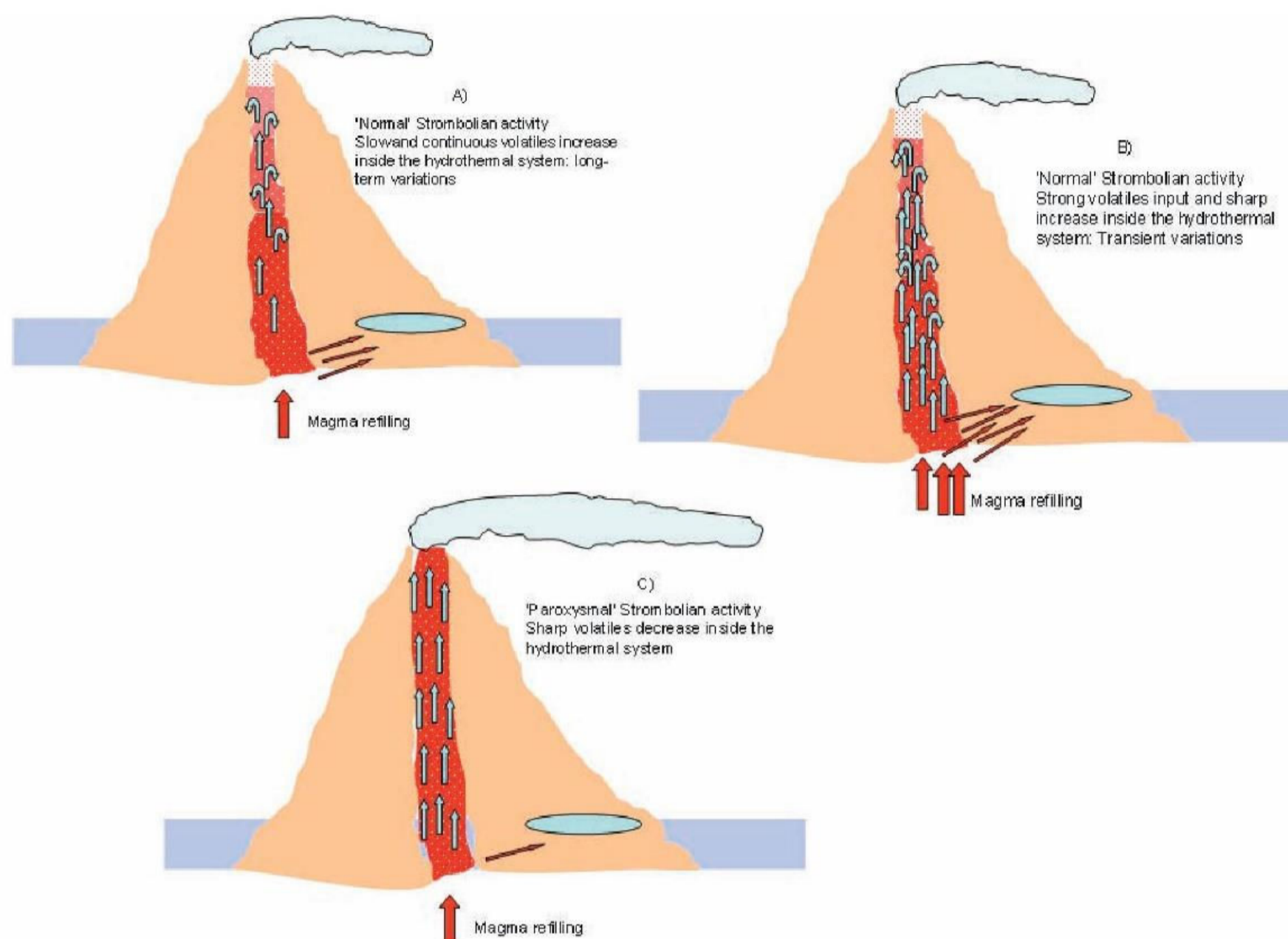
**Figure 11.** Long-term variations in the  $P_{\text{CO}_2}$  (STP, atm) for the COA well, as acquired with low-frequency sampling. This graph highlights the positive trend of  $P_{\text{CO}_2}$  with time (arrow) from the end of the last major eruption of Stromboli volcano (April 2007) to the present. The 2007 eruption (red column) and the major explosions that occurred in the period from January 2009 to June 2010 (red transparent area, vertical blue dashed lines) are shown.

### Discussion and conclusions

High-frequency acquisition of geochemical parameters is one of the main targets of geochemical volcano monitoring. The acquisition of these parameters at different sites and for different types of shallow fluid manifestations represents a good way to obtain a complete picture of a geochemical model of a volcanic system under study.

CO<sub>2</sub> is one of the main species that needs to be

monitored in a volcanic system. The prototype of the monitoring station described in this study provides us with the opportunity to significantly improve the data acquisition frequency of  $P_{\text{CO}_2}$ , and the possibility for the better modeling of hydrothermal systems in active volcanoes. Moreover, the improved amounts of data allow investigations into the relationships among hydrothermal systems, peripheral soil degassing, and summit volcanic activity.

DISSOLVED CO<sub>2</sub> IN THE STROMBOLI AQUIFER

**Figure 12.** Schematic model of interactions between magmatic and shallow fluids in Stromboli volcano under the different conditions of the magma/pressure dynamics inside the "plumbing system" of the volcano. A) Input of exsolved gases from a magma body causes a progressive increase in the partial pressure of the dissolved gases in the peripheral thermal aquifers. B) Input of strong volatiles exsolved from the magma produce a sharp increase in the  $P_{\text{CO}_2}$  inside the hydrothermal system. C) Strongly increased degassing from the shallowest portion of the plumbing system (due to paroxysmal events) causes a decrease in the partial pressure of the dissolved gases in the peripheral thermal aquifers.

We also investigated the relationship between the continuous  $P_{\text{CO}_2}$  data acquired for Saibbo well and a discontinuous dataset of  $P_{\text{CO}_2}$  measured for another thermal well of Stromboli volcano (COA) that was also drilled for scientific purposes (Figure 11). This well is located in Stromboli village, and its water is characterized by high salinity (around 20 mS/cm) and a temperature of around 40 °C. Considering the very different sampling frequencies between these two wells, the two  $P_{\text{CO}_2}$  datasets are not comparable for short-term variations. However, it is possible to observe good similarity between the two wells as the long-term trends, as for the long-standing increase recorded for both of these wells (Figures 10, 11). In particular, after the last eruption that occurred in February-April 2007, when the COA well showed its lowest  $P_{\text{CO}_2}$  values [Inguaggiato et al. 2011], there was a constant increasing trend in the dissolved CO<sub>2</sub> in the aquifer (from 0.10 atm to 0.40 atm  $P_{\text{CO}_2}$ ).

Stromboli volcano is normally characterized by periodic mild-to-moderate explosive activity (known as strombolian activity) that is continuously fed by small batches of volatile

rich magma. To explain this behavior of the CO<sub>2</sub> dissolved in the aquifers, we need to consider the geochemical model of Stromboli volcano that was recently formulated [Inguaggiato et al. 2011]. The "normal" strombolian activity is the result of a "delicate" dynamic balance between the continuous refilling of deep volatiles exsolved from each magma batch, and the superficial degassing [Inguaggiato et al. 2011]. The exsolved magma volatiles rise towards the surface and interact with the shallow fluids (i.e., aquifers) and dissolve in the waters, thus increasing the partial pressure of the dissolved gases.

During "normal" strombolian activity, furthermore, slowly, but continuously, the volatiles exsolved from the magma increase the total amounts of dissolved gases inside the peripheral hydrothermal systems (Figure 12a), thus producing long-term variations that are characterized by a positive increasing trend in  $P_{\text{CO}_2}$  (Figure 10). However, sudden and strong impulses of volatiles arriving from deeper zones of the magma chamber can result in sharp increases in  $P_{\text{CO}_2}$  inside the hydrothermal systems (Figure 12b), and can

produce transient variations that are characterized by marked  $P_{\text{CO}_2}$  peaks (Figure 10). When the magma/pressure levels inside the feeding conduits of a volcano are such that huge amounts of magma rise suddenly towards the surface, the summit strombolian activity increases a lot, which produces increases in both the energy and the frequency of explosions and/or effusive activity. This type of activity usually interrupts the normal strombolian activity (Figure 12c), and a large amount of magma and volatiles are expelled from the volcano, thus decreasing the total pressure inside the 'plumbing system' of Stromboli volcano (Fig. 10). After the 2007 effusive eruption, typical strombolian activity was again recorded at Stromboli volcano, which then allowed a slow, but continuous, increase in the  $P_{\text{CO}_2}$  of the hydrothermal system, which reached its highest values in 2010.

In conclusion, the setting-up of our automated system for measuring  $P_{\text{CO}_2}$  in these natural waters has allowed us to acquire much larger amounts of data that have helped us to better define the geochemical model of Stromboli volcano, which will help us further in future volcanic monitoring programs.

**Acknowledgements.** We thank Franco Tassi and Salvatore Giammanco for their extremely well considered and helpful comments, which improved the quality of our manuscript.

## References

- Bonfanti, P., W. D'Alessandro, G. Dongarrà, F. Parello and M. Valenza (1996a). Medium-term anomalies in ground-water temperature before 1991-93 Mt. Etna eruption, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 73, 303-308.
- Bonfanti, P., W. D'Alessandro, G. Dongarrà, F. Parello and M. Valenza (1996b). Mt. Etna eruption 1991-93: geochemical anomalies in groundwaters, *Acta Vulcanol.*, 8, 107-109.
- Capasso, G. and S. Inguaggiato (1998). A simple method for the determination of dissolved gases in natural waters. An application to thermal waters from Vulcano Island, *Appl. Geochem.*, 13, 631-642.
- Capasso, G., R. Favara, S. Francofonte and S. Inguaggiato (1999). Chemical and isotopic variations in fumarolic discharge and thermal waters at Vulcano Island (Aeolian Island, Italy) during 1996: evidence of a new increase of volcanic activity, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 88, 167-175.
- Capasso, G., R. Favara and S. Inguaggiato (2000). Interaction between fumarolic gases and thermal groundwaters at Vulcano Island (Italy): evidence from chemical composition of dissolved gases in waters, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 102, 309-318.
- Capasso, G., M.L. Carapezza, C. Federico, S. Inguaggiato, and A. Rizzo (2005). Geochemical monitoring of the 2002-2003 eruption at Stromboli volcano (Italy): precursory changes in the carbon and helium isotopic composition of fumarole gases and thermal waters, *B. Volcanol.*, 68, 118-134.
- Carapezza, M.L., S. Inguaggiato, L. Brusca and M. Longo (2004). Geochemical precursors of the activity of an open-conduit volcano: The Stromboli 2002-2003 eruptive events, *Geophys. Res. Letters*, 31, L07620.
- De Gregorio, S., P. Madonia, S. Gurrieri, G. Giudice, and S. Inguaggiato (2007). Contemporary total dissolved gas pressure and soil temperature anomalies recorded at Stromboli volcano (Italy), *Geophys. Res. Letters*, 34, L08301; doi: 10.1029/2007GL029578.
- Inguaggiato, S., G. Pecoraino and F. D'Amore (2000). Chemical and isotopic characterization of fluid manifestations of Ischia Island (Italy), *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 99, 151-178.
- Inguaggiato, S., A.L. Martin-Del Pozzo, A. Aguayo, G. Capasso and R. Favara (2005). Isotopic, chemical and dissolved gas constraints on spring water from Popocatepetl (Mexico): evidence of gas-water interaction magmatic component and shallow fluids, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 141, 91-108.
- Inguaggiato, S., S. Hidalgo, B. Beate and J. Bourquin (2010). Preliminary geochemical characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc, *Geofluids*; doi: 10.1111/j.1468-8123.2010.00315.
- Inguaggiato, S., F. Vita, D. Rouwet, N. Bobrowski, S. Morici and A. Sollami (2011). Geochemical evidence of the renewal of volcanic activity inferred from  $\text{CO}_2$  soil and  $\text{SO}_2$  plume fluxes: the 2007 Stromboli eruption (Italy), *B. Volcanol.*; doi: 10.1007/s00445-010-0442-z.
- Sinclair, A.J. (1974). Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs, *J. Geochem. Explor.*, 3, 129-149.

---

\*Corresponding author: Salvatore Inguaggiato, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Palermo, Palermo, Italy; email: s.inguaggiato@pa.ingv.it.

© 2011 by the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. All rights reserved.



## **ANEXO A-2**

**Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc**

## Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc

S. INGUAGGIATO<sup>1</sup>, S. HIDALGO<sup>2</sup>, B. BEATE<sup>3</sup> AND J. BOURQUIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa, Palermo Italy;* <sup>2</sup>*Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, Apartado, Quito, Ecuador;* <sup>3</sup>*Facultad de Geología – Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador*

### ABSTRACT

The Ecuadorian Quaternary volcanic arc is characterized by about 60 volcanoes many of which are active or potentially active. This volcanic activity is the result of the subduction processes of the Nazca Plate beneath the north-western part of South America. The geochemical signature of the discharged fluids from these volcanic systems gives an important contribution to the comprehension of the subduction processes in the South-American region. In this work, we present the first systematic geochemical characterization of discharged fluids from the entire Ecuadorian volcanic arc on the basis of the chemical and isotopic composition of 56 samples of thermal and cold waters, as well as 32 dissolved and 27 bubbling gases collected from north to south across the arc. The isotopic composition of waters reveals a mainly meteoric origin, while the chemistry of the dissolved gases is characterized by He and CO<sub>2</sub> contents, 2–3 orders of magnitude higher than the air saturated water values, which implies very active gas–water interaction processes with deep fluids. Moreover, both dissolved and bubbling gases' isotopic signature shows a wide compositional range, with helium ranging between 0.1 and 7.12  $R/R_a$  and carbon ranging from  $-1.75$  to  $-10.50$ ‰  $\delta^{13}C_{(TDIC)}$ . Such isotopic features may be related to the presence of at least two distinct end-member sources: the mantle and the crust. Finally, this geochemical study clearly reveals the two distinct geographic parts of the arc, showing different isotopic characteristics of fluids for the Quaternary active volcanism, (north of 2°S), and for the inactive arc, (south of 2°S).

Key words: carbon isotope, ecuador volcanoes, helium isotope, nitrogen isotope, thermal waters

Received 12 April 2010; accepted 7 September 2010

Corresponding author: Salvatore Inguaggiato, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa, 153 – 90146 Palermo, Italy.

Email: s.inguaggiato@pa.ingv.it. Tel: +39 091 680 9435. Fax: +39 091 680 9449.

*Geofluids* (2010)

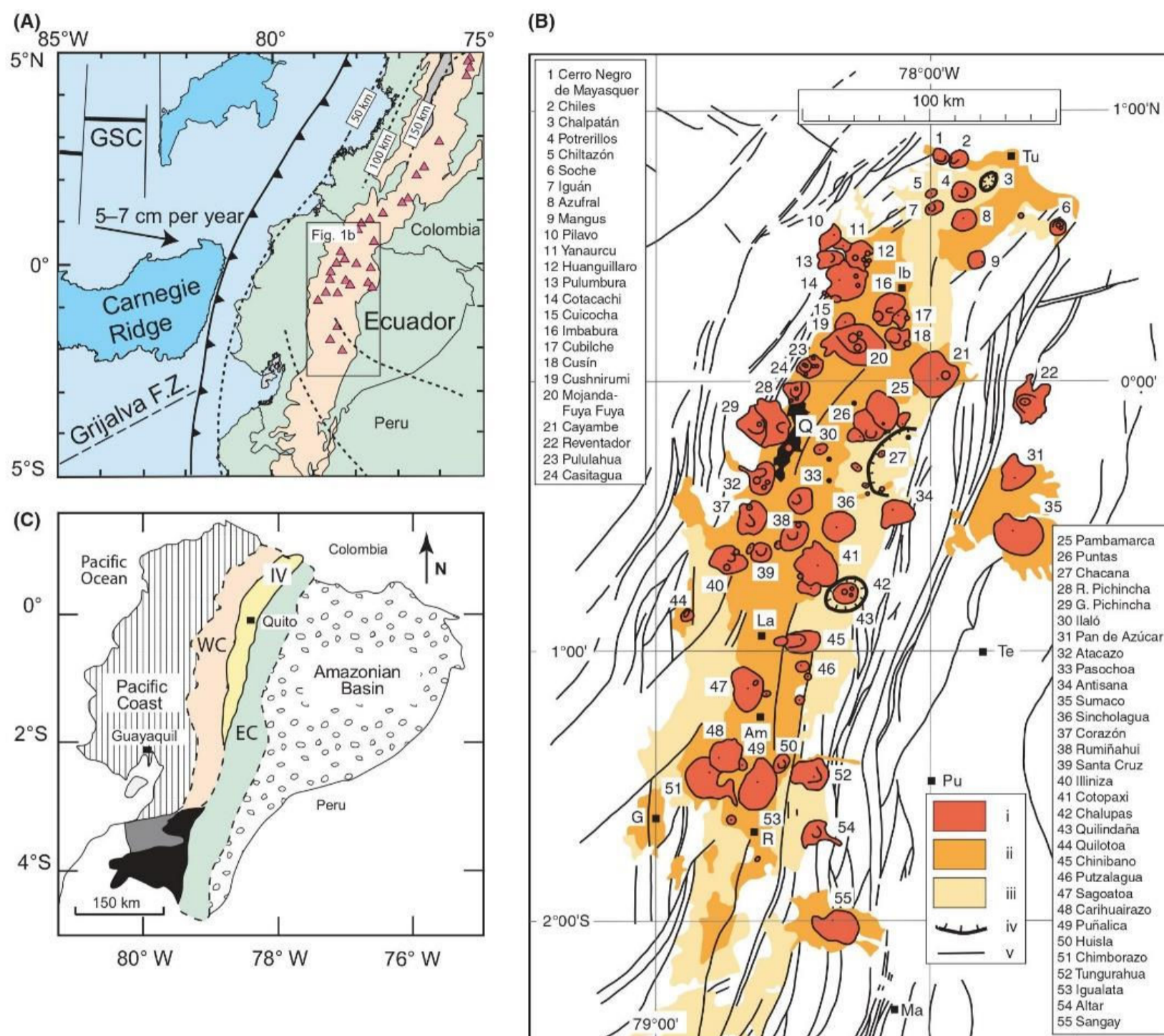
### INTRODUCTION

The Ecuadorian Quaternary volcanic arc is characterized by at least 60 volcanoes (Hall & Beate 1991). At least 10 of these volcanoes experienced Holocene eruptions, indicating that they are potentially active; four of them, i.e. Pichincha, Tungurahua, Sangay and Reventador, are currently erupting or have erupted during the last 15 years. Interestingly, most of these Quaternary volcanic edifices display associated hydrothermal systems; fluids related to these hydrothermal sources are the only surface manifestation that can be easily accessed to provide information about the volcanic activity.

Moreover, the collection of fumarolic gases in the summit is difficult and potentially unsafe considering the dimensions of the volcanic edifices, their high altitudes (>4500 masl) and their potential explosive activity.

On the other hand, the Ecuadorian volcanic arc represents a great potential for harnessing geothermal energy in this country, although appraisal of all geothermal prospects is still at an early stage.

In this framework, several geothermal areas along the Ecuadorian Andes have been investigated to provide a preliminary geochemical characterization of the fluids, to discriminate the hydrothermal reservoirs and to identify the



**Fig. 1.** (A) Geodynamical setting of the Ecuadorian Arc (modified from Gutscher *et al.*, 1999). (B) Ecuadorian volcanoes distribution map from (Hall & Beate 1991). Numbers indicate the different volcanic edifices; i = Quaternary volcanoes, ii = proximal deposits, iii = distal deposits, iv = caldera rim, v = tectonic alignments. (C) Schematic map of the geomorphological/geological zones of Ecuador (modified from Aspden *et al.* 1992a,b). WC = Western Cordillera, EC = Eastern Cordillera and IV = Interandean Valley.

isotopic signature of volcanic and geothermal fluids (mainly He, C, N).

## GEODYNAMIC CONTEXT

In Ecuador, magmatism results from the subduction of the Nazca Plate (>22 My in age; Lonsdale 1978; Lonsdale & Klitgord 1978) beneath the North Andean Block, an independent block located in the north-western part of South America (Pennington 1981; Kellogg & Vega 1995; Witt *et al.* 2006). The average rate of convergence is around 58 mm year<sup>-1</sup> with an almost E-W direction (Trenkamp *et al.* 2002). An interesting geomorphological

feature of this subduction system is the presence of the Carnegie Ridge, which is the product of the uninterrupted interaction of the Galápagos hot spot and the Cocos-Nazca Spreading Centre (Sallarès and Charvis, 2003) (Fig. 1A).

The subducting Carnegie Ridge is covered by a 400–500 m thick sedimentary blanket consisting of carbonate sediments (Michaud *et al.* 2005). Sediments facing the northern Ecuadorian coast line are composed by siliceous nanofossil ooze, chalk and limestone (Hein & Yeh 1983).

The Ecuadorian Quaternary volcanic arc is limited to the south at 2°S and comprises at least 60 volcanic edifices that are distributed in three different domains following a

roughly NNE trench orientation: (i) The Volcanic Front, where the volcanoes are built over the Western Cordillera formations, (ii) the Main Arc, which includes the Interandean Valley volcanoes and the Eastern Cordillera volcanoes and (iii) the Back Arc volcanoes emplaced in the headwaters of the Amazonian basin (Fig. 1B).

The nature and age of the basement of these three volcanic domains are very different, changing from oceanic basalts, dioritic intrusions and volcano-clastic deposits below the Volcanic Front (Goosens & Rose 1973; Lebrat *et al.* 1987; Cosma *et al.* 1998; Reynaud *et al.* 1999; Lapiere *et al.* 2000; Hughes & Pilatasig 2002; Luzieux *et al.* 2006) to older and geochemically more mature continental formations consisting of metasedimentary, igneous and metamorphic rocks under the Main Arc (Aspden & Litherland 1992; Aspden *et al.* 1992b; Litherland *et al.* 1994) (Fig. 1C). South of 2°S, there is no active volcanism, but there are impressive remnants of the Miocene volcanic activity, which are mainly characterized by andesitic to rhyolitic products cropping out as ignimbrites, lava flows and lava domes (Lavenue *et al.* 1992; Beate *et al.* 2001). This old and highly eroded volcanic arc, known as the Saraguro arc, is the host to several porphyry and epithermal ore deposits.

### SAMPLING AND ANALYTICAL METHODOLOGIES

On the basis of previous knowledge (Beate & Salgado 2005), several thermal springs, cold water sources and surface waters (rivers) were sampled during a field campaign carried out in January–March 2009. During this field campaign, 49 sampling sites were visited from Tufiño, in northern Ecuador at the border with Colombia, to Portovelo in central-southern Ecuador. Samples 50–57 were collected in August 2009 and include Aguas Calientes (northern Ecuador) and the El Mozo and Puyango sites in the south of the country (Fig. 2). Details on the sites and the related features are given in Table 1.

At every site, the outlet temperature, the electrical conductivity and the pH of the waters were measured using an ORION 250A+ conductivity metre and thermometer and an ORION 250A+ pH-meter, respectively.

Water was sampled in different polyethylene bottles to analyse its major components, silica and ammonium, and its stable isotopes compositions. The samples for cations were acidified with suprapur HNO<sub>3</sub>, whereas silica and ammonium analysis were carried out on samples acidified with suprapur HCl. Alkalinity was analysed *in situ* by titration with HCl 0.1 N, whereas major and minor elements were determined in the laboratory using a Dionex 2000i ion chromatograph with an accuracy of ±2%. A Dionex CS-12 column was used for the cations (Li, Na, K, Mg and Ca) and a Dionex AS4A-SC column for the anions (F, Cl, Br, NO<sub>3</sub> and SO<sub>4</sub>).

Bubbling gases were sampled using stopcock bottles and Giggenbach bottles (filled with NaOH 4 M and pre-evacuated in laboratory). Gas samples were analysed for the chemical and isotopic composition (He, C and N).

Dissolved gases were sampled and analysed according to the method described by Capasso & Inguaggiato (1998), which is based on the equilibrium partition of gas species between a liquid and a gas phase after the introduction of a host gas (Ar) into the sample. Dissolved gases were analysed using a Perkin Elmer 8500 gas-chromatograph equipped with a 4-m-long Carbosieve S II column and Ar as the carrier gas. He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> were measured by means of a TCD detector, while CH<sub>4</sub> and CO were determined through a FID detector coupled with a methanizer. Analyses of the dissolved He isotopic composition were performed using the methodology proposed by Inguaggiato & Rizzo (2004).

The determination of the helium isotopic composition was carried out on a static vacuum mass spectrometer (GVI-Helix SFT) built for the simultaneous detection of <sup>3</sup>He and <sup>4</sup>He ion beam, to reduce the analytical error down to very low values (an average of ±0.05 R<sub>a</sub>). The <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios have been corrected for the atmospheric contamination on the basis of their <sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne ratios (Sano & Wakita 1985). Values are reported as R/R<sub>a</sub> values (where R<sub>a</sub> is equal to 1.39 × 10<sup>-6</sup>). The δ<sup>13</sup>C of total dissolved inorganic carbon (TDIC) and the δ<sup>18</sup>O of H<sub>2</sub>O of spring waters were analysed by a Finnigan Delta Plus mass spectrometer. Carbon isotopic values are expressed in δ versus PDB, with an accuracy of 0.2‰. Oxygen isotopic values are expressed in δ versus V-SMOW with an accuracy of 0.2‰.

## RESULTS

### Surface, cold and thermal waters

#### Physical parameters

The physical parameters of water samples show a wide range of values. The outlet temperature varied between 7.5 and 74.5°C with the pH ranging between 4.60 and 9.18 and the electrical conductivity from 50 to 68 200 micro-Siemens per cm (Table 1).

These values suggest the occurrence of water/rock and gas/water interaction processes at different degrees. Relatively lower pH (<6) values indicate a possible interaction with acid gases, and high salinity might indicate prolonged water–rock interaction and, in a few cases, evaporation processes.

The relationship between the total dissolved salinity (TDS) and the temperature of waters is shown in Fig. 3. Water samples can be divided into two different groups. The first, consisting in low (<200 mg l<sup>-1</sup>) salinity waters (river samples) having low temperatures (around 10°C), is dominated by a meteoric contribution. The second group is character-

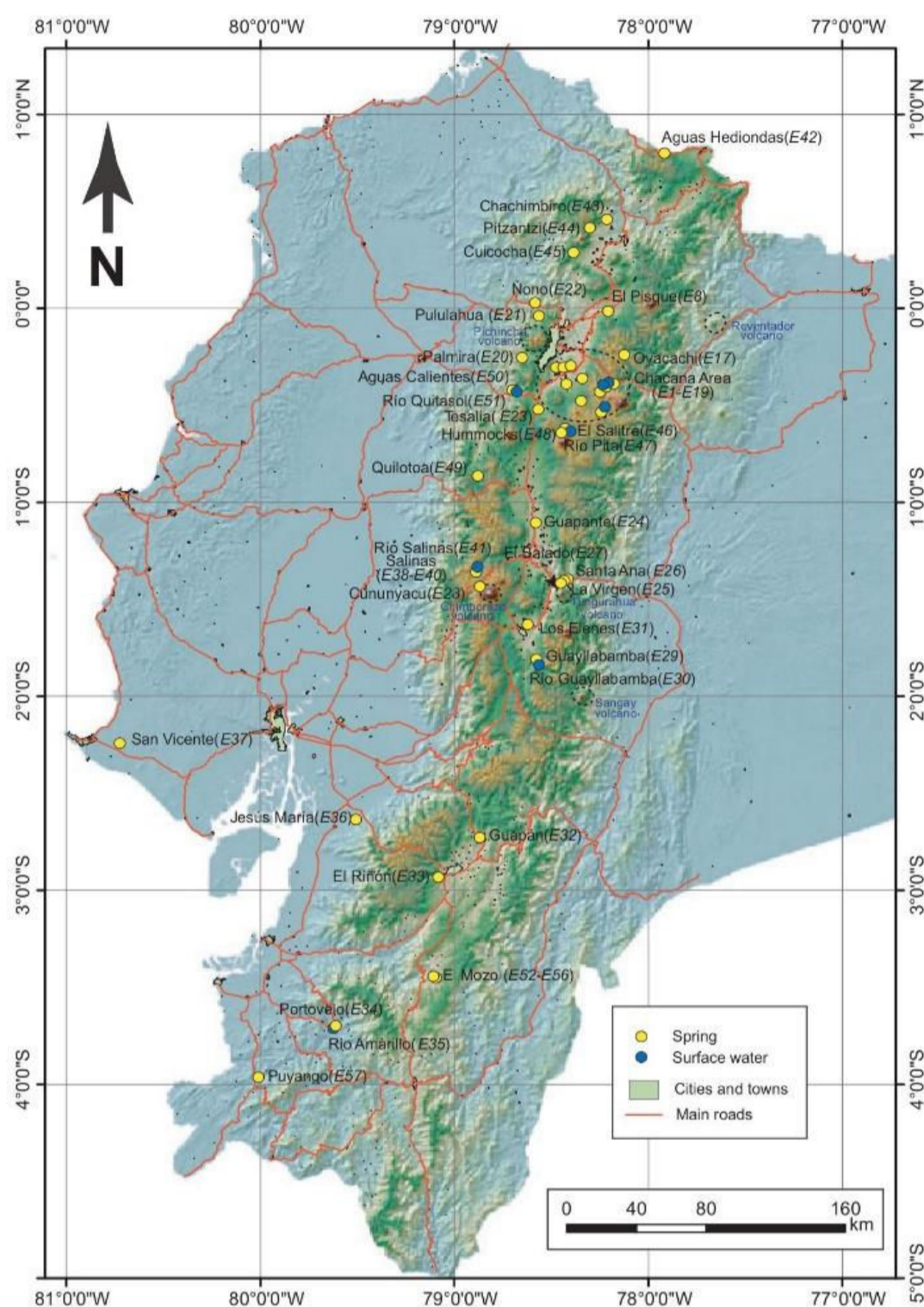
4 S. INGUAGGIATO *et al.*

Fig. 2. Location Map of sampled springs.

ized by relatively high outlet temperature (up to 74.5°C) and TDS values up to 10 000 mg l<sup>-1</sup>, except for few samples like Salinas (54 633 mg l<sup>-1</sup>), San Vicente (14 229 mg l<sup>-1</sup>), Guapán (11 353 mg l<sup>-1</sup>) and Quilotoa (10 931 mg l<sup>-1</sup>), which seem to have suffered evaporation processes (not shown in Fig. 3). The wide ranges of salinity and temperature, shown by the water samples, suggest different durations and degrees of mineral-dissolution in the waters.

#### Chemical data

##### Stable isotopes

$\delta D$  and  $\delta^{18}O$  ranges from -104 to -13 ‰ and -13.65 to 4.69 ‰ versus V-SMOW, respectively. Local meteoric

water-line has been reported with the data on Fig. 4A. For a few samples from the Chacana-Papallacta area, a very moderate isotopic shift of oxygen can be observed, suggesting the occurrence of enhanced water-rock interactions. San Vicente, Salinas and Guapán are likely affected by evaporation processes. Interestingly, thermal sources associated with the Quaternary volcanism and those related to the inactive part of the arc plot in two different groups, with the former displaying lower  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  values. In Fig. 4B, the elevation of each sampling site versus  $\delta D$  values, as well as the theoretical line of vertical isotope gradient for Ecuador (computed on the basis of world water isotope network rain-gauge) is reported. Only about 50% of samples springs fall on the theoretical line show a

**Table 1** Chemical and isotopic composition of cold and thermal waters. The chemical composition is expressed in meq l<sup>-1</sup>. The isotope compositions of δD and δ<sup>18</sup>O are expressed in ‰ V-SMOW standard. The carbon isotope composition is expressed in ‰ PDB standard.

Name	Sample	Date	T(°C)	pH	Cond. (μS cm <sup>-1</sup> )	Eh (mV)	Elevation (masl)	Longitude	Latitude	Li	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	Br	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	δ <sup>18</sup> O	δD	δ <sup>13</sup> C <sub>TDIC</sub> computed	δ <sup>13</sup> C <sub>CO<sub>2</sub></sub> computed
Cabaña norte	E1	15/1/09	58.9	6.82	3980	103.9	3334	-78 15328	-0 36659	0.35	23.49	0.26	0.30	15.59	0.094	27.46	0.04	11.05	1.30	-11.8	-82	-25.5	-29.2
Fuente del Balneario	E2	15/1/09	47.2	6.56	2900	165.9	3304	-78 15345	-0 36537	0.20	13.33	0.15	0.18	10.06	0.077	13.89	0.29	7.92	1.80	-11.8	-81	-27.1	-31.3
SPA Baja	E3	15/1/09	54.2	7.08	2170	102.4	3278	-78 15171	0 36495	0.20	12.28	0.16	0.14	8.31	0.100	11.32	0.03	7.75	1.65	-11.8	-80	-28.1	-32.8
Jamanco	E4	15/1/09	60.8	6.23	6820	-39	3518	-78 18569	-0 37813	0.95	49.43	1.09	0.67	14.68	0.160	52.80	0.08	6.27	7.45	-11.4	-83	-7.9	-10.1
Río Papallacta	E5	16/1/09	9.0	7.95	105	191	3455	-78 15338	-0 35602	0.00	0.11	0.02	0.20	0.83	0.003	0.04	0.00	0.06	1.03	-11.7	-79	-22.4	-31.7
Río Papallacta	E6	16/1/09	10.5	7.92	181.8	-43	3311	-78 15211	-0 36827	0.00	0.52	0.03	0.20	1.12	0.005	0.40	0.00	0.27	1.20	-11.7	-79	-7.9	-9.4
Fuente El Tambo	E7	16/1/09	57.8	6.15	7250	-40	3550	-78 18707	-0 37935	1.15	56.79	1.53	0.92	13.88	0.180	59.64	0.10	4.93	9.45	-11.5	-82	-7.3	-10.7
El Pisque Balneario	E8	16/1/09	37.0	6.33	2100	21	2633	-78 18071	0 00363	0.00	14.94	1.07	6.80	1.84	0.031	4.90	0.01	0.47	18.95	-13.4	-95	-7.0	-8.3
La Calera de Tolontag	E9	18/1/09	27.2	7.17	5720	81.3	3426	-78 31743	-0 34823	0.28	48.87	1.37	4.35	12.20	0.200	13.91	0.09	27.24	25.85	-11.1	-91	-1.7	-14.9
Balneario La Merced	E10	19/1/09	32.5	6.67	1085	45	2586	-78 39703	-0 29532	0.00	5.18	0.36	4.47	1.98	0.026	1.70	0.01	0.45	9.80	-11.8	-82	-10.2	-11.9
Balneario Ilalo	E11	19/1/09	37.7	6.48	1540	-49.6	2571	-78 38464	-0 29141	0.00	9.13	0.67	6.69	2.90	0.031	3.04	0.01	1.54	14.80	-11.9	-83	-7.8	-15.2
Balneario El Tingo	E12	19/1/09	42.1	7.00	3160	-61	2454	-78 44139	-0 29009	0.00	22.36	0.70	13.93	1.37	0.045	8.33	0.03	1.11	28.80	-13.0	-93	-9.9	-8.3
Cachiyacu campamento	E13	21/1/09	60.1	6.53	5000	-83.7	3918	-78 22868	-0 41175	1.04	35.88	1.88	2.09	4.97	0.050	35.18	0.03	2.44	8.50	-11.4	-85	-5.8	-6.5
Cachiyacu cueva	E14	21/1/09	40.5	5.99	3340	36.5	3926	-78 22948	-0 41388	0.70	24.06	1.30	1.60	5.98	0.050	22.60	0.04	1.81	9.00	-11.6	-85	-4.2	-8.6
Cachiyacu terraza de travertino agua	E16	21/1/09	64.6	6.39	5560	-125	3910	-78 22837	-0 41158	1.16	39.83	2.04	2.72	5.31	0.050	38.15	0.06	2.41	11.02	-11.1	-86	-4.2	-10.5
Balneario Oyacachi	E17	22/1/09	46.5	6.53	4850	-105	3180	-78 09061	-0 21913	0.37	42.56	0.85	4.53	4.94	0.040	18.43	0.01	1.77	33.00	-10.8	-85	-7.8	-13.3
Hacienda Antisana	E18	24/1/09	7.5	6.36	145	284	4045	-78 21844	-0 51552	0.01	0.45	0.09	0.50	0.50	0.060	0.06	0.02	0.21	1.20	-14.6	-110	-7.7	-2.4
Vertiente Río Lisco	E19	24/1/09	29.9	6.10	1780	52.8	3458	-78 31535	-0 46419	0.03	10.35	0.68	5.65	3.00	0.040	6.61	0.02	0.46	12.50	-13.1	-96	-7.7	-2.0
Palmira	E20	13/2/09	25.2	6.79	3300	-4.4	2732	-78 62906	9974200	0.123	23.56	1.21	4.53	10.70	0.040	11.46	0.000	0.01	27.80	-9.4	-73	-4.2	-7.3
Pululahua	E21	14/2/09	25.4	6.28	3480	-66.9	2610	-78 54204	0 00573	0.016	17.11	0.16	11.78	16.28	0.000	10.19	0.009	0.00	33.70	-9.4	-65	0.7	-2.4
Nono	E22	14/2/09	27.9	6.18	4050	174.5	2848	-78 55913	0 03046	0.225	22.29	0.63	10.91	16.76	0.000	17.70	0.016	0.22	30.60	-9.6	-67	1.7	-2.2
Tesalia	E23	16/2/09	16.8	6.18	1700	208.6	2531	-78 54051	-0 50025	0.016	5.06	0.20	13.25	3.02	0.018	2.32	0.000	0.55	19.00	-12.0	-82	1.5	-4.2
Guapante	E24	17/2/09	24.3	7.13	950	208.6	2531	-78 56898	-1 09662	0.023	4.16	0.34	4.94	1.52	0.019	0.67	0.000	1.84	8.80	-12.9	-92	-4.2	-7.3
La Virgen	E25	17/2/09	52.7	6.43	4780	-112.3	1820	-78 41749	-1 39896	0.081	21.77	1.99	33.23	10.24	0.036	11.01	0.000	31.88	26.20	-11.6	-81	-3.0	-6.4
Santa Ana	E26	17/2/09	42.1	6.65	4430	66	1751	-78 40779	-1 39692	0.073	19.97	1.77	31.04	10.72	0.028	9.89	0.000	27.90	26.20	-11.6	-79	-3.0	-8.3
El Salado	E27	18/2/09	45.6	6.40	6770	-51.4	1927	-78 43304	-1 40618	0.093	24.19	2.12	66.98	19.60	0.000	22.59	0.000	63.24	25.60	-11.7	-80	-3.0	-10.2
Cununyacu	E28	18/2/09	47.0	8.37	4300	-88	3670	-78 86584	-1 33816	0.032	27.87	0.20	0.08	14.94	0.000	36.37	0.069	5.53	1.00	-13.7	-104	-2.7	-8.3
Guaylabamba	E29	19/2/09	37.6	6.34	1386	121.8	3238	-78 54624	-1 79124	0.040	8.57	0.36	2.29	5.15	0.029	1.05	0.001	0.01	15.60	-11.9	-83	-6.9	-10.2
Río Guaylabamba	E30	19/2/09	8.6	5.69	83	3238	3238	-78 54624	-1 79124	0.000	0.24	0.06	0.31	0.34	0.003	0.01	0.000	0.02	1.10	-12.3	-84	-6.3	3238
Los Elenes	E31	19/2/09	20.1	7.50	1804	97.5	2590	-78 61006	-1 61885	0.010	8.09	0.27	9.93	4.24	0.090	0.70	0.000	15.01	7.20	-11.6	-88	-5.5	-13.2
Guapán	E32	20/2/09	46.9	6.79	16500	62.1	2670	-78 84681	-2 70961	1.704	158.34	3.19	5.71	4.51	0.000	136.15	0.000	1.32	41.40	-4.7	-59	-5.3	-9.5
El Riñón	E33	20/1/00	74.5	6.83	4130	-173.9	2704	-79 06177	-2 92243	0.357	28.20	1.39	1.98	9.78	0.052	23.72	0.032	4.79	10.50	-11.4	-80	-4.9	-7.0
Portovelo	E34	21/2/09	52.4	7.94	2930	-307	661	-79 59724	-3 70292	0.305	19.07	0.35	0.01	7.63	0.125	22.27	0.026	5.19	0.45	-6.5	-38	-3.5	-8.2

Table 1 (Continued).

Name	Sample Date	T(°C)	pH	Cond. (µS cm <sup>-1</sup> )	Eh (mV)	Elevation (masl)	Longitude	Latitude	Li	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	Br	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	δ <sup>18</sup> O	δD	δ <sup>13</sup> C <sub>TDIC</sub>	δ <sup>13</sup> C <sub>CO<sub>2</sub></sub> computed	
Río amarillo	E35	21/2/09	19.4	51		661	-79 59724	-3 70292	0.001	0.16	0.02	0.11	0.24	0.001	0.05	0.000	0.08	0.50		-7.8	-46		
Jesús María	E36	21/2/09	42.6	499		187	-79 49335	-2 62662	0.004	3.76	0.03	0.00	0.49	0.012	0.64	0.000	3.16	0.65		-5.5	-30		
S. Vicente	E37	22/2/09	37.9	6.41	19700	70	-80 70098	-2 22794	0.004	103.57	0.39	0.02	137.94	0.000	236.05	1.499	0.00	9.50		0.6	-13		
Salinas de Bolívar	E38	23/2/09	17.0	6.84	68200	3519	-79 01984	-1 40779	10.808	723.83	61.83	25.29	65.91	0.000	840.25	1.069	41.45	32.85		4.7	-21		
Salinas de Bolívar	E39	23/2/09	14.8	6.39	11880	3530	-79 01984	-1 40779	1.454	95.61	8.67	3.55	24.53	0.000	106.89	0.100	5.91	17.80					
Virgen Salinas de Bolívar	E40	23/2/09	19.4	7.55	5040	3511	-79 01984	-1 40779	0.597	39.66	3.68	1.24	1.33	0.000	44.97	0.034	2.30	1.90					
abajo Río Salinas	E41	23/2/09	10.7	177		3513	-79 01638	-1 40667	0.001	0.50	0.12	0.74	0.61	0.014	0.13	0.000	0.16	1.75		-11.7	-87		
Aguas Hediondas	E42	26/2/09	52.5	4.60	1850	3601	-77 90592	0 80966	0.040	8.75	1.03	3.95	4.54	0.230	3.49	0.003	16.99						
Chachimburo	E43	26/2/09	51.2	6.90	5650	2531	-78 23185	0 45922	0.560	42.19	3.01	3.64	4.32	0.000	45.45	0.023	0.69	4.10		-8.4	-72	-1.0	-4.5
Pitzantzi	E44	26/2/09	31.8	7.04	4480	2696	-78 26421	0 42773	0.294	26.55	1.51	11.07	12.28	0.000	24.09	0.000	0.22	26.50		-9.4	-72	-0.4	
Cuicocha	E45	27/2/09	16.3	8.04	777	3070	-78 35771	0 29250	0.018	3.08	0.15	3.14	2.57	0.023	3.93	0.000	6.66	7.00					
El Salitre	E46	28/2/09	14.5	6.90	1550	3786	-78 40754	-0 60264	0.018	6.08	0.29	7.11	3.95	0.011	0.04	0.000	0.09	1.60		-12.7	-90	-9.3	-13.3
Río Pita	E47	28/2/09	11.8	8.22	152	3787	-78 40754	-0 60264	0.001	0.47	0.08	0.45	0.54	0.051	1.51	0.000	2.88	4.00		-12.2	-87	-9.2	
Hummocks	E48	28/2/09	10.7	6.30	789	3792	-78 40826	-0 60357	0.016	2.77	0.14	3.32	2.22	0.007	2.14	0.000	0.42	6.10		-13.0	-93	-8.4	-13.2
Quilotoa	E49	14/4/09	22.0	6.76	12740	29.5	-78 90967	-0 86242		100.34	4.87	59.83	18.27		117.38	0.12	50.21	12.45		-2.8	-39	-8.2	
Aguas caliente	E50	20/8/09	21.4	6.49	2700	7.6	-78 67085	-0 43722		14.22	0.31	10.64	6.87	0.010	6.90	0.00	0.27	24.83		-10.2	-69	2.9	-1.3
Río Quitasol	E51	20/8/09	10.5	8.10	177	132	-78 67085	-0 43722		0.50	0.07	0.54	0.66	0.005	0.12	0.00	0.05	1.56		-10.6	-69	-10.9	
El Mozo	E52	4/12/09	14.9	5.82	231	-182	-79 07551	-3 43819		1.05	0.11	0.19	0.68	0.008	0.95	0.00	1.41	0.60		-9.2	-56		
El Mozo	E53	4/12/09	13.0	5.11	36.4	243.2	-79 07539	-3 43818		0.13	0.00	0.02	0.06	0.001	0.15		0.11	0.05		-7.7	-51		
El Mozo	E54	4/12/09	12.6	6.51	17.8	112.5	-79 07997	-3 43439		0.05	0.02	0.02	0.05		0.03		0.04	0.08		-8.4	-50		
El Mozo	E55	4/12/09	11.9	4.88	30.5	335	-79 07228	-3 43630		0.08	0.01	0.01	0.05		0.07	0.00	0.11	0.02		-9.0	-52		
El Mozo	E56	4/12/09	14.4	6.13	1330	-215	-79 08023	-3 43448		7.02	0.27	1.45	5.83	0.022	14.72	0.01	7.95	6.00		-9.1	-57		
Puyango	E57	5/12/09	19.4	478		800	-79 99094	-3 95697		4.34	0.01	0.00	0.04	0.094	0.44	0.00	0.72	3.60		-4.8	-24		

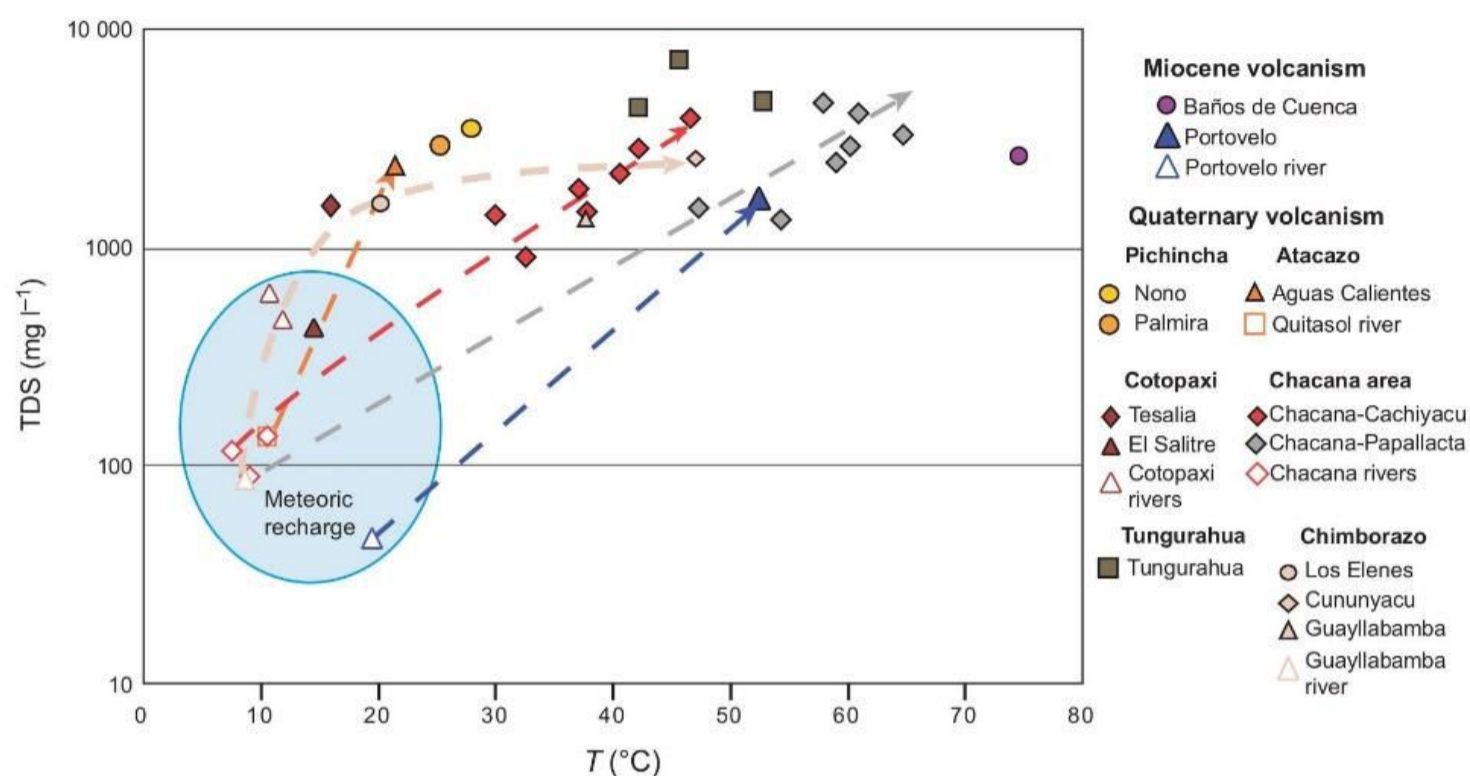


Fig. 3. Total dissolved salinity versus temperature. The meteoric recharge waters field is characterized by both low salinity and low temperature. The geothermal waters are characterized by high temperatures up to 74.5°C and salinity ranging between 1000 and 10000 mg l<sup>-1</sup>.

relationship between the elevation of the springs and the altitude of the feeding or recharge areas. Nevertheless, Cununyacu (Chimborazo volcano), La Virgen, Santa Ana and El Salado (Tungurahua volcano), El Tingo, El Pisque, Ilaló and La Merced (Chacana Caldera), Guapante and Los Elenes waters plot in correspondence to an altitude about ≈1000 m higher than their elevation. For the former samples, this suggests that the summit areas of Chimborazo, Tungurahua and Chacana volcanoes, whose altitudes are 6310, 5020 and 4000 m, respectively, are the recharge areas of these springs. For Guapante and Los Elenes, the location of the recharge areas is less clear. On the other side, the few samples (i.e. San Vicente, Salinas, Guapán, Quilotoa, El Mozo and Puyango) plotting to the right of the theoretical vertical isotope gradient are likely affected by sub-aerial evaporation.

#### Major elements

Major ions (Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), SiO<sub>2</sub> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, were determined in the water samples and the analytical data are reported in Table 1.

As shown in the Langelier–Ludwig diagram (Fig. 5), sampled waters pertain to four different compositional families.

(1) Bicarbonate alkaline-earth waters. These waters are mainly the river samples, characterized by a very low TDS values (100–200 mg l<sup>-1</sup>). They mostly represent the meteoric recharge of the investigated geothermal systems. Some waters (Nono, Pululahua, La Merced (Chacana), Tesalia, El Salitre, Hummocks and

Guapante,) with temperatures ranging 10.7–32.5°C also belong to this family, but their salinity is a little bit higher (400–3500 mg l<sup>-1</sup>)

- (2) Bicarbonate-alkaline-waters (Chacana [Ilaló, Oyacachi, Lisco, Guachalá], Pitzantzi, Guayllabamba and Palmira) are characterized by a medium to high salinity (up to 4000 mg l<sup>-1</sup>) and by high total dissolved carbon, probably because of dissolution of CO<sub>2</sub> (peripheral waters).
- (3) Chlorine-sulphate-alkaline waters including most of the samples of Chacana caldera are characterized by high salinity (up to 5000 mg l<sup>-1</sup>) and Salinas samples whose salinity is around 55 000 mg l<sup>-1</sup>.
- (4) Chlorine-sulphate-alkaline-earth waters characterized by medium (Tungurahua samples [La Virgen, El Salado, Santa Ana], Los Elenes and Cuicocha) to high (up to 14 000 mg l<sup>-1</sup>; San Vicente) TDS values.

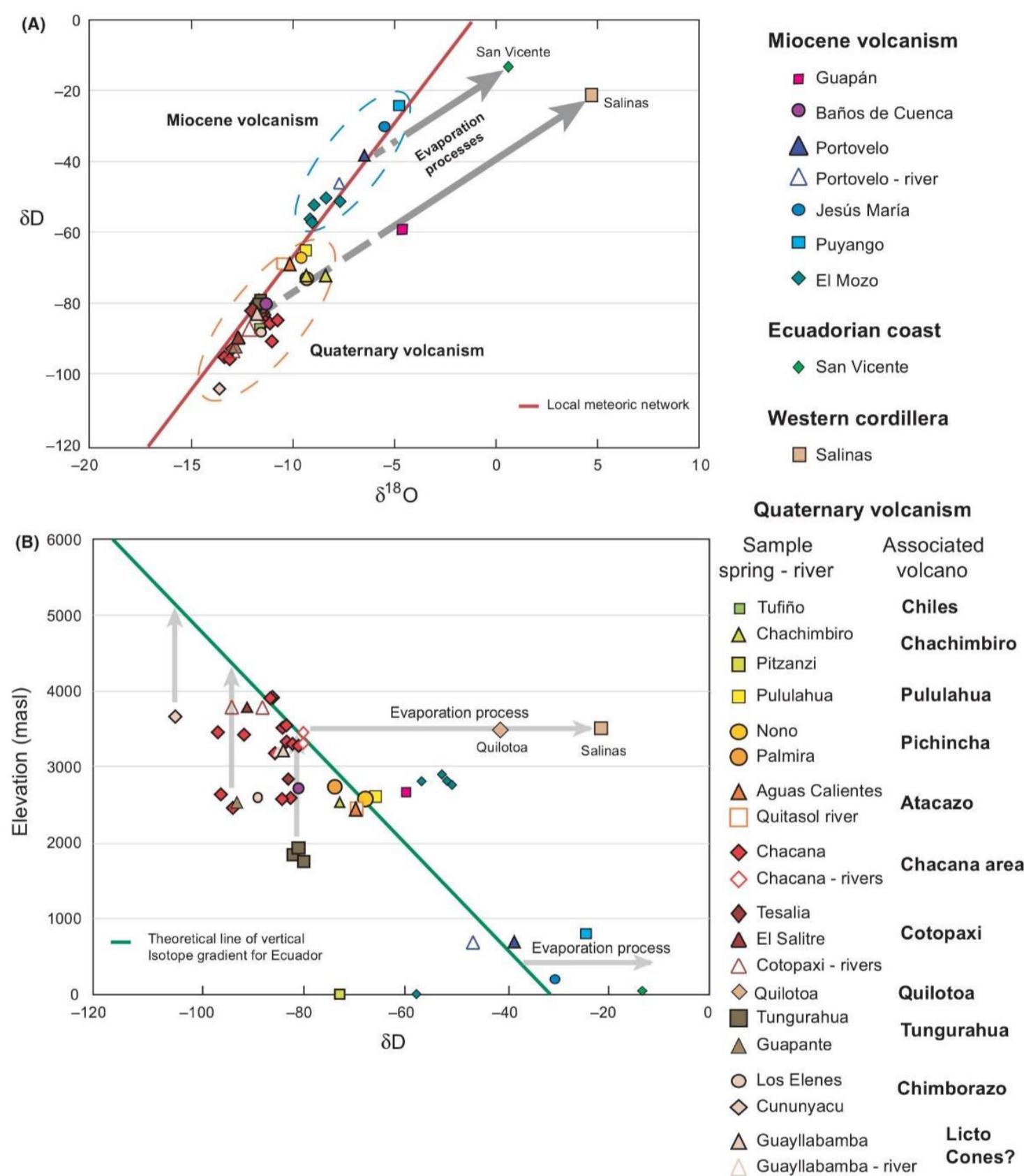
Interestingly, no water geochemical characteristic differentiates the thermal waters related to the Volcanic Front volcanoes (Chiles, Chachimbiro, Cuicocha, Pululahua, Pichincha, Atacazo, Quilotoa, Chimborazo) or to the Main Arc volcanoes (Chacana, Cotopaxi, Tungurahua), despite their different basement terranes.

#### Dissolved and bubbling gases

Several thermal waters are associated with gas phases showing strong bubbling gases that are CO<sub>2</sub>-rich and characterized by a relatively high content of helium (up to 67 p.p.m vol; Guachalá water located in Chacana area).

The chemical composition of both dissolved and bubbling gases (Tables 2 and 3) plotted on the ternary





**Fig. 4.** (A)  $\delta D$  versus  $\delta^{18}O$ . The isotopic compositions of sampled springs highlight a meteoric origin for all the samples. Local meteoric water-lines have been reported with these data. (B) Elevation of each sampling site versus  $\delta D$  isotopic composition; the theoretical line of vertical isotope gradient for Ecuador was added.

diagram  $CO_2$ - $O_2$ - $N_2$  shows that all the samples related to the Quaternary arc fall close to the  $CO_2$ -corner. For Chacana area, a mixing with an atmospheric end-member seems evident. These samples show an alignment with  $O_2/N_2$  ratio lower than that of air saturated water (ASW) highlighting an excess of nonatmospheric nitrogen and/or a consumption of oxygen (Fig. 6). This seems more evident for samples from Portovelo and San Vicente that are located very close to the  $N_2$  corner.

Carbon dioxide and helium concentrations dissolved in the thermal waters are significantly higher than those of waters in equilibrium with the atmosphere (up to three orders of magnitude respect to ASW), suggesting contribution of  $CO_2$  and helium from volatile-rich fluids.

To better define the origin of these gases, the isotope composition of C and He both on dissolved and bubbling gases was analysed. The carbon isotopes of  $CO_2$  and the  $\delta^{13}C_{TDIC}$  of total dissolved carbon species range

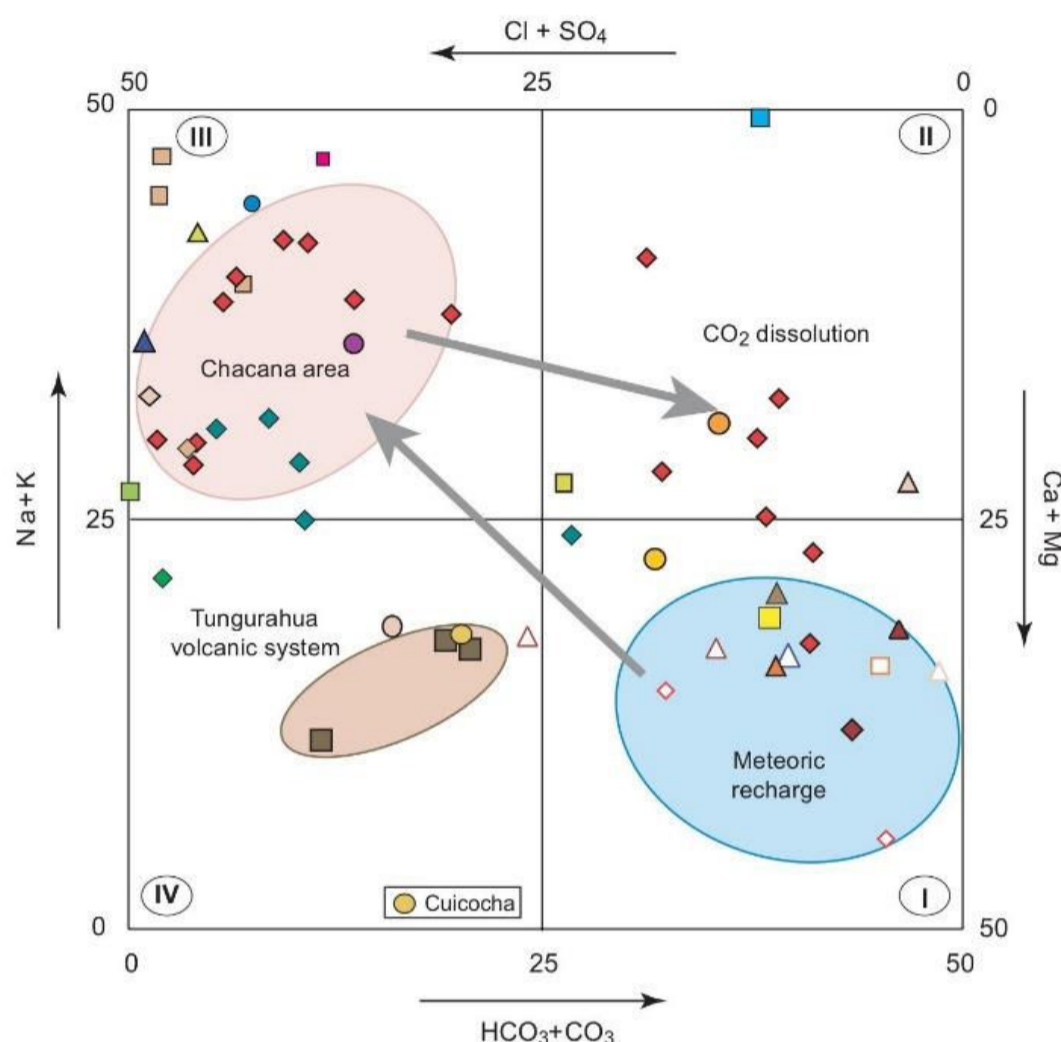


Fig. 5. Langelier-Ludwig diagram. Four families of samples have been identified on the basis of the chemical composition of thermal and cold waters. (i) Bicarbonate earth-alkaline waters characterized by low salinity and representative of meteoric recharge systems; (ii) Cl-SO<sub>4</sub> alkaline waters characterized by high salinity and representative of geothermal systems areas; (iii) bicarbonate alkaline waters characterized by high total dissolved carbon species and representative of peripheral waters; (iv) Cl-SO<sub>4</sub> earth-alkaline waters characterized by medium salinity and representative of Tungurahua area samples and by SanVicente thermal water characterized by high salinity around 19 000 mg l<sup>-1</sup>. Symbols as on Fig. 4, except for Cuicocha which is located at the base of the diagram.

between -1.75 and -10.5 ‰ PDB (Table 3), suggesting a deep origin for these fluids, while few samples show very negative values around -30 ‰ PDB (Table 1) suggesting an organic origin and/or strong fractionation processes.

The helium isotope composition ranges between 0.1 and 7  $R/R_a$  ( $R_a = 1.39 \cdot 10^{-6}$ ). The  $R/R_a$  values versus He/Ne ratio were plotted in Fig. 7 together with the values of mid-ocean ridge basalts (MORB), crust and air added for reference. A distribution in two different groups can be observed: the first one has values  $>2 R/R_a$  suggesting a variable contribution of mantle He (ranging from 24 to 89%); the second one has values  $R/R_a < 1$  indicating that the crustal component is, in some cases, largely predominant (ranging from 33 to 96%). Tungurahua, Guayllabamba, Pululahua, Tesalia, Cuicocha, Aguas Calientes and several fluid samples from the Chacana Caldera come from the first group. It is worth noting that such fluids discharge is related to Quaternary active volcanic systems. In contrast, Jesús María, Portovelo and San Vicente fluid discharges (all located south of 2°S) come from the second group. Jesús María is located at the boundary between the Western Cordillera foothills and the Coastal plain, and Portovelo and El Mozo are related to an old hydrothermal mineralizing system; San Vicente, given its proximity to the trench, might plausibly be related to fluids expelled from subducted sediments.

## DISCUSSION

The isotopic composition of waters reveals a clear meteoric origin for all the sampled cold and thermal springs (Fig. 4A). The chemical composition is the result of water-rock interaction that occurs at different extents, as shown by the wide range of TDS values (Fig. 3).

The isotopic composition of TDIC is the result of the following chemical and isotope mass balance, where  $M$  stands for molarity, and the activity of CO<sub>3</sub> is considered negligible at pH < 8.3:

$$\delta^{13}C_{TDIC} = (\delta^{13}C_{CO_2aq} \cdot M_{CO_2aq} + \delta^{13}C_{HCO_3} \cdot M_{HCO_3}) / M_{TDIC} \quad (1)$$

$$M_{TDIC} = M_{CO_2aq} + M_{HCO_3} \quad (2)$$

By using the enrichment factors  $\epsilon_a$  and  $\epsilon_b$ , (Mook *et al.*, 1974; Deines *et al.*, 1974)

$$\epsilon_a = \delta^{13}C_{HCO_3} - \delta^{13}C_{CO_2g} = 9552 / T_K - 24.1 \quad (3)$$

$$\epsilon_b = \delta^{13}C_{CO_2aq} - \delta^{13}C_{CO_2g} = -0.91 + 0.0063 \cdot 10^6 / T_K^2 \quad (4)$$

Equation 1 can be written as follows:

$$\delta^{13}C_{CO_2g} = \delta^{13}C_{TDIC} - (\epsilon_b \cdot M_{CO_2aq} / M_{TDIC} + \epsilon_a \cdot M_{HCO_3} / M_{TDIC}) \quad (5)$$

**Table 2** Chemical composition of dissolved gases. Values are expressed in cc per litre STP.

Sigla	He	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
E1	1.92E-03	3.83E-02	5.30	23.14		8.38E-02	6.33
E2	1.98E-03	7.48E-04	2.27	16.53	2.44E-05	1.61E-03	12.82
E3	8.76E-04	0.00E+00	4.10	18.19	7.62E-05	3.04E-03	3.10
E4	5.28E-04	2.53E-02	1.40	4.90	4.56E-04	1.82E-02	125.21
E5			5.85	13.16		9.31E-05	1.04
E7	5.95E-04	1.10E-03	0.02	3.32	1.43E-04	4.84E-03	194.17
E8			0.04	7.80	3.67E-05	3.05E-03	285.22
E9	5.59E-04		0.05	6.41	1.48E-05	9.65E-03	83.01
E10	1.91E-03	5.11E-04	0.05	13.69		2.70E-03	92.65
E11	1.93E-03		1.69	22.98	1.36E-04	6.08E-03	174.45
E12		1.70E-03	0.62	21.95	2.75E-05	2.45E-02	95.59
E13	3.11E-04		3.19	14.66		5.17E-04	119.95
E14		2.93E-03	1.87	13.52		7.06E-03	256.91
E19	3.34E-04		0.02	6.34	2.75E-05	1.85E-02	359.97
E20	1.44E-04	2.59E-03	0.11	6.96		3.13E-03	222.10
E21	2.36E-04	0.00E+00	0.07	2.96		3.31E-01	564.61
E22	1.74E-04	0.00E+00	0.02	3.34		6.74E-02	582.19
E23	1.81E-04	0.00E+00	0.15	8.75		2.50E-04	476.45
E26	2.17E-04	5.90E-03	0.06	5.88		3.12E-04	226.05
E27		1.42E-02	0.64	5.78		1.77E-04	336.40
E28	3.31E-04	1.38E-03	0.02	10.33		2.80E-02	0.56
E29		2.45E-02	0.04	4.61		6.91E-02	283.27
E31	1.25E-04	2.70E-03	0.45	13.37		8.62E-04	14.95
E32	1.48E-04	2.70E-01	0.04	4.56		4.85E-03	272.10
E33	1.88E-04	3.06E-01	0.77	5.12		1.07E-02	104.26
E34	3.81E-04	1.36E-01	0.04	10.38		1.80E-02	0.89
E36	5.43E-04	5.18E-03	0.02	16.57		2.10E-02	0.67
E37		3.75E-02	0.06	8.69		9.52E-04	1.24
E43	1.90E-04	7.96E-01	0.06	6.48		2.66E-03	37.92
E46		0.00E+00	0.07	7.18		2.52E-02	39.00
E48	1.40E-04	0.00E+00	3.73	10.68		1.30E-04	113.96
E50		2.49E-03	0.06	3.71		1.56E-03	455.40

Next, the isotope composition of CO<sub>2</sub> gas in equilibrium with the aquifers considering the dissolved CO<sub>2</sub> and HCO<sub>3</sub> amounts at the temperature of aquifer using the eq. 5 was calculated (Inguaggiato *et al.* 2000, 2005). The obtained values are reported in Table 1.

Figure 8 shows the computed isotopic composition of CO<sub>2</sub> gas and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  of bubbling gases both versus the total C (HCO<sub>3</sub> + CO<sub>2</sub>diss). The plotted data show a wide variability for the amount of total carbon covering three orders of magnitude (from <1 meq l<sup>-1</sup> to more than 100 meq l<sup>-1</sup>). This wide variability reflects the progress of gas–water interaction processes and could be because of adding/removal CO<sub>2</sub> processes in the aquifers (Inguaggiato *et al.* 2000, 2005). Conversely, the carbon isotope composition shows a narrow variability around a magmatic signature (–5 to –8‰) suggesting a common deep magmatic origin for the CO<sub>2</sub> interacting with the thermal waters even if they display different degrees of gas–water interaction.

Only three thermal water samples from the Papallacta area and one of the Papallacta river show very negative values (around –30‰) with a lower amount of total dissolved

carbon between 1 and 4 meq l<sup>-1</sup>. These negative values suggest an organic matter origin for the carbon and/or kinetic fractionation processes because of carbon removal in response to carbonate precipitation. In fact, in these thermal waters, lower concentrations of dissolved carbon were measured and the presence of travertine deposits is evident in this area.

The isotope composition of He in the bubbling gases was analysed to constrain the origin of this gas. The carbon isotope composition versus  $R/R_a$  corrected (where  $R_a$  is equal to  $1.39 \cdot 10^{-6}$ ) is plotted in Fig. 9. The distribution of data confirms a mantle-like signature for these fluids; in fact, the carbon isotope ratios of bubbling-CO<sub>2</sub> range between –5 and –10‰, and almost all of the bubbling samples have He isotope composition ranging between 2 and 7  $R/R_a$ .

The isotope composition of He versus the latitude of samples has been plotted in Fig. 10 to investigate a possible relationship between the origin of fluids and their location on the Ecuadorian Arc. MORB, crust and air are plotted as references. All the samples located to the north of 2°S, in the active Quaternary volcanic arc, display He isotope ratios from 2 to 7  $R/R_a$ , while the samples below

**Table 3** Chemical composition of bubbling gases. The values of O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> are expressed in % vol, while the values of H<sub>2</sub>, CO and CH<sub>4</sub> are expressed in p.p.m vol. The isotopic composition of CO<sub>2</sub> gas is expressed in ‰ PDB standard.

Sample	H <sub>2</sub> p.p.mVol	O <sub>2</sub> %Vol	N <sub>2</sub> % Vol	CO p.p.mVol	CH <sub>4</sub> p.p.mVol	CO <sub>2</sub> %Vol	R/R <sub>a</sub>	He/Ne	[He] corr	[Ne] corr	R/R <sub>a</sub> c	δ <sup>13</sup> C(CO <sub>2</sub> )
E4		0.89	15.82	1.30	1446	84.04	7.09	59.36	136.52	2.30	7.12	-6.79
E8		0.12	37.66	0.50	126	61.88	4.08	11.80	67.84	5.75	4.16	-10.5
E9		0.54	0.55	1.30	103	98.40		0.67	0.50	0.75		-5.41
E14							6.01	3.44	0.00	0.00	6.46	
E15		4.21	16.83	4.00	3	77.89	3.91	4.28	0.54	0.13	4.15	-5.13
E17		14.82	59.46	1.10	18	25.83	2.27	1.51	0.61	0.40	2.60	-6.79
E20		0.08	0.22	0.30	2140	98.25	2.84	1.33	0.26	0.19	3.42	-5.03
E21			1.12		2	95.71	3.54	6.94	1.45	0.21	3.66	-3.84
E22		2.45	9.74	0.40	377	87.25		1.96	0.44	0.23		-2.93
E23		1.74	13.14	0.60	2	82.79	6.62	8.62	5.58	0.65	6.83	-7.79
E25		0.07	0.18	0.20	16	100.00	4.84	5.08	0.73	0.14	5.10	-7.8
E26		0.18	1.01	6.00	54	98.24		0.35	2.92	8.25		-6.84
E27		0.10	0.24		4	99.74	3.64	1.95	0.43	0.22	4.16	-7.11
E29		0.61	4.21	0.70	1	93.62	2.02	6.58	4.30	0.65	2.07	-10.19
E32	6	0.20	0.61	0.70	330	100.00	0.74	2.62	0.91	0.35	0.70	-9.94
E34		0.17	95.90	0.40	3225	0.16	0.94	97.61	542.37	5.56	0.93	
E36							0.45	1.63	0.00	0.00	0.34	
E37	7	0.10	0.85	0.30	981500	0.02	0.11	12.59	6.82	0.54	0.08	
E38	16	0.57	2.25	4.40	0	93.44		0.30	3.45	11.47		-1.75
E39		0.12	1.25	5.00	17	97.34						-2.47
E42	24	0.03	2.84	21.00	12	93.24		0.33	3.97	12.09		-3.17
E43								0.43	0.00	0.00		
E45		4.23	59.26	4.20	873	37.43	5.73	3.18	8.47	2.66	6.26	-3.94
E49		0.42	3.08	79.00	8	96.33	1.87	1.72	0.15	0.09	2.07	-4.94
E50		0.19	1.13	5.30	16	97.61	3.03	2.04	0.25	0.12	3.41	-6.07
E52							0.67	0.51	5.82	11.49	0.11	
E54							0.76	0.49	3.88	7.94	0.33	

this latitude, where no active volcanism has been recognized because the Miocene, show a more crustal-like component with lower He-isotopes ratios (0.1–1 R/R<sub>a</sub>).

To better clarify the origin of these gases and the processes that they underwent during their ascent towards the surface, the C/<sup>3</sup>He ratio has plotted against the isotopic composition of He, including the fields of MORB, hot spots, carbonate sediments and the continental crust (Fig. 11; Marty & Jambon 1987; Varekamp *et al.* 1992; Sano & Marty 1995; Hilton *et al.* 1993). The bubbling gases show a wide range for log C/<sup>3</sup>He between 6.5 and 12.5, and with R/R<sub>a</sub> values between 0.1 and 7. The values displayed by carbon and helium in samples taken in Chacana area are consistent with deep mantle-related fluids. CO<sub>2</sub> addition processes can be invoked for Tungurahua volcanoes fluids (E25–E27). A contamination of carbon addition related to continental crust and/or carbonate sediments is evident for the San Vicente area, which shows higher log C/<sup>3</sup>He and lower R/R<sub>a</sub> values (12 and 0.1, respectively). Owing to the proximity of this spring to the trench, the addition of carbon by carbonate sediments is likely. The relatively low values of log C/<sup>3</sup>He (6.5) with R/R<sub>a</sub> values of 0.9 for Portovelo indicate a more crustal-like source. This helium contains almost 90% of crustal helium and approximately 10% of MORB-type helium,

supporting both a removing carbon process and, more likely, a crust-like helium contribution for this sample. Moreover, in the CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> ternary diagram (Fig. 12), three different groups of gases are clustered, corresponding to the Tungurahua, Portovelo and San Vicente systems, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> dominated, respectively.

Finally, to corroborate the origin and the processes undergone by these fluids, the isotopic composition of nitrogen was measured on the Tungurahua and Portovelo samples, and the carbon isotope composition of CH<sub>4</sub> in San Vicente sample. The main potential sources of nitrogen in volcanic and hydrothermal fluids are (i) the atmosphere; (ii) the upper mantle, including both unaltered subducting oceanic crust and mantle wedge; (iii) the lower mantle; and (iv) the sediments, including subducted oceanic sediments and the continental crust. Each of these reservoirs has distinct δ<sup>15</sup>N values. Atmospheric nitrogen has been conventionally used as an international reference (δ<sup>15</sup>N = 0‰). The upper mantle, investigated through analyses on MORB and diamonds, revealed the presence of a light nitrogen component with typical δ<sup>15</sup>N values in the range -3‰ to -8‰ (Cartigny 1997; Marty and Hubert, 1997). Recently, anomalously negative δ<sup>15</sup>N values of -15‰ have been inferred for the lower mantle beneath the Indonesian plate (Mohapatra & Murty 2004; Clor *et al.*

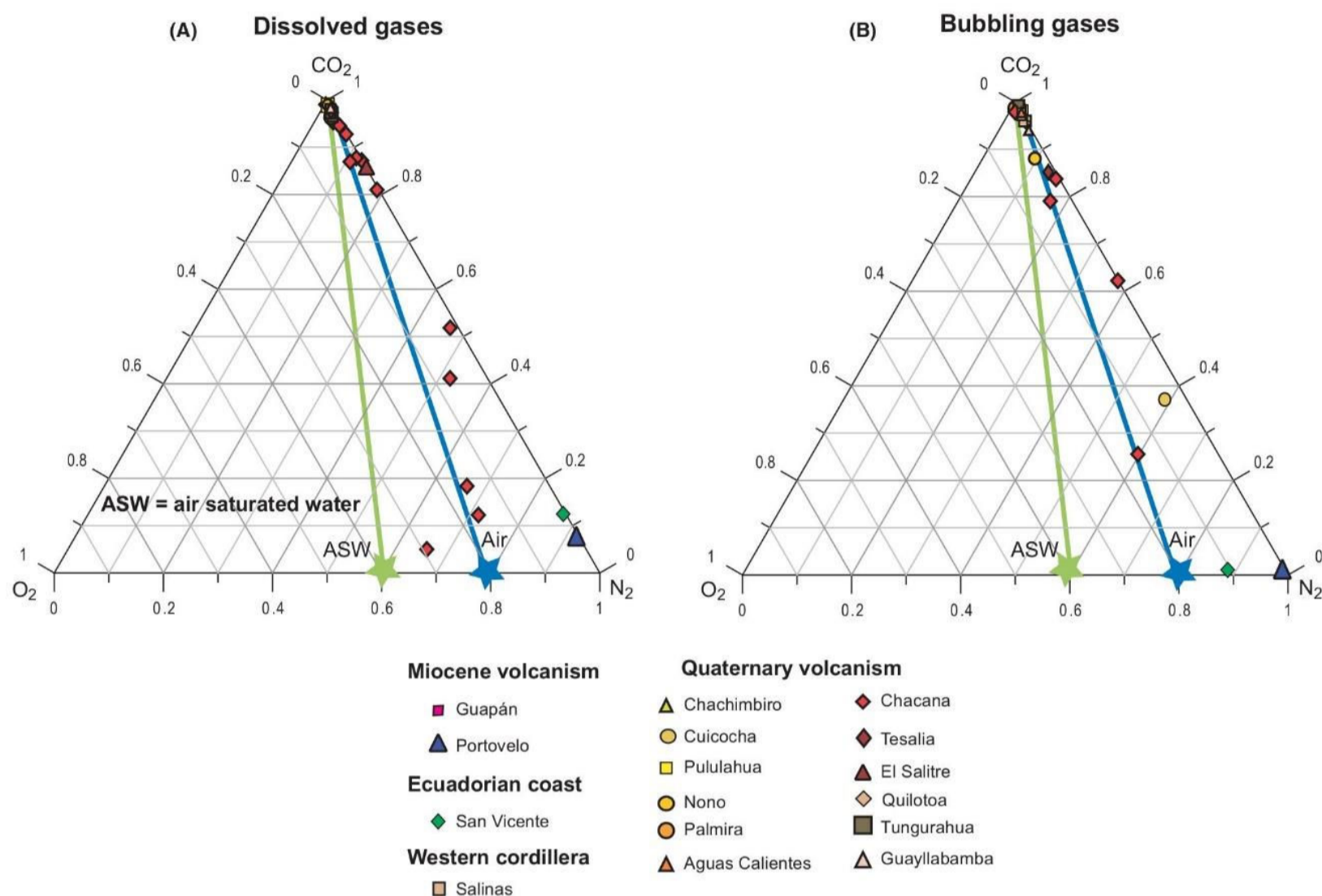


Fig. 6. (A) CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> diagram for dissolved gases and (B) for bubbling gases. All the samples show a mixing of CO<sub>2</sub> and Nitrogen with N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> ratio higher than the air saturated water ratio plotted as reference.

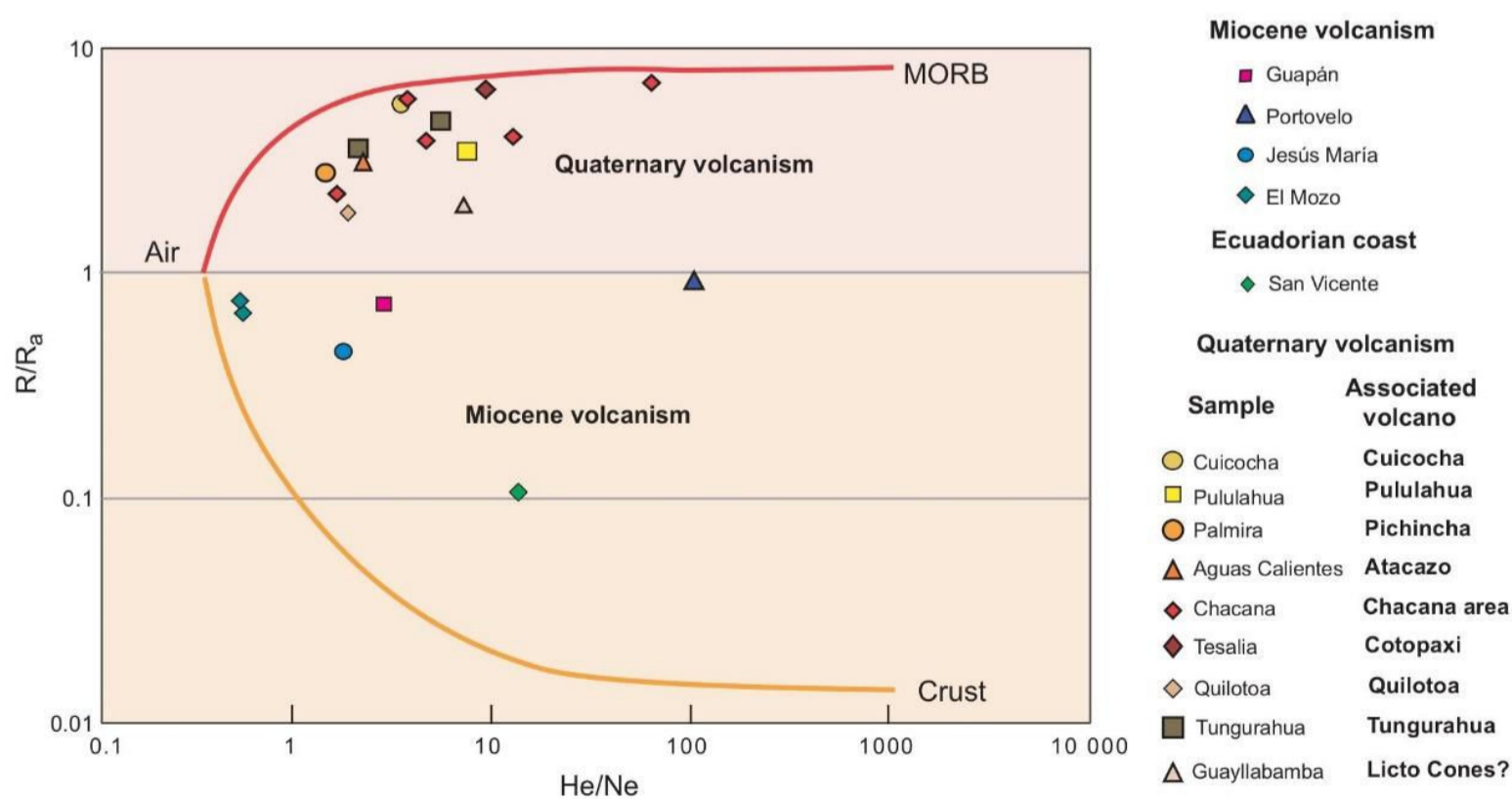
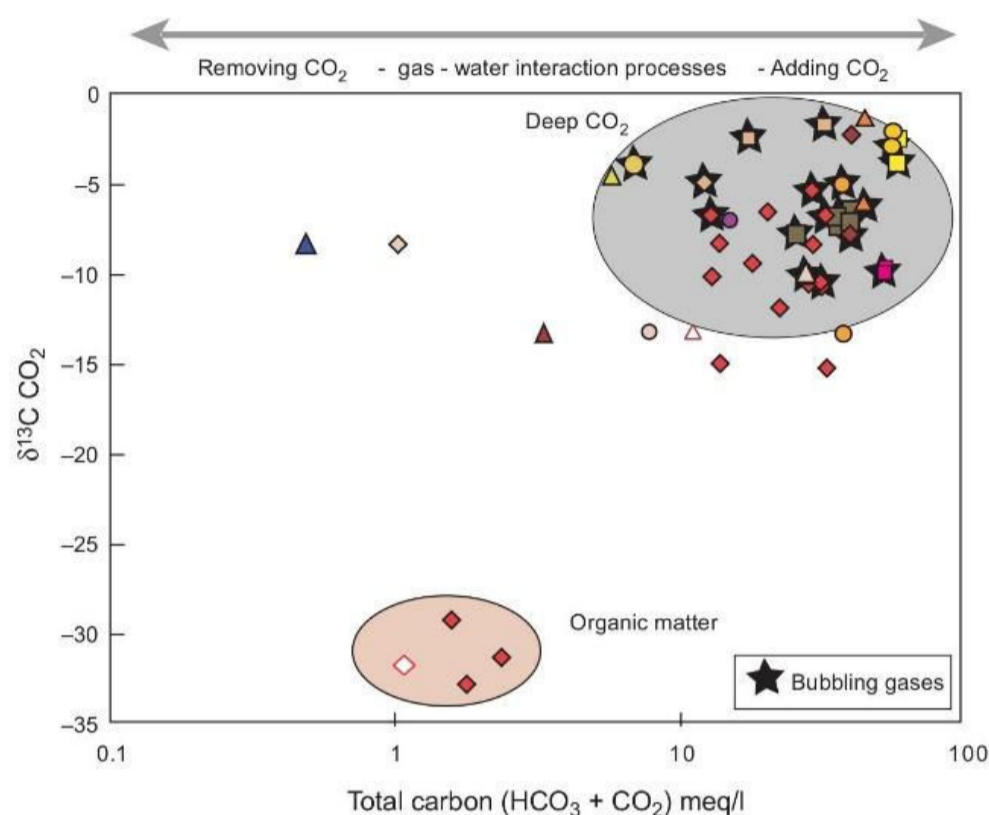


Fig. 7.  $R/R_a$  values versus He/Ne ratio diagram of sampled bubbling gases. Air, mid-ocean ridge basalts and crust fields are reported as reference. The samples display a distribution in two main groups above 2  $R/R_a$  and below 1  $R/R_a$ . The He/Ne ratios range between about 1 and 100.



**Fig. 8.**  $\delta^{13}\text{C}$  of computed  $\text{CO}_2$  gas from carbon isotope composition of TDIC and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  of bubbling gases both versus total amount of dissolved carbon species ( $\text{HCO}_3 + \text{dissolved CO}_2$ ). The wide variability showed for the total carbon amount reflects probably adding/removing  $\text{CO}_2$  processes in the aquifers. The carbon isotope composition shows a narrow variability ( $-5$  to  $-8\text{‰}$ ) indicating a common origin for the dissolved carbon in thermal waters. The very negative values (around  $-30\text{‰}$ ), with lower amount of total dissolved carbon, could indicate a different origin (organic) or be related to kinetic fractionation processes.

#### Miocene volcanism

- Guapán
  - Baños de Cuenca
  - ▲ Portovelo
- #### Western cordillera
- Salinas

#### Quaternary volcanism

Sample	Associated volcano	Sample	Associated volcano
▲ Chachimbiro	<b>Chachimbiro</b>	◆ Tesalia	
● Cuicocha	<b>Cuicocha</b>	▲ El Salitre	<b>Cotopaxi</b>
■ Pululahua	<b>Pululahua</b>	△ Cotopaxi - rivers	
● Nono	<b>Pichincha</b>	◆ Quilotoa	<b>Quilotoa</b>
● Palmira		■ Tungurahua	<b>Tungurahua</b>
▲ Aguas Calientes	<b>Atacazo</b>	● Los Elenes	<b>Chimborazo</b>
◆ Chacana		◆ Cununyacu	
◇ Chacana - rivers	<b>Chacana area</b>	△ Guayllabamba	<b>Licto Cones?</b>

2005) and for the Nicaraguan volcanic front (Elkins *et al.* 2006). Moreover, Inguaggiato *et al.* (2009) have recently reported extremely low  $\delta^{15}\text{N}$  values of  $-16$  and  $-15\text{‰}$  for the excess  $\text{N}_2$  in the volcanic gas samples, respectively, from Cabo Verde islands and Iceland. In contrast, typical  $\delta^{15}\text{N}$  values for a sedimentary component are generally enriched compared to those of the atmosphere ( $\delta^{15}\text{N} = +7\text{‰}$ , Sadofsky and Bebout, 2004; Sano *et al.* 2001; Mingran and Brauer, 2001).

Nitrogen isotope compositions were measured on only two samples, Portovelo and Tungurahua which, respectively, represent the nitrogen- and  $\text{CO}_2$ -dominant samples. The nitrogen data have been corrected for atmospheric contamination on the basis of the following equations (Inguaggiato *et al.* 2004b, 2006):

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{corr}} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{meas}} / \text{N}_{2_{\text{excess}}}(\%)) * 100 \quad (6)$$

$$\text{N}_{2_{\text{excess}}}(\%) = \frac{\text{N}_{2_{\text{observed}}} - \text{N}_{2_{\text{atmospheric}}}}{\text{N}_{2_{\text{observed}}}} * 100 \quad (7)$$

$$\text{N}_{2_{\text{atmospheric}}} = {}^{36}\text{Ar}_{\text{observed}} * \left( \frac{\text{N}_2}{{}^{36}\text{Ar}} \right)_{\text{ASW}} \quad (8)$$

The  $\delta^{15}\text{N}$  values corrected for air contamination have been plotted versus  $R/R_a$  in Fig. 13, together with the field of upper mantle and crust as references. The distribution of samples highlights a different origin for both systems,  $\delta^{15}\text{N} = -5\text{‰}$ ,  $5 R/R_a$  and  $\delta^{15}\text{N} = +5\text{‰}$ ,  $0.9 R/R_a$ , respectively, for Tungurahua and Portovelo. These values are compatible with the geodynamic setting of the Ecuadorian volcanoes, in fact Tungurahua volcano fluids, characterized by significant He-mantle signature (around 60%), is located in the recent active volcanism area (above  $2^\circ\text{S}$ ) and has been active since 1999, while the fluid manifestation of Portovelo, characterized by a prevalent He-sedimentary-crustal signature (around 90%), is located in the ancient Miocene volcanic area (below  $2^\circ\text{S}$ ).

Finally, the isotope composition of carbon of  $\text{CH}_4$  in the San Vicente sample, characterized by methane-rich fluids (98.1% Vol), shows a value of  $-39\text{‰}$  versus

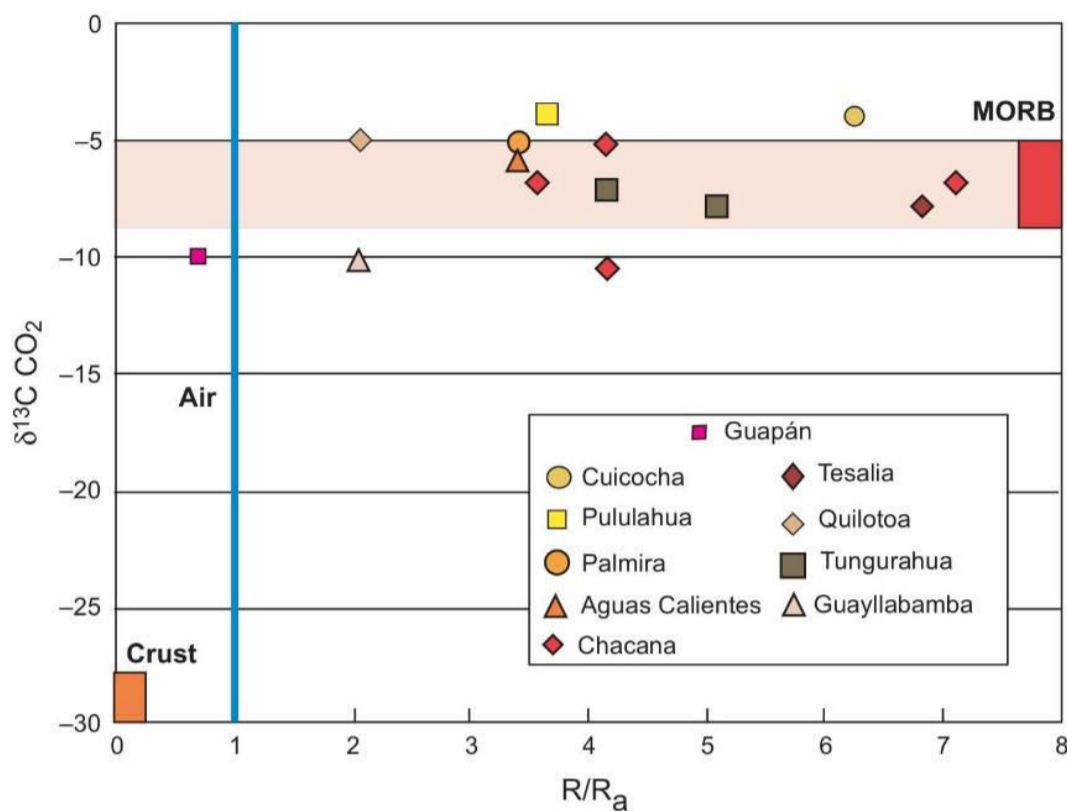


Fig. 9.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  of bubbling gas versus  $R/R_a$ ; mid-ocean ridge basalts and crust values are plotted as reference. The carbon isotope displays a very narrow range confirming the common origin of carbon for these fluids. The  $R/R_a$  values from 2 up to 7 for the bubbling free gases are indicative of a magmatic origin for the majority of samples.

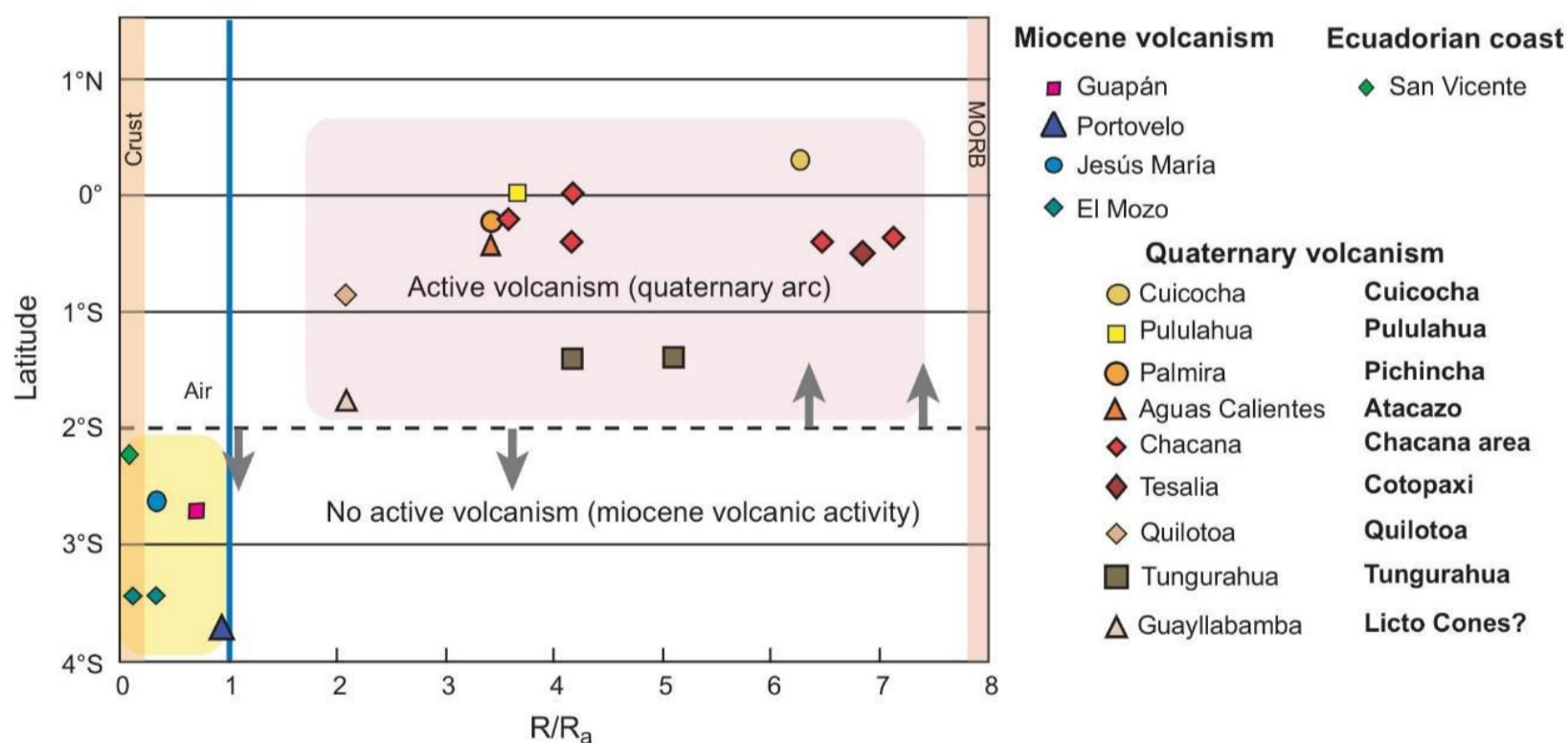


Fig. 10. Helium isotopic composition versus the Latitude of sampling sites. A clear geographic distribution of samples in two geochemical groups is evident. All the samples located to the north of 2°S highlight the origin of these fluids from an active volcanic arc ( $R/R_a$  from 2 to 7), while all the samples located below 2°S reflect an origin from a nonactive volcanic arc ( $R/R_a$  below 1).

PDB. This value suggests a thermogenic origin for these fluids.

### CONCLUSIONS

The first characterization of hydrothermal fluids related to volcanic systems of the Volcanic Ecuadorian chains highlights the key role of volatiles.

The geochemical composition of the sampled thermal waters is the result of strong water–rock interaction processes that drive the dissolution of minerals on the basis of the physico-chemical conditions of aquifers (pH, T, P, redox conditions) and show, on the basis of deuterium and oxygen isotopes composition, a clear meteoric origin.

Interestingly, no clear water geochemical differences can be discerned between the hydrothermal systems linked to

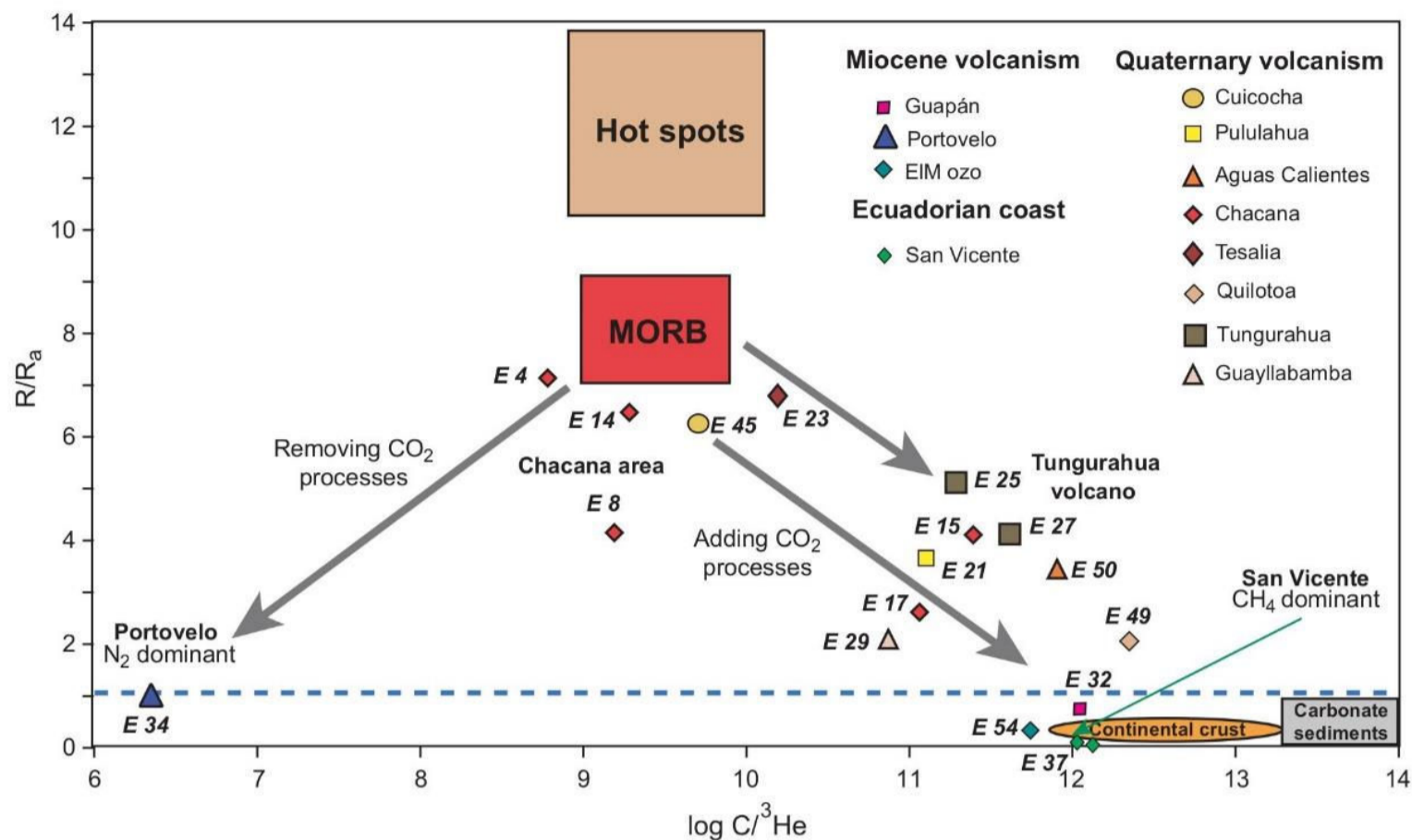


Fig. 11. Log C/<sup>3</sup>He versus R/R<sub>a</sub> of bubbling gases. The distribution of plotted samples reflects two different kinds of processes: gas–water interaction processes with fluids with magmatic origin and carbon adding/removing processes. The fluids of Chacana area show higher helium isotope values with Log C/<sup>3</sup>He around 10. San Vicente area shows lower R/R<sub>a</sub> values (up to 0.1) with higher Log C/<sup>3</sup>He up to 12, highlighting CO<sub>2</sub> adding processes. Conversely, Portovelo sample area shows values of R/R<sub>a</sub> around 1 with a very low value of Log C/<sup>3</sup>He (around 6) indicating strong CO<sub>2</sub> removing processes.

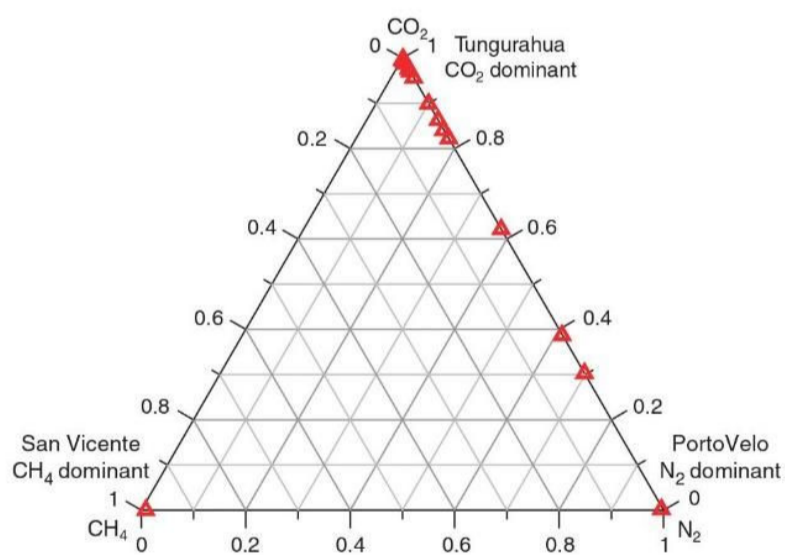


Fig. 12. The chemical composition of bubbling gases samples plotted on the CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> diagram highlights the presence of three groups of samples: Tungurahua, PortoVelo and San Vicente areas, respectively, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> dominant samples. A mixing between CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> dominant samples is evident, too.

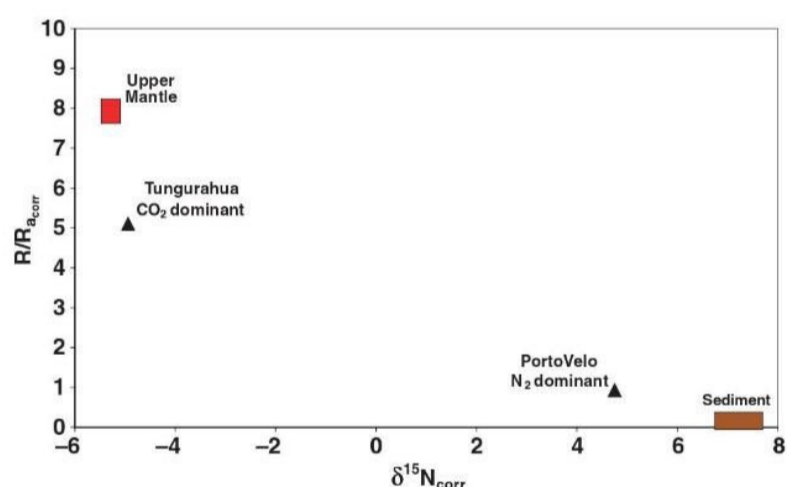


Fig. 13. Nitrogen and helium isotope compositions, both corrected for air contamination, of Tungurahua and PortoVelo samples have been plotted. Two clear different origins (magmatic and sedimentary) are evident, respectively, for the Tungurahua and PortoVelo samples.

the Volcanic Front volcanoes or the Main Arc ones, despite their different basements.

These fluids highlight a MORB-like isotopic signature of CO<sub>2</sub> at R/R<sub>a</sub> > 2. The helium isotope composition ranges from 0.1 to 7.1 R/R<sub>a</sub>. This allowed the division of the samples in two distinct groups, above 2 and below 1 R/R<sub>a</sub>,

respectively. These two groups of samples correspond to the geographical limit of the active volcanic arc in Ecuador. The springs group with higher R/R<sub>a</sub> values lies to the north of 2°S (active volcanism), and the springs group with lower values lies to the south of 2°S (extinct volcanism).

The nitrogen isotope compositions of discharged fluids corroborate the different origin of these two groups of fluids (-5 and +5 δ<sup>15</sup>N, respectively for Tungurahua and PortoVelo samples) with a clear geographic distribution, which



highlights the powerful tool of the isotopes to discriminate different sources.

On the basis of this preliminary fluid characterization exercise and considering the strong gas–water interaction between deep magmatic fluids and thermal waters associated to volcanic systems, it is possible to identify sensible sites for starting a systematic geochemical monitoring activity and complementary research for geothermal energy exploration.

### ACKNOWLEDGEMENTS

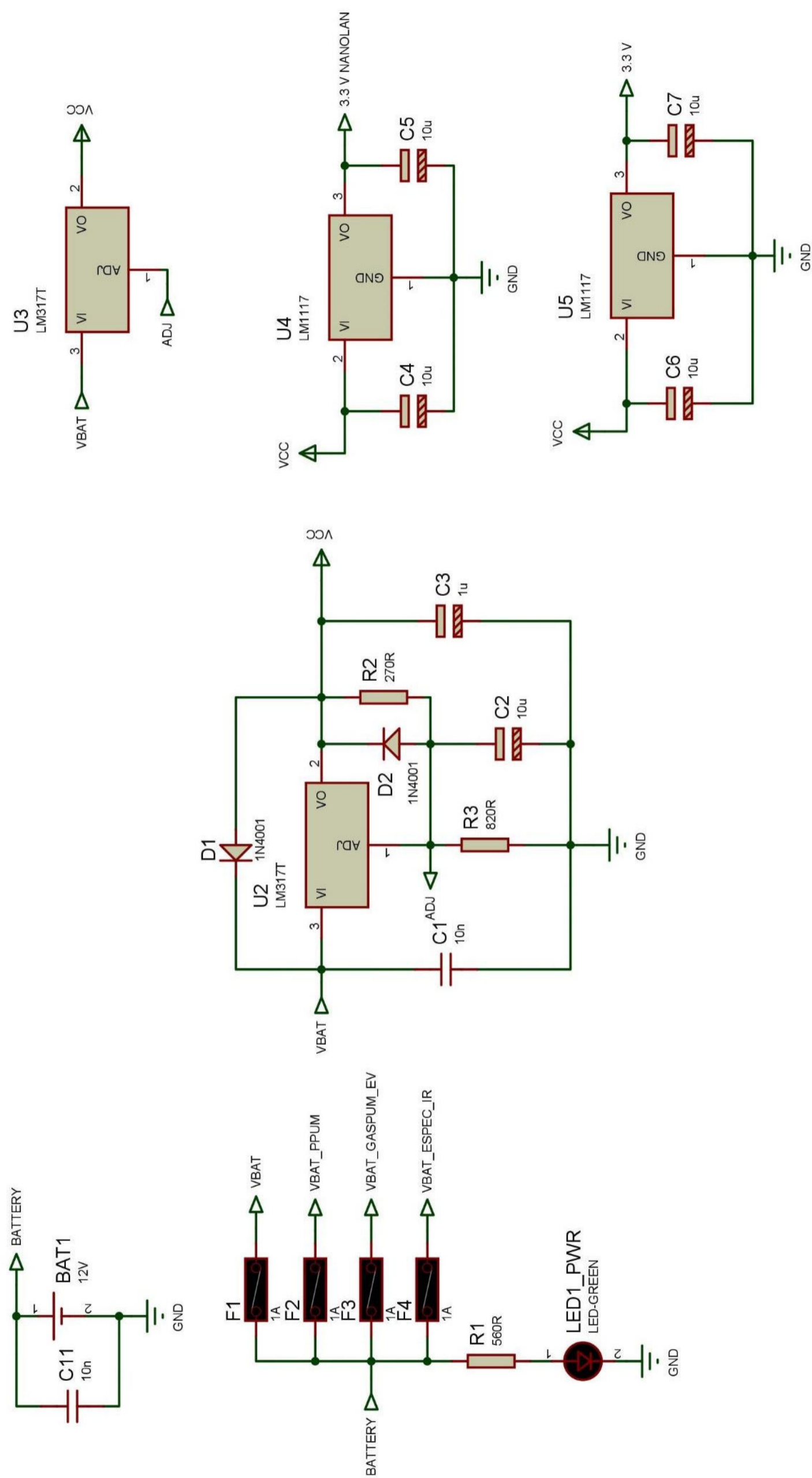
The field campaigns carried out during this study were funded by the BID-1707-OC-ECand SENACYT-PIN-08-EPNGEO-0001 projects carried out by the Instituto Geofísico of Escuela Politécnica Nacional (Quito-Ecuador). Chemical and isotopes analysis were possible thanks to Geochemical Laboratories of INGV-Sezione di Palermo. Special thanks go to S. Benítez for kindly recognizing the importance of including the Chacana geochemical data as part of the Ecuadorian arc system. Last but not least, thanks to Osman Poma, who assisted in sampling the spring waters of El Mozo and Puyango in southern Ecuador and to Jorge Bustillos and Benjamin Bernard, who collaborated in some sampling sites and provided timely help with ARCGIS for sample location on Fig. 2.

### REFERENCES

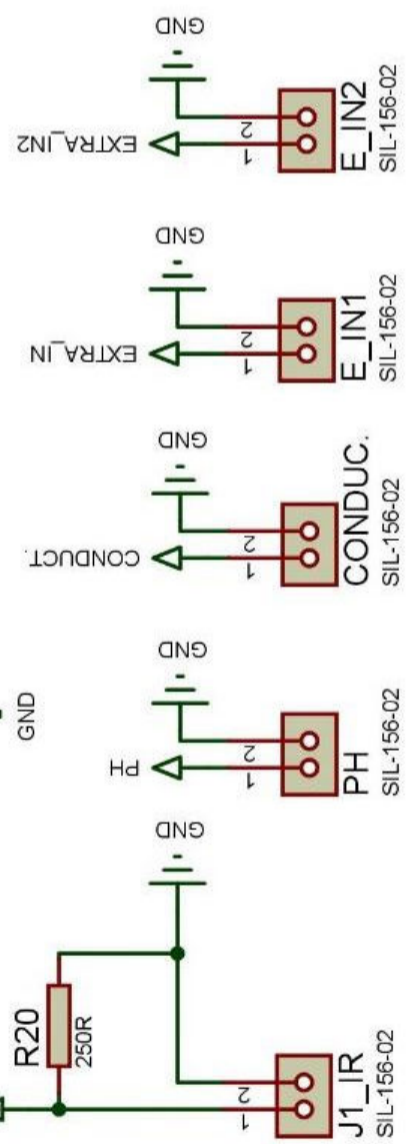
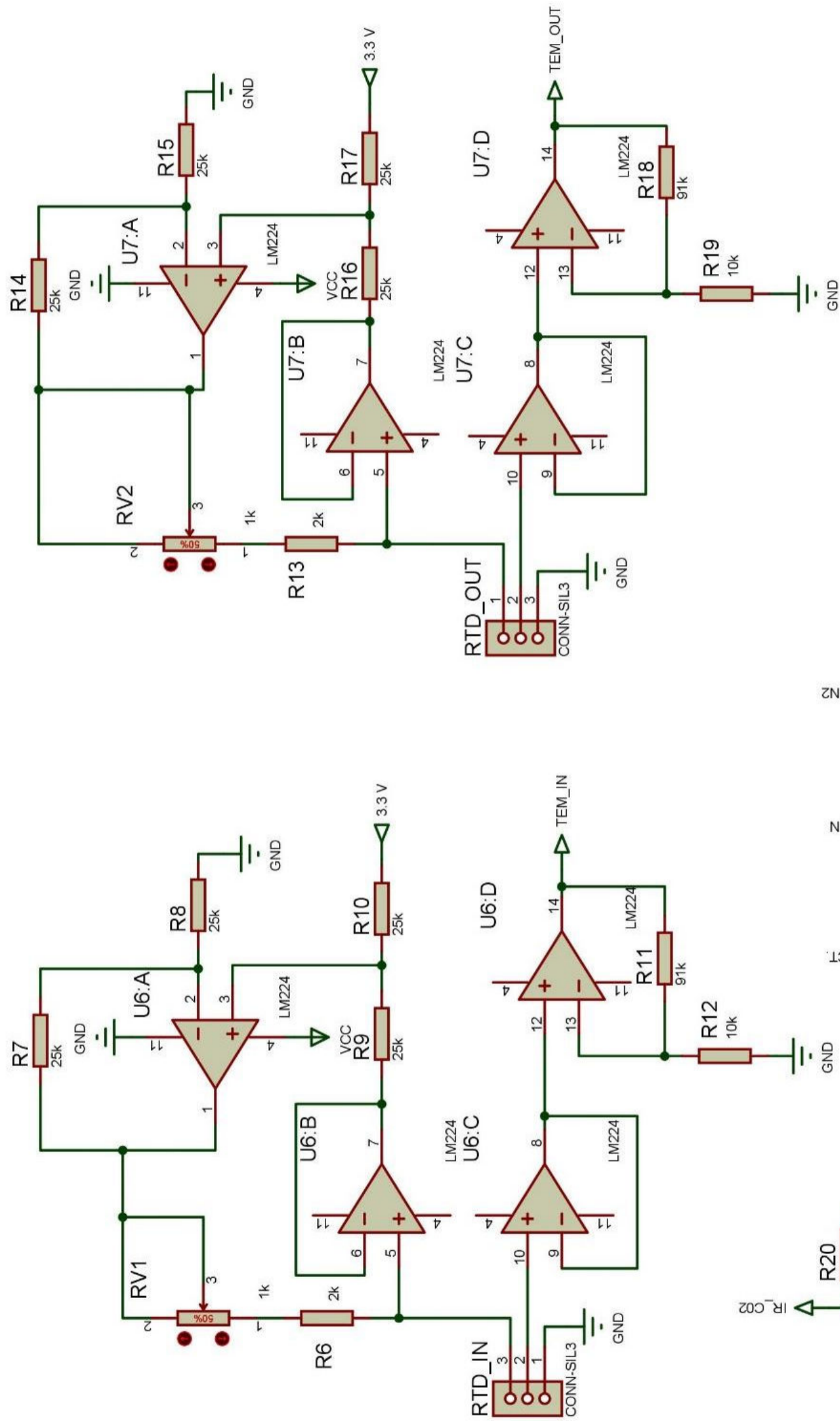
- Aspden JA, Litherland M (1992) The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, **205**: 187–204.
- Aspden JA, Fortey N, Litherland M, Viteri F, Harrison SM (1992a) Regional S-type granites in the Ecuadorian Andes: Possible remnants of the breakup of western Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*, **6**, 123–32.
- Aspden JA, Harrison SH, Rundle CC (1992b) New chronological control for the tectono-magmatic evolution of the metamorphic basement, Cordillera Real and El Oro Province of Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, **6**: 77–96.
- Beate B, Salgado R (2005) *Country Geothermal update for Ecuador, 2000–2005*. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya – Turkey.
- Beate B, Monzier M, Spikings R, Cotten J, Silva J, Bourdon E, Eissen JP (2001) Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center. *Earth and Planetary Science Letters*, **192**, 561–70.
- Capasso G, Inguaggiato S (1998) A simple method for the determination of dissolved gases in natural waters: an application to thermal waters from Vulcano island. *Applied Geochemistry*, **13**, 631–42.
- Cartigny P, Boyd SR, Harris JW, Javoy M (1997) Diamonds and isotopic composition of mantle nitrogen. *Terra Nova*, **9**, 175–9.
- Clor LE, Fischer TP, Hilton DR, Sharp ZD, Hartono U (2005) Volatile and N isotope chemistry of the Molucca Sea collision zone: tracing source components along the Sangihe Arc, Indonesia. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, **6**. doi:10.1029/2004GC000825.
- Cosma L *et al.* (1998) Pétrographie et géochimie des unités magmatiques de la Cordillère Occidental d'Equateur (0°30'S): implications tectoniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **169**, 739–51.
- Deines P, Langmuir D, Herman RS (1974) Stable carbon isotope ratio and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate groundwaters. *Geochimica et cosmochimica acta*, **38**, 1147–64.
- Elkins LJ, Fischer TP, Hilton DR, Sharp ZD, McKnight S, Walker J (2006) Tracing nitrogen in volcanic and geothermal volatiles from the Nicaraguan volcanic front. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **70**, 5215–35.
- Goosens PJ, Rose W (1973) Chemical composition and age determination of tholeiitic rocks in the Basic Igneous Complex, Ecuador. *Geological Society of America Bulletin*, **84**, 1043–52.
- Gutscher MA, Malavieille J, Lallemand S, Collot JY (1999) Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, **168**, 255–70.
- Hall ML, Beate B (1991) *El Volcanismo Plio-cuaternario en los Andes del Ecuador*. Est. Geogr. Vol 4. Corp.Edit.Nacional. Quito.
- Hein RJ, Yeh H-W (1983) Oxygen-isotope composition of secondary silica phases, Costa Rica Rift, Deep Sea Drilling Project Leg 69. *Deep Sea Drilling Project Initial Reports*, **69**, 423–9.
- Hilton DR, Hammerschmidt K, Teufel S, Friedrichsen H (1993) Helium isotope characteristics of Andean geothermal fluids and lavas Earth and Planetary. *Science Letters*, **120**, 265–82.
- Hughes R, Pilatasig L (2002) Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, **345**, 29–48.
- Inguaggiato S, Rizzo A (2004) Dissolved helium isotope ratios in groundwaters: a new technique based on gas-water re-equilibration and its application to Stromboli volcanic system. *Applied Geochemistry*, **19**, 665–73.
- Inguaggiato S, Pecoraino G, D'Amore F (2000) Chemical and isotopic characterization of fluid manifestations of Ischia Island (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **99**, 151–78.
- Inguaggiato S, Taran YA, Grassa F, Capasso G, Favara R, Varley N, Faber E (2004b) Nitrogen isotopes in thermal fluids of a forearc region (Jalisco Block, Mexico): evidence for heavy nitrogen from continental crust. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, **5**, Q12003.
- Inguaggiato S, Martin-Del Pozzo AL, Aguayo A, Capasso G, Favara R (2005) Isotopic, chemical and dissolved gas constraints on spring water from Popocatepetl (Mexico): evidence of gas-water interaction magmatic component and shallow fluids. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **141**, 91–108.
- Inguaggiato S, Grassa F, Capasso G, Favara R, Rizzo A, Taran Y (2006) Simultaneous determination of <sup>36</sup>Ar and N<sub>2</sub> content together with δ<sup>15</sup>N values in gas samples: examples from different arc-related volcanic systems AGU Fall Meeting 2006.V33A-0638.
- Inguaggiato S, Taran Y, Fridriksson T, Melian G, D'Alessandro W (2009) Nitrogen isotopes in volcanic fluids of different geodynamic settings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**(Suppl.), A569.
- Kellogg JN, Vega V (1995) Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Columbian Andes: constraints from global positioning system geodetic studies and gravity. In: *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America* (ed. Mann P), pp. 75–86. Geological Society of America Bulletin, Boulder, Colorado.

- Lapierre H *et al.* (2000) Multiple plume events in the genesis of the peri-Caribbean Cretaceous oceanic plateau province. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 8404–21.
- Lavenu A *et al.* (1992) New K-Ar age dates of Neogene and Quaternary volcanic rocks from the Ecuadorian Andes : implications for the relationship between sedimentation, volcanism, and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, **5**, 309–20.
- Lebrat M, Megard F, Dupuy C, Dostal J (1987) Geochemistry and tectonic setting of pre-collision Cretaceous and Paleogene volcanic rocks of Ecuador. *Bulletin of the Geological Society of America*, **99**, 569–78.
- Litherland M, Aspden JA, Jemielita RA (1994) The metamorphic belts of Ecuador, Overseas memoir 11. British Geological Survey.
- Lonsdale P (1978) Ecuadorian subduction system. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, **62**, 2454–77.
- Lonsdale P, Klitgord KD (1978) Structure and tectonic history of the eastern Panama Basin. *Geological Society of America Bulletin*, **89**, 981–99.
- Luzieux LDA, Heller F, Spikings R, Vallejo C, Winkler W (2006) Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1[deg]N and 3[deg]S: paleomagnetic, radiometric and fossil evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, **249**, 400–14.
- Marty B, Jambon A (1987) C/<sup>3</sup>He in volatile fluxes from the solid earth: implications for carbon geodynamics. *Earth Planetary Science Letters*, **83**, 16–26.
- Marty B, Humbert F (1997) Nitrogen and argon isotopes in oceanic basalts. *Earth Planetary Science Letters*, **152**, 101–12.
- Michaud F *et al.* (2005) Fields of multi-kilometer scale sub-circular depressions in the Carnegie Ridge sedimentary blanket: effect of underwater carbonate dissolution? *Marine Geology*, **216**, 205–19.
- Mingram B, Brauer K (2001) Ammonium concentration and nitrogen isotope composition in metasedimentary rocks from different tectonometamorphic units of the European Variscan Belt. *Geochimica et cosmochimica acta*, **65**, 275–87.
- Mohapatra RK, Murty SVS (2004) Nitrogen isotopic composition of the MORB mantle: a reevaluation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **5**, Q01001.
- Mook WG, Bemmerson JC, Steverman WH (1974) Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. *Earth and Planetary Science Letters*, **22**, 169–76.
- Pennington WD (1981) Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*, **86**, 10753–70.
- Reynaud C, Jaillard E, Lapierre H, Mamberti M, Mascle G (1999) Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: Their place in the geodynamic evolution of northwestern South America. *Tectonophysics*, **307**, 235–54.
- Sadofsky SJ, Bebout GE (2004) Nitrogen geochemistry of subducting sediments: new results from the Izu-Bonin-Mariana margin and insights regarding global nitrogen subduction. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **5**, Q03115, doi: 10.1029/2003GC000543.
- Sallares V, Charvis P (2003) Crustal thickness constraints on the geodynamic evolution of the Galapagos Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, **214**, 545–59.
- Sano Y, Takahata N, Nishio Y, Fischer TP, Williams SN (2001) Volcanic flux of nitrogen from the earth. *Chemical geology*, **171**, 263–71.
- Sano Y, Marty B (1995) Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology*, **119**, 265–74.
- Sano Y, Wakita H (1985) Geographical distribution of <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He in Japan: implications for arc tectonics and incipient magmatism. *Journal of Geophysical Research*, **90**, 8729–41.
- Trenkamp R, Kellogg JN, Freymueller JT, Mora HP (2002) Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**, 157–71.
- Varekamp JC, Kreulen R, Poorter RPE, Van Bergen MJ (1992) Carbon sources in arc volcanism, with implications for the carbon cycle. *Terra Nova*, **4**, 363–73.
- Witt C *et al.* (2006) Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as a response to the North Andean Block tectonic escape Tectonics **25**: TC3017, doi: 10.1029/2004TC001723.

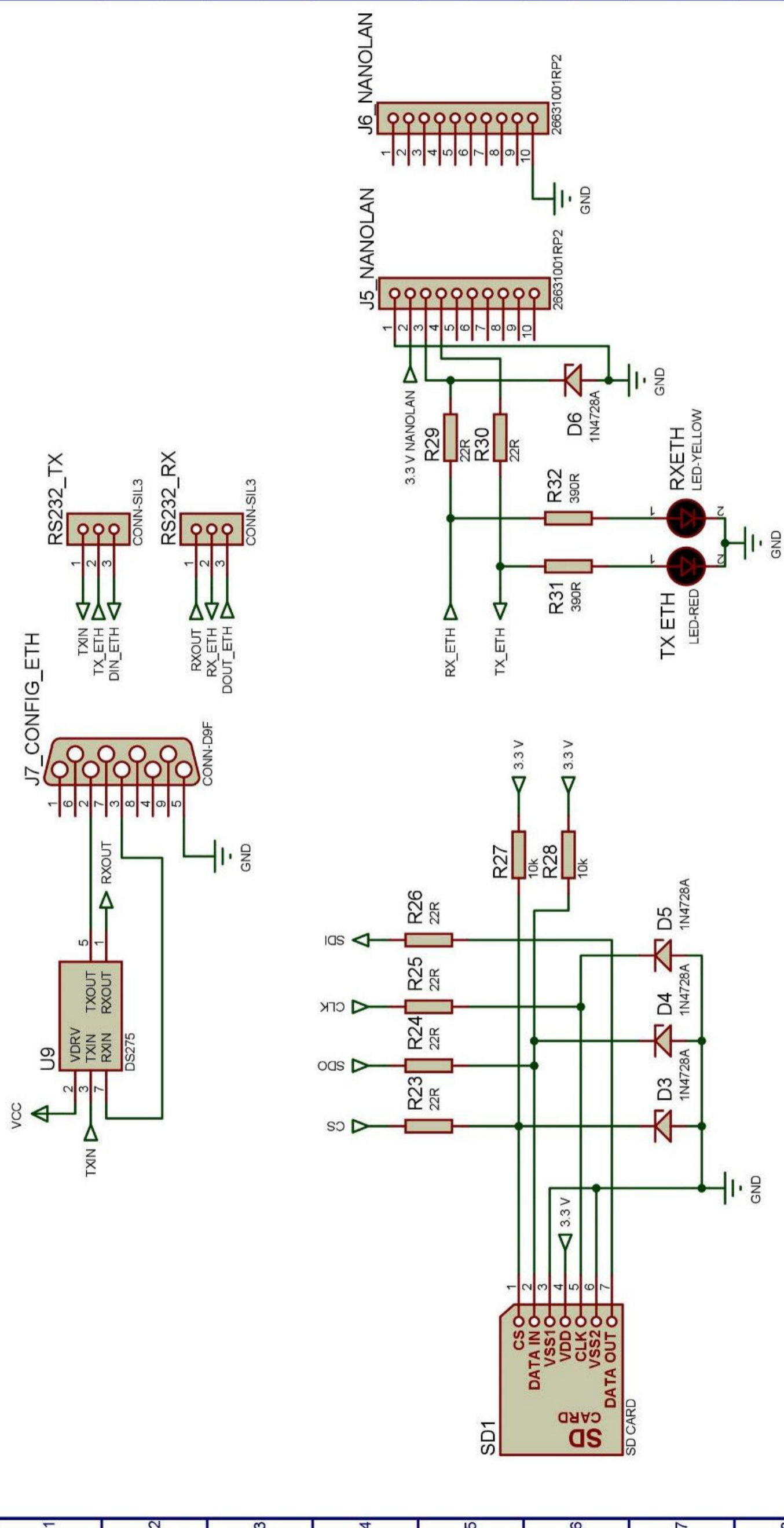
**ANEXO B**  
**PLANOS ESQUEMÁTICOS DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO**



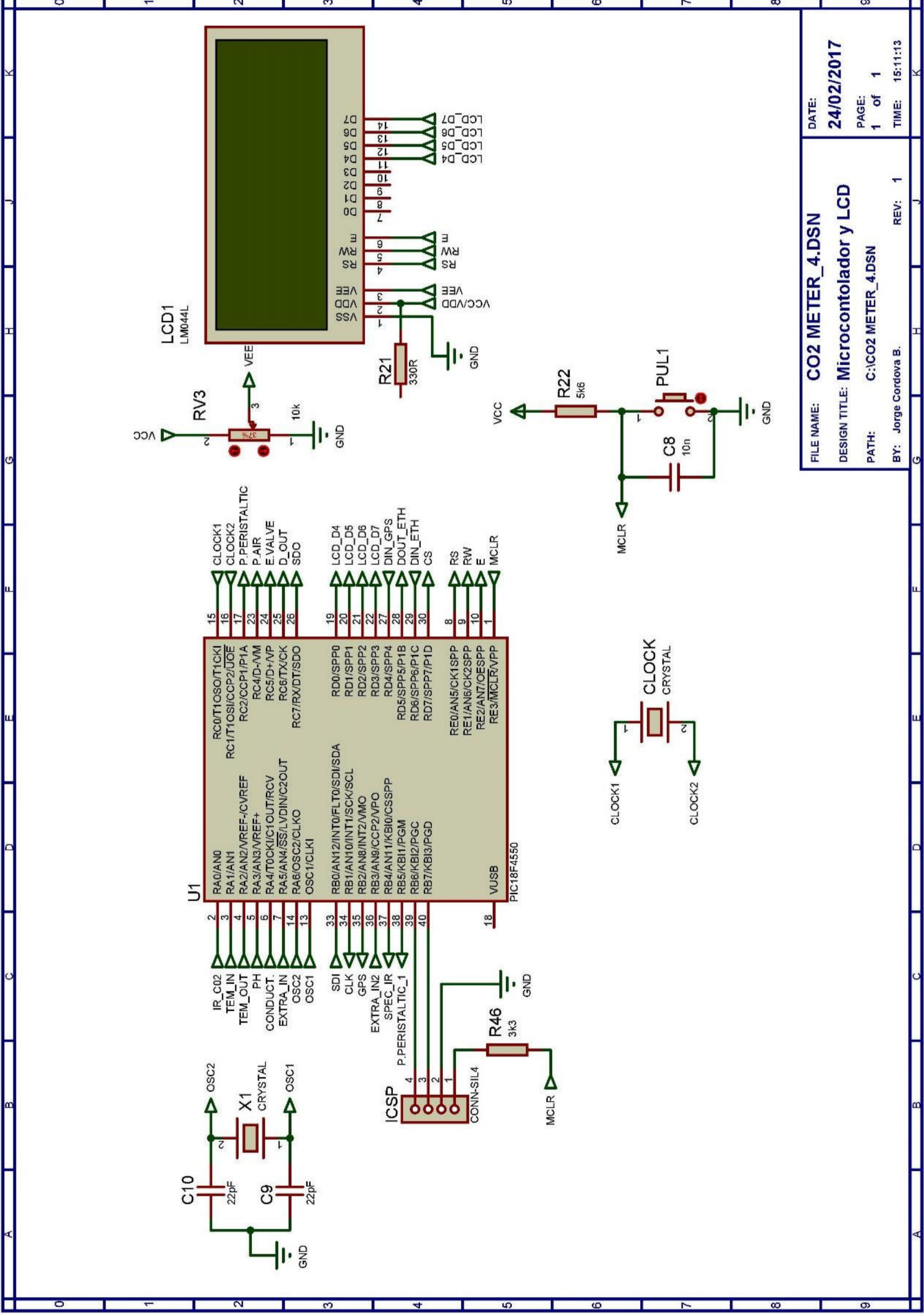
FILE NAME:	CO2 METER_1.DSN	DATE:	24/02/2017
DESIGN TITLE:	Etapa de regulación	PAGE:	1 of 1
PATH:	C:\CO2 METER_1.DSN	REV:	1
BY:	Jorge Cordova B.	TIME:	14:43:45



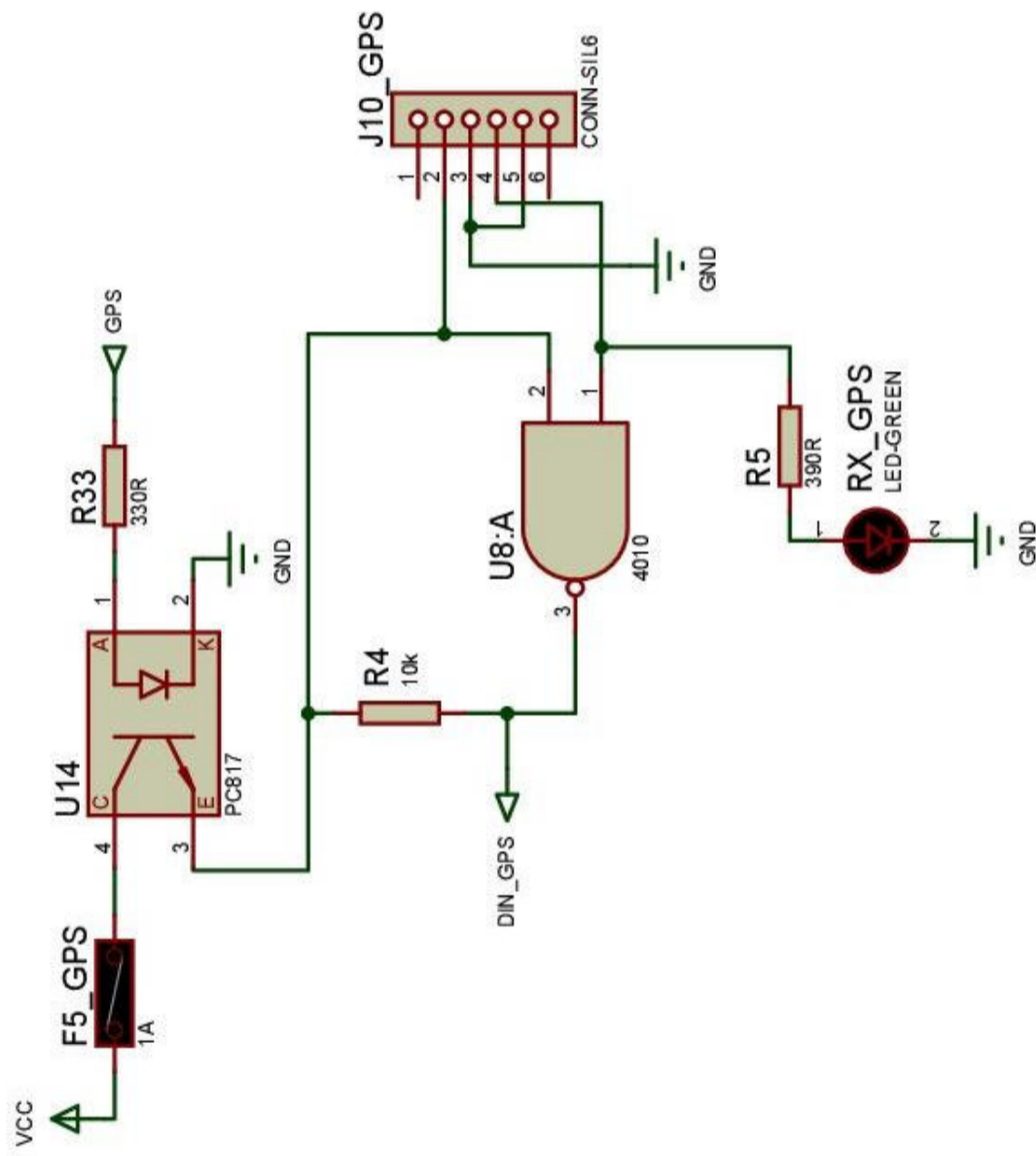
FILE NAME:	CO2 METER_2.DSN	DATE:	24/02/2017
DESIGN TITLE:	Etapa de acondicionamiento	PAGE:	1 of 1
PATH:	C:\CO2 METER_2.DSN	REV:	1
BY:	Jorge Cordova B.	TIME:	14:47:30



FILE NAME:	<b>CO2 METER_3.DSN</b>
DESIGN TITLE:	<b>Almacen. y Transmisión</b>
PATH:	C:\CO2 METER_3.DSN
BY:	Jorge Cordova B.
DATE:	<b>24/02/2017</b>
PAGE:	1 of 1
REV:	1
TIME:	14:57:28



FILE NAME:	CO2 METER_4.DSN
DESIGN TITLE:	Microcontrolador y LCD
PATH:	C:\CO2 METER_4.DSN
BY:	Jorge Cordova B.
REV:	1
DATE:	24/02/2017
PAGE:	1 of 1
TIME:	15:11:13



FILE NAME:	CO2 METER_6.DSN	DATE:	24/02/2017
DESIGN TITLE:	GPS	PAGE:	1 of 1
PATH:	C:\CO2 METER_6.DSN	TIME:	15:23:43
BY:	Jorge Cordova B.	REV:	1



**ANEXO C**  
**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

**ANEXO C-1**

**Sentencias NMEA 0183 GPS GARMIN 18X LVC**

\$GPGGA,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,M,<10>,M,<11>,<12>\*hh<CR><LF>

<1>	UTC time of position fix, hhmmss format for GPS 18x PC or LVC; hhmmss.s format for GPS 18x-5Hz
<2>	Latitude, ddmm.mmmmm format for GPS 18x PC/LVC; ddmm.mmmmmmm for GPS 18x-5Hz (leading zeros will be transmitted)
<3>	Latitude hemisphere, N or S
<4>	Longitude, dddmm.mmmmm format for GPS 18x PC/LVC; dddmm.mmmmmmm for GPS 18x-5Hz (leading zeros will be transmitted)
<5>	Longitude hemisphere, E or W
<6>	GPS quality indication, 0 = fix not available, 1 = Non-differential GPS fix available, 2 = Differential GPS (WAAS) fix available, 6 = Estimated
<7>	Number of satellites in use, 00 to 12 (leading zeros will be transmitted)
<8>	Horizontal dilution of precision, 0.5 to 99.9
<9>	Antenna height above/below mean sea level, -9999.9 to 99999.9 meters
<10>	Geoidal height, -999.9 to 9999.9 meters
<11>	Null (Differential GPS)
<12>	Null (Differential Reference Station ID)

\$GPGSA,<1>,<2>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<3>,<4>,<5>,<6>\*hh<CR><LF>

<1>	Mode, M = Manual, A = Automatic
<2>	Fix type, 1 = not available, 2 = 2D, 3 = 3D
<3>	PRN number, 01 to 32, of satellite used in solution, up to 12 transmitted (leading zeros will be transmitted)
<4>	Position dilution of precision, 0.5 to 99.9
<5>	Horizontal dilution of precision, 0.5 to 99.9
<6>	Vertical dilution of precision, 0.5 to 99.9

\$GPGSV,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,...<4>,<5>,<6>,<7>\*hh<CR><LF>

<1>	Total number of GSV sentences to be transmitted
<2>	Number of current GSV sentence
<3>	Total number of satellites in view, 00 to 12 (leading zeros will be transmitted)
<4>	Satellite PRN number, 01 to 32 (leading zeros will be transmitted)
<5>	Satellite elevation, 00 to 90 degrees (leading zeros will be transmitted)
<6>	Satellite azimuth, 000 to 359 degrees, true (leading zeros will be transmitted)
<7>	Signal to noise ratio (C/No) 00 to 99 dB (leading zeros will be transmitted)

\$GPRMC,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,<10>,<11>,<12>\*hh<CR><LF>

<1>	UTC time of position fix, hhmmss format for GPS 18x PC/LVC; hhmmss.s format for GPS 18x-5Hz
<2>	Status, A = Valid position, V = NAV receiver warning
<3>	Latitude, ddmm.mmmmm format for GPS 18x PC/LVC; ddmm.mmmmmmm format for GPS 18x-5Hz (leading zeros must be transmitted)
<4>	Latitude hemisphere, N or S
<5>	Longitude, dddmm.mmmmm format for GPS 18x PC/LVC; dddmm.mmmmmmm format for GPS 18x-5Hz (leading zeros must be transmitted)
<6>	Longitude hemisphere, E or W
<7>	Speed over ground, GPS 18x PC and LVC: 000.0 to 999.9 knots, GPS 18x-5Hz: 000.00 to 999.99 knots (leading zeros will be transmitted)
<8>	Course over ground, 000.0 to 359.9 degrees, true (leading zeros will be transmitted)
<9>	UTC date of position fix, ddmmyy format
<10>	Magnetic variation, 000.0 to 180.0 degrees (leading zeros will be transmitted)
<11>	Magnetic variation direction, E or W (westerly variation adds to true course)
<12>	Mode indicator (only output if NMEA 0183 version 2.30 active), A = Autonomous, D = Differential, E = Estimated, N = Data not valid

## **ANEXO C-2**

### **Asignación de pines para varios modelos de memorias SD**

Pin No.	Name	Type <sup>a</sup>	Description
<b>SD Card</b>			
1	CD/DAT3 <sup>b</sup>	I/O/PP	Card Detect/Data Line [bit 3]
2	CMD	PP	Command/Response
3	V <sub>SS1</sub>	S	Supply Voltage Ground
4	V <sub>DD</sub>	S	Supply Voltage
5	CLK	I	Clock
6	V <sub>SS2</sub>	S	Supply Voltage Ground
7	DAT0	I/O/PP	Data Line [bit 0]
8	DAT1	I/O/PP	Data Line [bit 1]
9	DAT2	I/O/PP	Data Line [bit 2]
<b>miniSD Card</b>			
1	CD/DAT3	I/O/PP	Card Detect/Data Line [bit 3]
2	CMD	I/O/PP	Command/Response
3	V <sub>SS1</sub>	S	Supply Voltage Ground
4	V <sub>DD</sub>	S	Supply Voltage
5	CLK	I	Clock
6	V <sub>SS2</sub>	S	Supply Voltage Ground
7	DAT 0	I/O/PP	Data Line [bit 0]
8	DAT1	I/O/PP	Data Line [bit 1]
9	DAT2	I/O/PP	Data Line [bit 2]
10	NC	I/O/PP	For future use
11	NC	I/O/PP	For future use
<b>microSD Card</b>			
1	DAT2	I/O/PP	Data Line [bit 2]
2	CD/DAT3	I/O/PP	Card Detect/Data Line [bit 3]
3	CMD	PP	Command/Response
4	V <sub>DD</sub>	S	Supply Voltage
5	CLK	I	Clock
6	V <sub>SS</sub>	S	Supply Voltage Ground
7	DAT0	I/O/PP	Data Line [bit 1]
8	DAT1	I/O/PP	Data Line [bit 2]

## **ANEXO C-3**

**Puente serial-ethernet Nano Land Reach**

Nano SocketLAN™

# Nano SocketLAN™



## Data Sheet

Ver. 1.20

**Connect One™**

**International:**

Connect One Ltd.

20 Atir Yeda Street

Kfar Saba 44643, Israel

Phone: +972-9-766-0456

Fax: +972-9-766-0461

Email: [sales@connectone.com](mailto:sales@connectone.com)

**USA:**

560 S. Winchester Blvd.

Suite 500

San Jose, CA 95128

Tel: (408) 572-5675

Fax: (408) 572-5601

Information provided by Connect One Ltd. is believed to be accurate and reliable. However, Connect One assumes no responsibility for its use, nor any infringement of patents or other rights of third parties, which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent rights of Connect One other than for circuitry embodied in Connect One's products. Connect One reserves the right to change circuitry at any time without notice. This document is subject to change without notice.

The software described in this document is furnished under a license agreement and may be used or copied only in accordance with the terms of such a license agreement. It is forbidden by law to copy the software on any medium except as specifically allowed in the license agreement. No part of this document may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including but not limited to photocopying, recording, transmitting via fax and/or modem devices, scanning, and/or information storage and retrieval systems for any purpose without the express written consent of Connect One.

iChip, Nano SocketLAN, IP Communication Controller, SerialNET, AT+i and Connect One are trademarks of Connect One Ltd.

Copyright © 2009, Connect One Ltd. All rights reserved.



## Revision History

### 11-4200-05

Version	Date	Description
1.00	July 2009	Initial preliminary version
1.05	July 2009	Miscellaneous corrections
1.10	July 2009	Added resistor values for USB connector
1.15	July 2009	Updated Mechanical Dimensions
1.20	July 2009	Corrected part number

---

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>1-1</b>
1.1	General Description .....	1-1
1.2	Hardware Description.....	1-1
1.3	Performance Specifications .....	1-1
<b>2</b>	<b>Features.....</b>	<b>2-1</b>
2.1	Protocols .....	2-1
2.2	Security .....	2-1
2.3	Additional Features .....	2-1
<b>3</b>	<b>Typical Applications .....</b>	<b>3-1</b>
<b>4</b>	<b>Connector Pin Description .....</b>	<b>4-1</b>
4.1	Pin Numbers.....	4-1
4.2	J8 Pin Functional Description.....	4-2
4.3	J9 Pin Functional Description.....	4-2
<b>5</b>	<b>Interfaces.....</b>	<b>5-1</b>
5.1	J8 Serial Interface .....	5-1
5.2	J9 SPI Interface.....	5-1
5.3	J9 USB Interface .....	5-1
<b>6</b>	<b>Electrical Specifications .....</b>	<b>6-2</b>
6.1	Absolute Maximum Ratings .....	6-2
6.2	DC Operating Characteristics .....	6-2
6.3	AC Operating Characteristics.....	6-3
<b>7</b>	<b>Mechanical Dimensions.....</b>	<b>7-4</b>
<b>8</b>	<b>Evaluation Board .....</b>	<b>8-1</b>
<b>9</b>	<b>Ordering Information .....</b>	<b>9-1</b>
<b>10</b>	<b>Internet Protocol Compliance .....</b>	<b>10-1</b>

## Figures

Figure 3-4-1: Pin-out for Nano SocketLAN (Bottom View) .....	4-1
Figure 6-1: SPI Interface Waveforms.....	6-3
Figure 5-7-1: Mechanical Dimensions .....	7-4

## Tables

<b>Table 3-1: J8 Connector Signal Description .....</b>	<b>4-2</b>
<b>Table 4-1: Absolute Maximum Ratings.....</b>	<b>6-2</b>
<b>Table 4-2: DC Operating Characteristics .....</b>	<b>6-2</b>
<b>Table 10-1: Internet Protocol Compliance.....</b>	<b>10-1</b>

# 1 Introduction

## 1.1 General Description

Nano SocketLAN™ is a secure serial-to-LAN device server module that also acts as a bridge to connect serial devices to 10/100 Mbit Ethernet LANs. It includes the iChip™ CO2144 IP Communication Controller™ chip and a 10/100BaseT Ethernet PHY. The Nano SocketLAN is packaged in a RoHS-compliant compact form factor and uses a simple header connector for easy assembly or soldering.

The Nano Socket LAN is Pin compatible with the Nano Socket iWiFi, allowing customers to design a single PCB for an easy switch between LAN and WiFi.

Nano SocketLAN offers much more than many other device servers on the market. It acts as a security gap between the application and the network; supports up to 10 simultaneous TCP/UDP sockets; two listening sockets; a web server with two websites; SMTP and POP3 clients; MIME attachments; FTP and TELNET clients, SerialNET™ mode for serial-to-IP bridging, and many more features.

Nano SocketLAN supports the SSL3/TLS1 protocol for secure sockets, HTTPS and FTPS.

Nano SocketLAN minimizes the need to redesign the host device hardware. It easily inserts into headers on the host PCB and includes an onboard RJ45 connector. Minimal or no software configuration is needed for Nano SocketLAN to access the LAN.

Connect One's high-level AT+i™ API eliminates the need to add security and networking protocols and tasks to the host application. The AT+i SerialNET operating mode offers a true plug-and-play mode that eliminates any changes to the host application.

Nano SocketLAN firmware – the IP stack and Internet configuration parameters – are stored in an on-board flash memory. The module is power-efficient: the core operates at 1.2V, while I/Os operate at 3.3V.

The II-EVB-363MS evaluation board provides an easy environment for testing the Nano SocketLAN prior to designing it into your product.

## 1.2 Hardware Description

Size: 38.9 x 24.88 x 20.9 mm

Core CPU: Connect One CO2144, low-leakage, 0.13 micron, clocked at 48MHz

Operating Voltage: +3.3V±10%

Operating Humidity: 90% maximum (non-condensing)

Operating Temperature Range: -40° to 85°C (-40° to 185°F)

Power Consumption: 130mA (typical)  
30mA (PHY shutdown)

Connector: 2 x 10 pin header 2mm pitch

Host Interface: TTL Serial, SPI and USB device.

10/100BaseT Ethernet

RoHS-compliant; lead-free

## 1.3 Performance Specifications

Host Data Rate/Effective TCP throughput:

- Serial mode: 3Mbps / 3Mbps
- SPI mode: 24Mbps / 5Mbps
- USB mode: 12Mbps / 500Kbps

Serial Data Format (AT+i mode):

Asynchronous character; binary; 8 data bits; no parity; 1 stop bit

SerialNET mode: Asynchronous character; binary; 7 or 8 data bits; odd, even, or no parity; 1, 1.5, or 2 stop bits

Flow Control: Hardware (-RTS, -CTS), software flow control or None.

**Internet Protocols**

ARP, ICMP, IP, UDP, TCP, DHCP, DNS,  
NTP, SMTP, POP3, MIME, HTTP, FTP  
and TELNET

**Security Protocols**

SSL3/TLS1, HTTPS, FTPS, RSA,  
AES-128/256, 3DES, RC-4, SHA-1, MD-5,  
MD-2

**Protocols Accelerated in HW**

AES, 3DES and SHA

**Application Program Interface**

Connect One's AT+i protocol  
SerialNET mode for transparent serial  
data-to-Internet bridging

**Warranty**

One year

**Installation Requirements**

The Nano SocketLAN must be installed  
within a full-enclosure device that is safety  
certified.

## 2 Features

### 2.1 Protocols

- Up to 10 simultaneous TCP/UDP sockets and two listening sockets
- HTTP/HTTPS client
- HTTP/HTTPS web server with two on-chip websites: Configuration site and Application site
- FTP and TELNET clients
- DHCP client and server
- PPP Host Interface
- Sending and receiving textual email and binary email with MIME attachments

### 2.2 Security

- Acts as a security gap between the host application and the network
- One secure SSL3/TLS1 socket
- Supports multiple Certificate Authorities and both client-side and server-side authentication
- Secure FTP (over SSL3) and HTTPS clients
- Includes a true hardware random number generator
- AES, 3DES and SHA accelerated in hardware

### 2.3 Additional Features

- Non-volatile, on-chip operational parameter database
- SerialNET mode for serial-to-IP bridging (port server mode)
- Local firmware update via host interface
- Remote configuration and firmware update over the Internet
- Retrieval of time data from a Network Time Server

*Note:* For a detailed description of all available features, see the *AT+i Programmer's Manual*.

## 3 Typical Applications

- Add IP communications over LAN to serial embedded devices.
- Seamlessly replace a dialup or cellular connection with a LAN connection.
- Add SSL security to M2M solutions.
- Pin compatible with the Nano Socket iWiFi allowing an easy switch between LAN and WiFi.

Nano SocketLAN supports several operational modes:

- **SerialNet™ Serial to LAN Bridge** - allowing transparent bridging of Serial or USB over LAN, using a 3Mbps fast UART. This is a true plug-and-play mode that eliminates any changes to the host application.
- **PPP modem emulation** – allowing existing (i.e. modem) designs currently using PPP to connect transparently over LAN.
- **Full Internet Controller mode** – allowing simple MCU to use the Nano SocketLAN's rich protocol and application capabilities to perform complex Internet operations such as E-mail, FTP, SSL, embedded Web server and others. It also acts as a firewall, providing a security gap between the application and the network.
- **Embedded IP Routing** - allowing a single Nano SocketLAN to route data between multiple LAN clients over a single Dialup/Cellular connection (note: SPI must be used as host interface).



## 4 Connector Pin Description

The Nano SocketLAN module includes the iChip CO2144 IP Communication Controller and 10/100 Ethernet PHY with magnetics mounted on a socket form-factor module. Two 10pin headers (J8 and J9) provide Serial, USB or SPI host interfaces and mechanical reinforcement. The module may be soldered or plugged into mating Female headers.

### 4.1 Pin Numbers

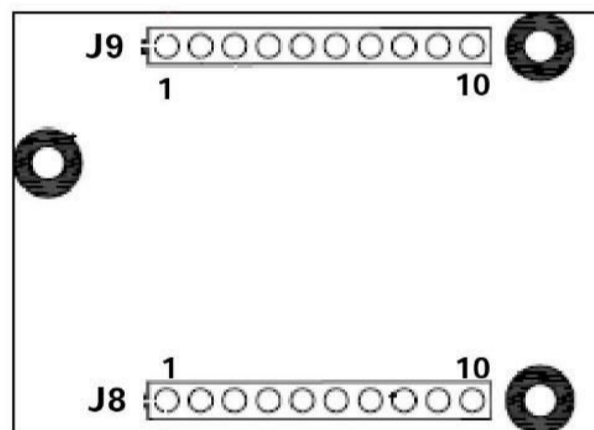


Figure 3-4-1: Pin-out for Nano SocketLAN (Bottom View)

**Connector:** 2 x 10pin Header Male 2mm pitch

**Mate with:** 2 x 10pin Header Female 2mm pitch:

Samtec	# SQT-110-01-F-S
Morethanall	# S-D63-1x10-LF
Weitronic	# 136-1010-10-10-60
or compatible.	

## 4.2 J8 Pin Functional Description

Pin	Signal	type	Description
1	GND	Power	
2	V <sub>DD</sub>	Power	
3	RXD0	Input	UART 0 receive
4	TXD0	Output	UART 0 transmit
5	nCTS0	Input	UART 0 clear to send
6	nRTS0	Output	UART 0 request to send
7	DATA_RDY	Output	Data ready <sup>1</sup>
8	MSEL	Input	Mode select <sup>2</sup>
9	nRESET	Input	Reset Module. At Least 10mSec pulse
10	ACT_LINK	Output	LAN Link LED indicator

Table 3-1: J8 Connector Signal Description

## 4.3 J9 Pin Functional Description

Pin	Signal	type	Description
1	nSPI1_CS	Input	SPI 1 chip select for host
2	SPI1_CLK	Input	SPI 1 clock for host (Max 12MHz)
3	SPI1_MISO	Output	SPI 1 slave out for host master in
4	SPI1_MOSI	Input	SPI 1 slave in for host master out
5	SPI1_INT	Output	SPI 1 have data on his buffer
6	Readiness	Output	iChip Ready <sup>3</sup>
7	DDM	Analog	USB device negative
8	DDP	Analog	USB device positive
9	SPEED	Output	Speed LED indicator. "0" - 100M ; "1" -10M
10	GND	Power	

Table 3-2: J9 Connector Signal Description

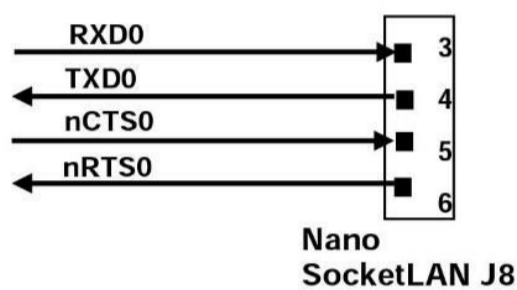
<sup>1</sup> Indicates new network data is waiting to be read. Details in status report AT+iRP7.  
May be left unconnected.

<sup>2</sup> Enables Rescue Mode / Firmware Update / Force User-profile. May be left unconnected.

<sup>3</sup> Indicates that the boot sequence has completed. May be left unconnected

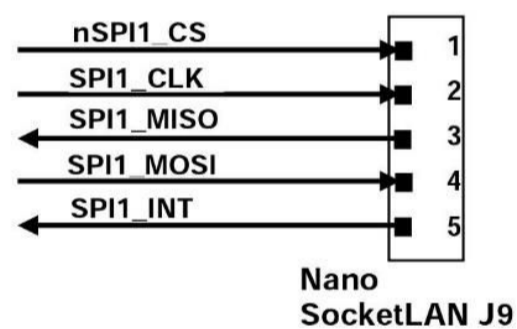
## 5 Interfaces

### 5.1 J8 Serial Interface



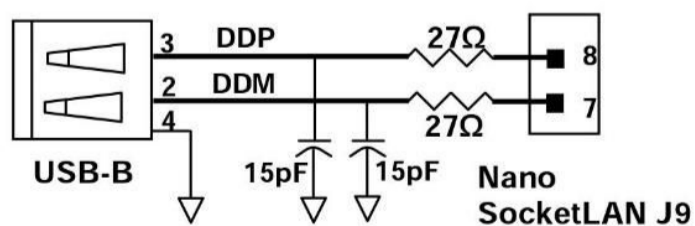
Note: If UART is not used leave TXD0 and RXD0 N.C. and short nCTS0 to nRTS0

### 5.2 J9 SPI Interface



Note: If SPI is not used leave all signals N.C.

### 5.3 J9 USB Interface



Note: If USB is not used leave all signals N.C.

## 6 Electrical Specifications

### 6.1 Absolute Maximum Ratings

Parameter	Rating
<b>Voltage at any pin with respect to ground</b>	-0.3V to +3.6V
<b>Operating temperature</b>	-40°C to 85°C (-40°F to 185°F)
<b>Storage temperature</b>	-65°C to 125°C (-85°F to 257°F)

Table 4-1: Absolute Maximum Ratings

### 6.2 DC Operating Characteristics

Parameter	Min	Typical	Max	Units
VDD	3.0	3.3	3.6	Volts
High-level Input	2.0		VDD I/O+0.3	Volts
Low-level Input	-0.3		0.8	Volts
High-level Output @2mA	VDD I/O-0.4			Volts
High-level Output @0mA	VDD I/O-0.2			Volts
Low-level Output @2mA			0.4	Volts
Low-level Output @0mA			0.2	Volts
Input leakage current			10	μA
Power supply current from VDD		130	170	mA
Power supply current when Ethernet PHY is shut down		30		mA
Input Capacitance			5.3	pF

Table 4-2: DC Operating Characteristics

(\*) Note: Power supply current as measured in firmware version i2128d804B05.

### 6.3 AC Operating Characteristics

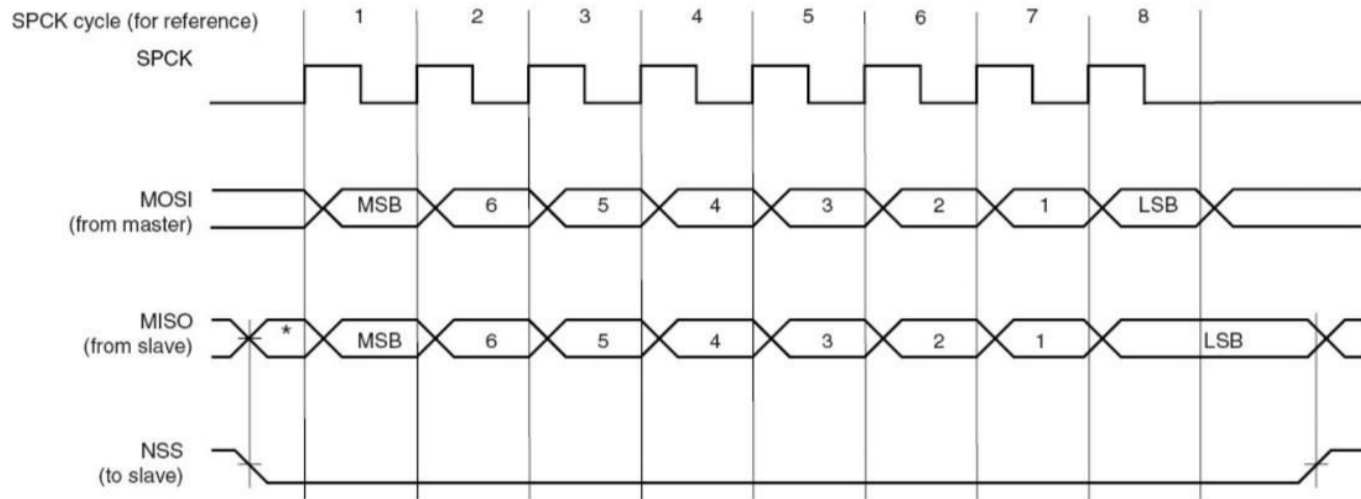
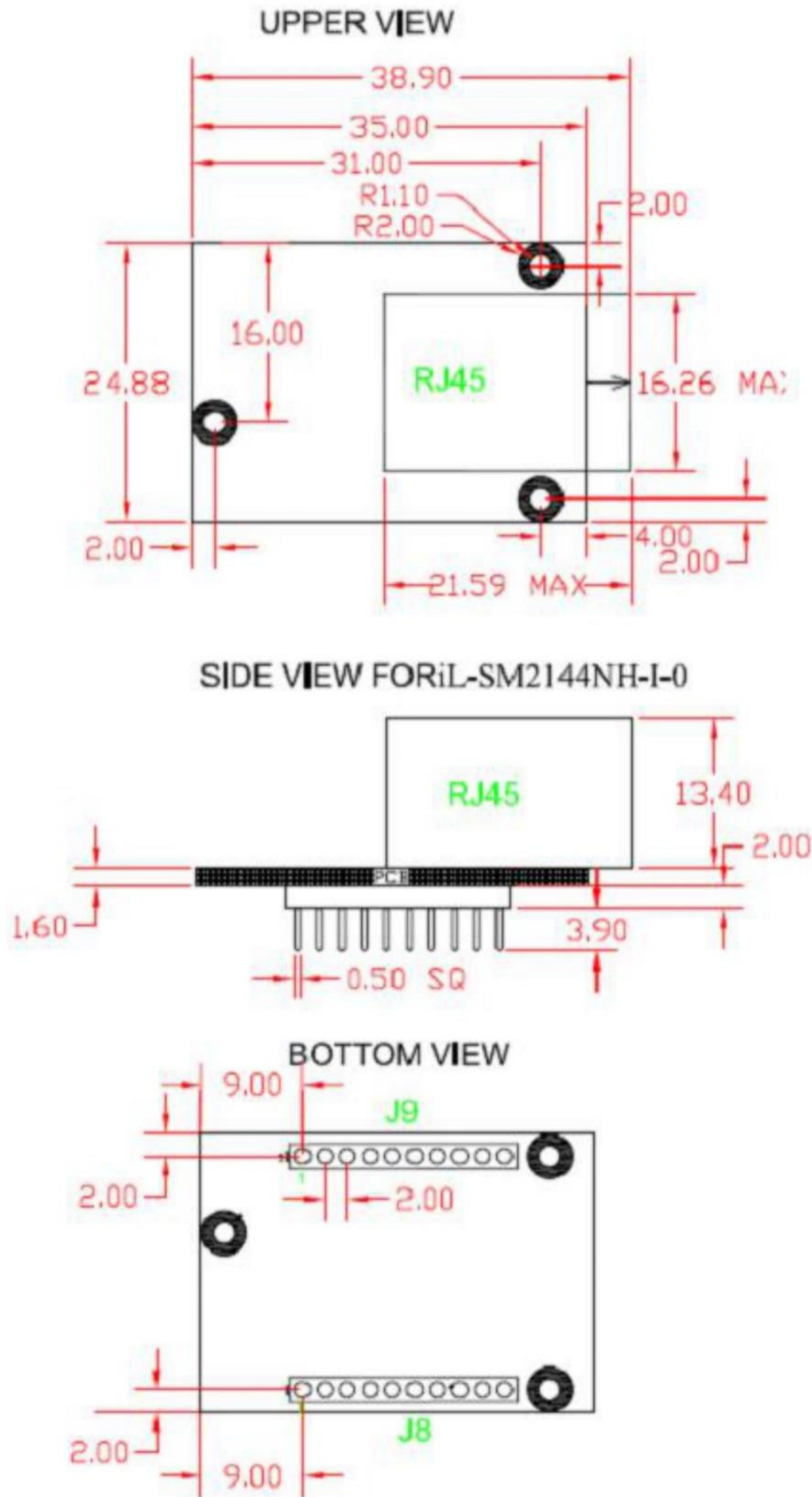


Figure 6-1: SPI Interface Waveforms

## 7 Mechanical Dimensions



**Note:** All measures are in millimeters

Figure 5-7-1: Mechanical Dimensions

## 8 Evaluation Board

The II-EVB-363-MS evaluation board enables you to evaluate the Nano SocketLAN without changing anything in your current development environment. Using a simple Windows-based application on a PC, you can issue AT+i commands to the iChip CO2144 and get responses.

*Note: The evaluation board supports serial host data rates of up to 1Mbps.*

---

AT+i commands are used to configure parameter values into iChip's flash memory and activate Internet tasks such as email send, sockets, FTP sessions, configuration, and more.

A full description of AT+i commands can be found in the *AT+i Programmer's Manual* on Connect One's website at:  
<http://www.connectone.com/support.asp?did=35>

To help you evaluate the Nano SocketLAN, Connect One supplies the iChipConfig Utility. This is a Windows-based application that contains intuitive dialog boxes to fully configure iChip CO2144. It doesn't require any knowledge of AT+i commands. It also contains local firmware update functionality. The iChipConfig Utility allows you to perform specific Internet communication tasks such as sending and receiving emails, activating iChip's websites, entering SerialNET mode, and more. The latest iChipConfig Utility version and user manual can be found on Connect One's website under the Support section.

On board connectors allow a choice of Host interfaces:

- RS232 COM port
- SPI
- USB

## 9 Ordering Information

Ordering Information	
Part Number	Description
iL-SM2144NH-I	Nano SocketLAN module, 2x10 pin header connector
II-EVB-363MS-US-110/220	Evaluation board for Nano SocketLAN. Includes Nano SocketLAN attached to a motherboard's 2x10 pin header connector. The main board includes one male-female RS-232 DB-9 connector for high speed USART, RJ-45, USB, SPI and DC power connector. Specify 110V or 220V power supply. RoHS.



## 10 Internet Protocol Compliance

Nano SocketLAN complies with the Internet standards listed in the following table.

RFC 768	User datagram protocol (UDP)
RFC 791	Internet protocol (IP)
RFC 792	ICMP – Internet control message protocol
RFC 793	Transmission control protocol (TCP)
RFC 821	Simple mail transfer protocol (SMTP)
RFC 822	Standard for the format of ARPA Internet text messages
RFC 826	Ethernet address resolution protocol (ARP)
RFC 959	File transfer protocol (FTP)
RFC 854	TELNET protocol specification
RFC 857	Telnet ECHO option
RFC 858	Telnet suppress go-ahead option
RFC 1034	Domain names (DNS) - concepts and facilities
RFC 1035	Domain names (DNS) - implementation and specification
RFC 1073	Telnet window size option
RFC 1091	Telnet terminal type option
RFC 1321	MD5 message digest algorithm
RFC 1939	Post office protocol - version 3 (POP3)
RFC 1957	Some observations on the implementations of the post office protocol (POP3)
RFC 2030	Simple network time protocol (SNTP)
RFC 2045	Multipurpose Internet mail extensions (MIME) part one: internet message body format
RFC 2046	MIME part two: media types
RFC 2047	MIME part three: message header extensions for non-ASCII text
RFC 2048	MIME part four: registration procedures
RFC 2049	MIME part five: conformance criteria and examples
RFC 2068	Hypertext transfer protocol HTTP/1.1
RFC 2131	Dynamic host configuration protocol (DHCP)
RFC 2132	DHCP options (only relevant parts)
RFC 2228	FTP security extensions
RFC 2246	The TLS protocol version 1.0

*Table 10-1: Internet Protocol Compliance*