

Caracterización regional de la calidad del agua subterránea y superficial en el Departamento de El Paraíso, Honduras

**Ana Carolina Ramos Velásquez
Luis Fernando Andino Galeano**

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2011

ZAMORANO
CARRERA DE DESARROLLO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTE

Caracterización regional de la calidad del agua subterránea y superficial en el Departamento de El Paraíso, Honduras

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingenieros en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Ana Carolina Ramos Velásquez
Luis Fernando Andino Galeano**

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2011

Caracterización regional de la calidad del agua subterránea y superficial en el Departamento de El Paraíso, Honduras

Presentado por:

Ana Carolina Ramos Velásquez
Luis Fernando Andino Galeano

Aprobado:

Erika Tenorio, M.Sc.
Asesora principal

Arie Sanders, M.Sc.
Director
Carrera de Desarrollo
Socioeconómico y Ambiente

Arie Sanders, M.Sc.
Asesor

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

RESUMEN

Ramos, A; Andino, L. 2011. Caracterización regional de la calidad del agua subterránea y superficial en el Departamento de El Paraíso, Honduras. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 41 p.

La contaminación del agua es uno de los factores que restringe el acceso y la disponibilidad de fuentes de agua potable a las poblaciones. El estudio se realizó con el objetivo de caracterizar la calidad del agua subterránea que es fuente de agua para consumo humano y el agua superficial tomando en cuenta condiciones óptimas para el mantenimiento de la vida acuática en el Departamento de El Paraíso, Honduras. Los indicadores de calidad analizados fueron, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, alcalinidad, dureza, color, nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$), ortofosfatos (PO_4^{3-}), bacterias coliformes termotolerantes y no coliformes. Se realizaron dos muestreos en diciembre de 2010, junio y agosto de 2011 en 27 pozos perforados y un muestreo en siete ríos de la región. Se adaptó un índice de calidad de agua (ICA) para integrar los parámetros, el cual considera la frecuencia, alcance y magnitud de los parámetros que incumplen los estándares establecidos para los diferentes usos. Se evaluó cada pozo para determinar su aptitud para consumo humano. No hubo diferencias significativas entre los valores encontrados de los parámetros analizados entre muestreos. Se categorizó la calidad de agua de los pozos como marginal y media en 67 % de los casos, el agua superficial se categorizó entre calidad marginal y buena en todos los sitios muestreados. Los parámetros que más incidieron negativamente a la calidad de agua fueron bacterias no coliformes, conductividad eléctrica, dureza y turbidez en el agua subterránea; y bacterias no coliformes, turbidez y color verdadero en el agua superficial.

Palabras clave: Agua potable, índice de calidad de agua, norma de calidad de agua, pozos, ríos.

CONTENIDO

	Portadilla.....	i
	Página de firmas	ii
	Resumen	iii
	Contenido.....	iv
	Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
1	INTRODUCCIÓN	3
2	MATERIALES Y MÉTODOS	3
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	8
4	CONCLUSIONES	17
5	RECOMENDACIONES	19
6	LITERATURA CITADA	20
7	ANEXOS.....	24

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Parámetros analizados en el agua subterránea y superficial.....	5
2. Resultados de la prueba de rangos de Wilcoxon.	8
3. Valores medios y recomendados de los parámetros analizados.....	9
4. Número de pozos en cada categoría de calidad de agua.	14
Figuras	Página
1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de agua subterránea y superficial en el Departamento de El Paraíso, Honduras	4
2. Índice de calidad de agua en los pozos estudiados en el Departamento de El Paraíso, Honduras.....	13
3. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de agua subterránea por categoría de calidad.....	15
4. Índice de calidad de agua superficial en el Departamento de El Paraíso. Honduras..	16
5. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de agua superficial por categoría de calidad.....	17
Anexos	Página
1. Cuadro de valores recomendados para calidad de agua potable.	24
2. Cuadro de valores recomendados para calidad de agua para vida acuática.	25
3. Índice de calidad de agua subterránea del departamento de El Paraíso.	26
4. Cuadro de índice de calidad de agua superficial del departamento de El Paraíso. ...	27
5. Análisis de estadísticos descriptivos de parámetros para agua superficial.....	27
6. Análisis de estadísticos descriptivos de parámetros de agua subterránea.	28
7. Prueba de los Rangos con signos de Wilcoxon.	29
8. Resultados estadísticos de los rangos de Wilcoxon	32
9. Valor de índice de calidad de agua por muestreo de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	33

10. Valores de potencial de hidrógeno (pH) del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	33
11. Valores de conductividad eléctrica (CE) del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	34
12. Concentración de sólidos totales disueltos en el agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	34
13. Concentración de alcalinidad del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	35
14. Concentración de dureza del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso. ...	35
15. Valores de turbidez del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	35
16. Valor de color verdadero del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso. ...	36
17. Concentración de nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$) del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	36
18. Concentración de ortofosfatos (PO_4^{3-}) del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	37
19. Valor de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	37
20. Conteo de bacterias no coliformes en 100 ml de agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	38
21. Conteo de bacterias coliformes termotolerantes en 100 ml de agua de 27 pozos en el departamento de El Paraíso.	38
22. Mapa de calidad de agua y ubicación geográfica del primer muestreo de agua subterránea.	39
23. Mapa de calidad de agua y ubicación geográfica del segundo muestreo de agua subterránea.	40
24. Fotografía del sitio de muestreo en el pozo Eben Ezer.	40
25. Fotografía del sitio de muestreo en el pozo San Cristóbal.	41
26. Fotografía del sitio de muestreo en el Río del Hato.	41

1. INTRODUCCIÓN

En Centroamérica la disponibilidad del agua está restringida por su calidad, la estacionalidad de la precipitación y la distribución de la población (Ballestero *et al.* 2007). En Honduras la estacionalidad de la precipitación produce cambios en la calidad del agua en las fuentes naturales (Bailarón *et al.* 2004). En la época lluviosa se producen los mayores disturbios en la calidad de agua de las fuentes superficiales, lo cual se traduce en mayores niveles de turbidez y sedimentación causados por la erosión y el arrastre de suelo (Ballestero *et al.* 2007). Por otro lado, durante la época seca el caudal natural de los ríos es relativamente bajo y aumentan las concentraciones de los contaminantes de aguas residuales domésticas e industriales (Cardona 2003).

La contaminación del agua proviene de fuentes puntuales y no puntuales o difusas (Sánchez 2000). Según Ongley (1997) los contaminantes no puntuales son el principal origen de la contaminación fecal en las aguas superficiales de los países en desarrollo. El agua contaminada por excremento de humanos o animales puede ser fuente de organismos patógenos tales como bacterias, virus, protozoos y helmintos (OMS 2006). Otra causa de contaminación en aguas superficiales es el exceso de fertilización de cultivos agrícolas que provocan eutrofización en los cuerpos de aguas (Nishio 2002). Las aguas superficiales son más susceptibles a la contaminación que las aguas subterráneas. Sin embargo, la contaminación de las aguas subterráneas es más difícil de remover cuando ésta ya ha ocurrido, debido a que el tiempo de renovación del agua en el subsuelo puede tardar decenas de años (Ureña 2004). La calidad de las aguas subterráneas puede ser afectada por vertederos municipales, depósitos de chatarra y aguas residuales domésticas. Éstas últimas contienen compuestos químicos orgánicos solubles que se infiltran hacia la capa freática a través de fosas sépticas, pozos negros y líneas de fuga de alcantarillado (Ward 1985).

Debido a la diversidad de elementos que puede transportar el agua, se debe prestar particular atención al agua que se destina para consumo humano. En el 2000 se reportaron aproximadamente 2.2 millones de muertes a causa de diarreas relacionadas a la falta de sistemas de saneamiento e higiene del agua de consumo (UNESCO 2003). Para fines de consumo humano el agua debe ser inocua, es decir, que no ocasione ningún riesgo significativo para la salud personal al ser consumida a lo largo de la vida de las personas (OMS 2006).

La calidad del agua se mide a través de parámetros que la caracterizan física, química, biológica y radiológicamente (Anaya y Martínez 2007). Los parámetros de calidad de agua son muy diversos y permiten detectar el grado de contaminación o pureza del agua y

determinan si es apta para los diferentes usos. Con el objetivo de expresar los datos de calidad de agua de manera más resumida y comprensible, desde la década de los años 70 se han elaborado índices de calidad de agua (ICA). Dichos índices agrupan los registros iniciales de los parámetros analizados (Saeedi 2009) para proporcionar información de fácil interpretación a diferentes audiencias. Inicialmente los ICA fueron desarrollados para los ríos de Estados Unidos, pero posteriormente fueron validados y empleados en distintos estudios a nivel mundial. Previamente se desarrolló un ICA el cual tiene como base los diferentes usos que se le puede dar al agua, entre ellos el consumo humano e incluye parámetros físico-químicos relacionados con el nivel del riesgo sanitario en dicho líquido (Torres *et al.* 2010).

La calidad del agua limita su uso y esta situación es más crítica en regiones donde el abastecimiento de agua potable no ha sido cubierto en su totalidad. En el 2001 el 18 % de la población de Honduras no contaba con acceso a agua potable, situación que afecta mayormente al área rural (27 % de la población). En el 2002 en los municipios de Danlí y El Paraíso, el 31 % y el 23 % de la población respectivamente, no contaba con acceso a agua potable (INE 2002). Debido a la carencia de fuentes superficiales e infraestructura adecuada de abastecimiento de agua en el Departamento de El Paraíso, la perforación y extracción de agua subterránea se ha convertido en una alternativa para mejorar las condiciones de vida de las personas en ésta zona. Sin embargo, a la fecha se carece de información sobre la calidad del agua que actualmente que se consume en este departamento. El presente estudio se enfoca en caracterizar la calidad del agua subterránea y superficial del Departamento de El Paraíso, conocer las diferencias de los parámetros en diferentes épocas del año y adaptar, con los valores encontrados, un índice de calidad de agua subterránea con fines de consumo humano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Departamento de El Paraíso en la zona oriental de Honduras. El análisis de la calidad del agua subterránea incluyó 27 pozos que fueron perforados por la Fundación Texas Water Mission en los municipios de Danlí, El Paraíso, Morocelí, San Matías, Jacaleapa y Yuscarán. Se realizaron ocho muestreos de agua superficial en los ríos que se encuentran en las proximidades de los pozos de los municipios mencionados con el propósito de analizar las condiciones del agua superficial en el área de estudio. Los muestreos se llevaron a cabo en dos ocasiones para cada sitio seleccionado con el objetivo de obtener datos en diferentes épocas del año. La primera ronda de muestreos se realizó en diciembre del 2010 y junio del 2011. La precipitación total en dichos meses fue de 3.6 y 146.4 mm respectivamente. La segunda ronda se realizó en agosto del 2011 cuando se registraron 113.8 mm de precipitación (EAP 2011). La selección de los parámetros de calidad de agua a analizar se basó en su importancia como indicadores de contaminación, de amenaza a la salud humana, las características de la zona y la disponibilidad de equipo y materiales para su análisis.

Un receptor GPS marca Garmin® modelo Etrex Legend y el programa ArcGIS 9® se utilizó para la ubicación de los sitios de muestreo y para desarrollar un mapa que facilitara conocer la distribución de los puntos de muestreo y las características regionales del agua subterránea (Figura 1). Se generaron mapas de calidad de agua subterránea para cada uno de los muestreos y uno que aglomera todos los resultados obtenidos.

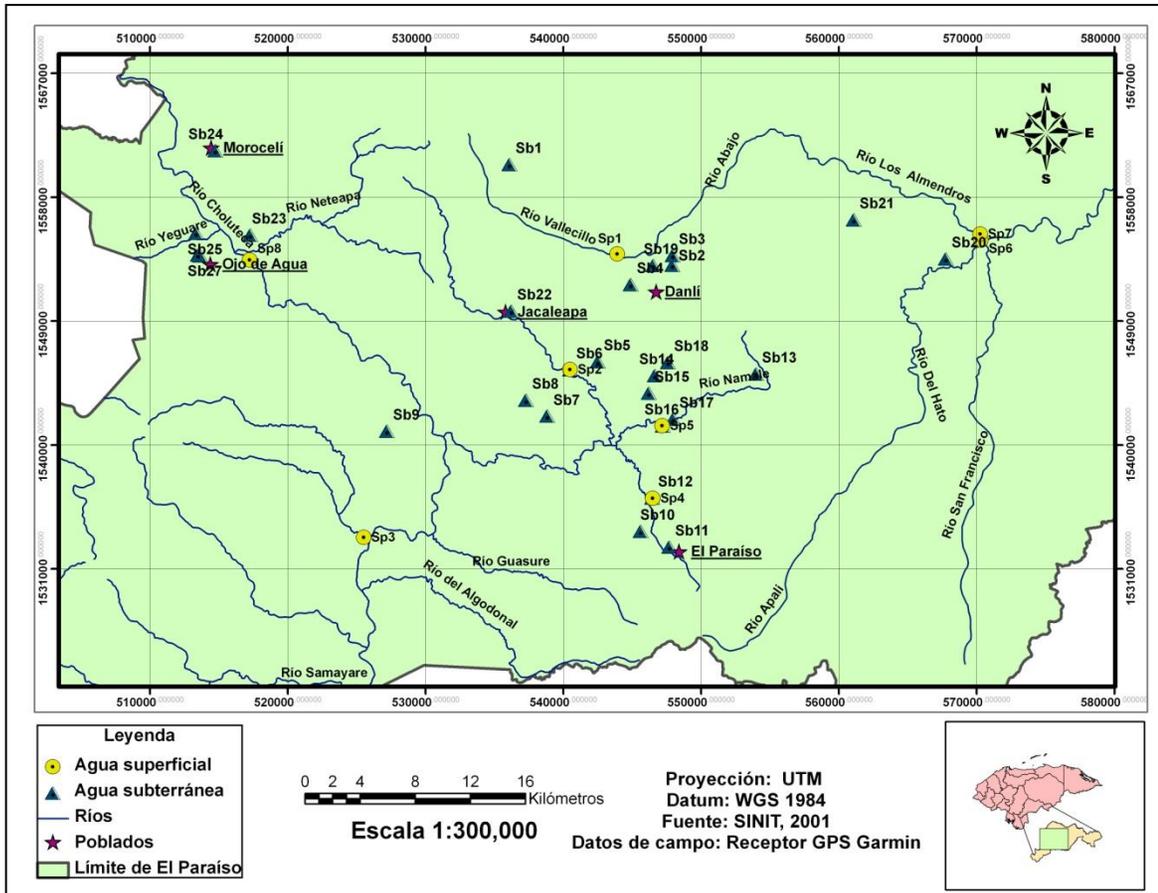


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de agua subterránea y superficial en el Departamento de El Paraíso, Honduras.

Los parámetros físico-químicos (conductividad eléctrica, temperatura, potencial de hidrógeno, turbidez y sólidos totales disueltos) se midieron *in situ*, adicionalmente se recolectaron 1,500 ml por muestra en frascos de polietileno de alta densidad de 500 ml para realizar los análisis en el laboratorio. Durante su transporte hacia el laboratorio, se preservaron por un máximo de 6 horas a temperatura constante de 4 °C. La conductividad eléctrica (micro Siemens por centímetro), temperatura (°C) y potencial de hidrógeno (pH) fueron medidos electroquímicamente con un medidor multi-parámetros de electrodos marca Oakton®. La turbidez fue medida con un turbidímetro marca La Motte y reportada en unidades nefelométricas de turbidez (UNT). Para medir los sólidos disueltos totales (mg L^{-1}) se utilizó un medidor de electrodos marca HM®.

Los nitratos reportados en $\text{NO}_3^{-2}\text{-N}$ (mg L^{-1}) y fosfatos como ortofosfatos PO_4^{-3} (mg L^{-1}) fueron medidos en el laboratorio de calidad de agua CDSEA-Zamorano, con un colorímetro HACH® DR/ 8200. El método empleado para la medición de este parámetro fue el de reducción de cadmio, para nitratos de rango bajo ($0\text{-}0.5 \text{ mg L}^{-1}$ de $\text{NO}_3^{-2}\text{-N}$), de rango medio ($0\text{-}5 \text{ mg L}^{-1}$ de $\text{NO}_3^{-2}\text{-N}$) y de rango alto ($0\text{-}30.0 \text{ mg L}^{-1}$ de $\text{NO}_3^{-2}\text{-N}$). Los fosfatos fueron medidos como ortofosfatos (PO_4^{-3}) por el método de ácido ascórbico para concentraciones de $0\text{ a }2.50 \text{ mg L}^{-1}$ de PO_4^{-3} (HACH 1999).

El oxígeno disuelto inicial se calculó el día de la toma de la muestra en el laboratorio para evitar pérdidas de oxígeno. Este dato se tomó para la preparación del análisis de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) para el cual se utilizó el método de DBO de cinco días. Se determinó la concentración inicial y final con la prueba Winkler para oxígeno disuelto de alto rango, pero se ejecutaron con dos métodos diferentes en los distintos muestreos. En el primer muestreo se utilizaron ampollas AccuVac (0- 15 mg L⁻¹ O₂) con el colorímetro HACH® DR/8200. (HACH 2000). En el segundo muestreo se calculó el oxígeno de alto rango (0-20 mg L⁻¹ O₂) con el kit de oxígeno disuelto HACH para titulación con ácido etilen-diamino-tetraacético (EDTA por sus siglas en inglés) (HACH 2006).

Para determinar el color verdadero se filtró la muestra previamente al análisis para utilizar el método estándar de platino-cobalto con el colorímetro HACH® DR/8200 (HACH 1999). La medición de alcalinidad se realizó con el método de fenolftaleína y alcalinidad total del titulador digital HACH que mide concentraciones de 10 a 4,000 mg L⁻¹ como carbonato de calcio (CaCO₃). Mediante el análisis de alcalinidad se estima el contenido de hidróxidos: Al(OH)₃, Fe(OH)₃, LiOH, Cr(OH)₃, bicarbonatos (NaHCO₃) y carbonatos tales como CaCO₃, MgCO₃, FeCO₃. La dureza fue calculada con la prueba de dureza total, que cuantifica la suma de calcio y magnesio. Las cantidades de EDTA se midieron con la tituladora digital marca HACH® (HACH 1999). En el segundo muestro se calculó dureza total con el método de titulación EDTA con reactivos marca La Motte con resultados reportados en mg L⁻¹ como CaCO₃.

El análisis bacteriológico se realizó el día de la recolección de la muestra para evitar su deterioro y contaminación. La determinación de bacterias no coliformes y coliformes termotolerantes se realizó mediante el uso de membranas de acetato de celulosa estériles y m-ColiBlue24® como medio de cultivo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros analizados en el agua subterránea y superficial.

Parámetro	Unidades	Método utilizado
Coliformes termotolerantes	UFC/100 ml	Filtración de membrana
Coliformes no termotolerantes	UFC/100 ml	Filtración de membrana
Potencial de hidrogeno	--	Electroquímico
Conductividad eléctrica	µS/cm	Electroquímico
Oxígeno disuelto	mg L ⁻¹ y %	Electroquímico y prueba Winkler
Demanda bioquímica de oxígeno	mg L ⁻¹ de O ₂	DBO ₅ con prueba Winkler
Temperatura	°C	Electroquímico (agua superficial)
Nitratos NO ₃ -N	mg L ⁻¹	Reducción de cadmio
Ortofosfatos PO ₄ ⁻³	mg L ⁻¹	Acido Ascórbico
Turbidez	UNT	Nefelométrico
Solidos totales disueltos	mg L ⁻¹	Electroquímico
Alcalinidad	mg L ⁻¹ como CaCO ₃	Fenolftaleína y alcalinidad total
Dureza	mg L ⁻¹ como CaCO ₃	Prueba calmagita de dureza total
Color Verdadero	Pt-Co	Estándar platino cobalto

Nota: UFC: Unidades formadoras de colonias; UNT: Unidades nefelométricas de turbidez; Pt-Co: Proporción platino-cobalto; µS/cm: micro-Siemens por centímetro

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para el agua superficial y subterránea el cual compara la media, desviación estándar y la varianza de las muestras de cada parámetro. Dentro del agua subterránea se realizó una prueba de rangos Wilcoxon para determinar y comparar las diferencias por parámetro entre muestreos. Dichos análisis estadísticos se realizaron con el “Statistical Package for the Social Sciences” (SPSS versión 17.0®).

El índice de calidad de agua (ICA) realizado en este estudio se basa en el Índice de Calidad de Agua Canadiense (CWQI, por sus siglas en inglés) aprobado por el Consejo Canadiense de Manejo de Medio Ambiente (UNEP 2005). El Sistema Mundial de Monitoreo del Medio Ambiente y el Programa de Agua del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP GEMS, por sus siglas en inglés) adoptaron y utilizaron el modelo del CWQI para evaluar la calidad del agua potable a nivel mundial (UNEP 2007). El ICA toma en cuenta la frecuencia y la medida en que los parámetros no cumplen las normas establecidas y su ecuación general es:

$$ICA = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right) \quad [1]$$

El alcance (F_1) se refiere al porcentaje de parámetros que exceden la norma de calidad.

$$F_1 = \left(\frac{\# \text{ de parámetros fallidos}}{\# \text{ total de parámetros}} \right) \times 100 \quad [2]$$

La frecuencia (F_2) es el porcentaje de pruebas individuales dentro de cada parámetro que excede la norma de calidad.

$$F_2 = \left(\frac{\# \text{ de pruebas fallidas}}{\# \text{ total de pruebas}} \right) \times 100 \quad [3]$$

La amplitud (F_3) es la cantidad por la cual las normas no se cumplen y se calcula en tres etapas. Primero se calcula la excursión, o el grado por parámetro en el cual las pruebas fallidas exceden la norma.

$$\text{excursión} = \left(\frac{\text{valor de la prueba fallida}}{\text{valor del límite}} \right) - 1 \quad [4]$$

Luego, se realiza la suma normalizada de las excursiones.

$$\text{nse} = \left(\frac{\sum \text{excursión}}{\# \text{ total de pruebas}} \right) \quad [5]$$

Finalmente se calcula amplitud con una ecuación que tiene una escala de nse en un ámbito entre 1 y 100.

$$F_3 = \left(\frac{\text{nse}}{0.01\text{nse} + 0.01} \right) \quad [6]$$

El resultado final es un valor entre cero (mala calidad) y cien (óptima calidad), el cual determina la categoría de calidad que se le asigna a cada sitio. Las categorías de calidad definidas fueron: pobre (0-44), marginal (45-64), media (65-79), buena (80-94) y excelente (95-100) (UNEP 2007).

El ICA de agua subterránea se desarrolló con base en los límites y las recomendaciones establecidas para agua potable. Los parámetros indicadores de agua considerados fueron: bacterias no coliformes y bacterias termotolerantes, sólidos disueltos totales, conductividad, potencial de hidrógeno (pH), turbidez, nitratos, fosfatos, color, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), alcalinidad y dureza. Para determinar los límites máximos y mínimos admisibles se tomó como referencia la Norma Técnica para la Calidad de Agua Potable de Honduras, las guías para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano (MSP 1995; OMS 2006; Anaya y Martínez 2007). El límite establecido para coliformes fecales por la Norma Técnica para la Calidad de Agua Potable de Honduras es de cero unidades formadoras de colonia (UFC) en 100 ml de muestra, sin embargo, se utilizó un límite de 1 UFC/100 ml de muestra debido a que la ecuación 1 (excursión para calcular F_3) no permite valores de cero en su aplicación.

En el desarrollo del ICA de aguas superficiales se tomó en cuenta las recomendaciones y los límites ideales para la conservación de la vida acuática (CCME 2001). Los parámetros incluidos en el índice fueron: temperatura, potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto (mg L^{-1} y porcentaje de saturación), demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos disueltos totales, turbidez, color, nitratos y bacterias coliformes. Para establecer las recomendaciones y límites máximos y mínimos se consultó la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes de Colombia, las normas para prevenir la contaminación ambiental de Uruguay y el Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales de Costa Rica. La selección de estos parámetros se hizo tomando en cuenta la importancia de los parámetros y la disponibilidad de regulaciones establecidas para la vida acuática en países con características climáticas y de biodiversidad similares a las de Honduras.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Indicadores de calidad de agua subterránea. No hay diferencias significativas entre muestreos para cada parámetro, sin embargo, existieron pequeñas variaciones en algunos de ellos (Cuadro 2). Los parámetros en los que se determinó valores ligeramente superiores en el primer muestreo fueron el pH, conductividad eléctrica (CE), dureza, color, ortofosfatos, bacterias coliformes termotolerantes y bacterias no coliformes. Mientras que en la alcalinidad, turbidez y DBO se determinaron valores ligeramente superiores en el segundo muestreo.

Cuadro 2. Resultados de la prueba de rangos de Wilcoxon.

Parámetro	Tipo de rango	Valor p
Potencial de hidrógeno (pH)	Negativo	0.260
Sólidos totales disueltos (STD)	Igual	1.000
Conductividad eléctrica (CE)	Negativo	0.060
Alcalinidad	Positivo	0.323
Dureza total	Negativo	0.391
Turbidez	Positivo	0.605
Color verdadero	Negativo	0.307
Nitratos (NO ₃ -N)	Positivo	0.063
Ortofosfatos (PO ₄ ⁻³)	Negativo	0.057
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Positivo	0.133
Bacterias coliformes termotolerantes	Negativo	0.465
Bacterias no coliformes	Negativo	0.179

Los parámetros que incumplen con los valores recomendados para agua potable en los pozos muestreados son CE, dureza, y bacterias no coliformes; mientras que el pH, sólidos totales disueltos (STD) y nitratos cumplen en su mayoría los valores la normativa vigente (Cuadro 2). En cuanto a pH, el promedio de todos los pozos está dentro de los valores recomendados, esto es un buen indicador, ya que los valores bajos de pH afectan negativamente la salud de las personas, aumenta la corrosividad en los metales y disminuye la eficiencia de la desinfección del agua (OMS 2003).

Cuadro 3. Valores medios y recomendados de los parámetros analizados.

Parámetro	Media	Valores recomendados
Potencial de hidrógeno	6.97	6.5 - 8
Sólidos totales disueltos (mg L ⁻¹)	267	< 600
Conductividad eléctrica (mg L ⁻¹)	464	< 400
Alcalinidad (mg L ⁻¹ como CaCO ₃)	248	< 300
Dureza total (mg L ⁻¹ como CaCO ₃)	190	< 200
Turbidez (UNT)	22	< 5
Color verdadero (Pt-Co)	23	< 15
Nitratos NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	2.6	< 11
Ortofosfatos PO ₄ ⁻³ (mg L ⁻¹)	0.68	< 1
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg de O ₂ L ⁻¹)	0.5	< 1
Bacterias coliformes termotolerantes (UFC/100 ml)	1	0
Bacterias no coliformes (UFC/100 ml)	31	< 3

El valor recomendado de CE fue excedido en 59 % de los pozos. La tendencia de los valores de CE y SDT en este estudio es similar, esto se debe a que la CE es un indicador útil de STD debido a que la conducción de la corriente en una solución electrolítica y depende principalmente de la concentración de especies iónicas (Hayashi 2003). Los niveles recomendados de STD fueron cumplidos en 96 % de los pozos, el único caso que excedió los valores recomendados de SDT es el pozo Sb20, en el cual se determinó concentraciones mayores a los 1,200 mg L⁻¹. Uno de los efectos de altas concentraciones STD en agua potable es el sabor desagradable cuando las concentraciones de STD exceden los 600 mg L⁻¹ (Health Canada 1991).

Los valores recomendados para la alcalinidad del agua se cumplieron en 85 % de los pozos. Una causa de las fluctuaciones de alcalinidad, se debe a que este parámetro es afectado por el suelo y las rocas por las que el agua subterránea fluye. En el caso del pozo Sb20 (promedio de 1,448 mg L⁻¹ como CaCO₃) los altos niveles de alcalinidad pueden asociarse con altas concentraciones de STD y la dureza del agua, lo que puede causar la acumulación de sarro en los sistemas de fontanería. De igual manera, los valores bajos de alcalinidad pueden causar cambios en los niveles de pH y crear agua corrosiva, la cual puede conducir a la disolución de metales y dañar las tuberías de distribución de agua potable (Addy *et al.* 2003). En los pozos Sb21 al Sb27, cuya agua tiene valores menores a 100 mg L⁻¹ como CaCO₃ también se determinaron bajos valores de dureza y están ubicados en la misma zona, esto puede ser indicativo de una condición propia del acuífero.

Al igual que pH y alcalinidad, el agua dura puede afectar el sistema de distribución de agua, ya que causa un mayor consumo de jabón y provoca la formación de incrustaciones en el sistema. También los valores muy altos de dureza disminuye la aceptabilidad de sabor del agua y los valores muy bajos tienen un efecto corrosivo en el agua, la cual es dañina para la salud (OMS 2011). Los valores de dureza en el agua de los pozos no excedieron el valor máximo admisible para agua potable (200 mg L⁻¹ CaCO₃) en 56 % de

las muestras. Los altos valores de dureza en el agua de los pozos se deben principalmente a la presencia de calcio, debido a que el agua subterránea comúnmente tiene concentraciones de calcio mayores a 100 mg L^{-1} y que las concentraciones de magnesio en el agua subterránea son generalmente bajas (OMS 2011).

La claridad es de gran importancia para el agua de consumo humano, por su medida de probables impurezas o patógenos en el agua y sus indicadores son la turbidez y el color (Wilson 2010). Se encontró que un 59 % de los pozos muestreados cumplen con los valores recomendados de turbidez. Casos únicos en los que se determinaron los valores de turbidez altos como en los pozos Sb1, Sb2 y Sb9 (198, 234 y 211 UNT respectivamente) se debe a las condiciones de las estructuras de protección del pozo o problemas en las tuberías. El deterioro de las estructuras provoca infiltración de flujos preferenciales, los que transportan sustancias contaminantes hacia las aguas subterráneas a través del perfil del suelo, provocando deterioro de la calidad del agua en el subsuelo (Moral *et al.* 1996). Es recomendable que el valor de color verdadero sea menor a 15 unidades de platino cobalto (Pt-Co) (MSP 1995), lo que es cumplido en 70 % del agua de los pozos muestreados. Los valores elevados de color verdadero son más frecuente en aguas superficiales que en agua subterránea. En agua subterránea el color puede ser un indicador de tratamiento inadecuado de agua, contaminante en el subsuelo o presencia de agua superficial. La presencia de color en agua de consumo humano puede ser indirectamente vinculado a la salud por posibles contaminantes (NSE, 2008). El pozo Sb9 tiene valores promedios muy altos en turbidez y color (111 UNT y 236 Pt-Co respectivamente), por lo que es probable que esté muy contaminado y puede depender del uso del suelo y actividades humanas cercanas.

Los nutrientes que no se fijan en el suelo y no son utilizados por las plantas pueden filtrarse en el agua subterránea. Los resultados obtenidos de la concentración de nitratos, indican que 96 % de los pozos cumplen con los valores recomendados para agua potable. Una de las fuentes principales de contaminación de nitratos para los pozos muestreados puede ser el uso de fertilizantes en la agricultura, residuos de animales y ganadería y áreas con asentamientos urbanos cercanos a los pozos. El frecuente consumo de agua con alta concentración de nitratos, como el pozo Sb25 (21.1 mg L^{-1} de $\text{NO}_3\text{-N}$), crea problemas en la salud humana. Varios tipos de cáncer y defectos de nacimiento fueron clasificados como posiblemente relacionados con la exposición a niveles elevados de nitratos en el agua potable (Weyer 2002). Al igual que los nitratos, los fosfatos son arrastrados e infiltrados en el suelo por procesos de precipitación y escorrentía. En este estudio se evaluaron los fosfatos en su forma disuelta: ortofosfatos (PO_4^{-3}) y en la mayoría de los pozos (85 %) se encuentran dentro de los valores recomendados. Hay casos en los que la concentración de fosfatos es muy alta, como el agua de los pozos Sb17 y Sb19 (2.75 y 2.28 mg L^{-1} de PO_4^{-3}). Las fuentes de contaminación de fosfatos en estas zonas pueden ser por agua residual de casas y drenaje de prácticas agrícolas. El exceso de nutrientes puede promover el crecimiento de algas que pueden contribuir a una amplia gama de problemas de calidad del agua que afectan a la potabilidad, el sabor, olor y su color (CCME 2009).

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) determina la cantidad de oxígeno que se consume por microorganismos en el agua. La DBO puede indicar la presencia de materia orgánica que afecta la calidad de agua de consumo. Los resultados indican que en la

mayoría de pozos (81 %) se mantiene la calidad de agua con respecto a DBO. En los pozos que sobrepasan el valor recomendado (1 mg L^{-1} de O_2) como Sb1, Sb2, Sb4, Sb11, Sb12, Sb25 y Sb27 se sospecha contaminación de origen orgánico. Los principales contaminantes que afectan el consumo de oxígeno son los pesticidas, aguas residuales y la basura que contaminan los suministros de agua potable con sus efectos tóxicos u hormonales. El consumo de grandes cantidades de oxígeno por estos contaminantes hace el agua sucia, insalubre e inhóspita para ciertas especies (Robertz y Danell 1997).

Los valores recomendados para bacterias son poco permisivos (0 UFC/100 ml) para coliformes termotolerantes y menos de 3 UFC para bacterias no coliformes en agua no tratada destinada al consumo. Los límites de bacterias termotolerantes en el agua fueron cumplidos por 77 % de los pozos mientras que en los conteos de bacterias no coliformes solamente 42 % se encuentra bajo la norma. La presencia de bacterias coliformes termotolerantes indica la influencia de desechos fecales de animales o humanos que pueden estar contaminando el agua. El estado de las tuberías, el uso del suelo y actividades humanas son posibles factores contaminantes del agua que se extrae de los pozos, por lo que se aconseja su tratamiento antes de su consumo.

Indicadores de calidad de agua superficial. Los valores recomendados para los parámetros de calidad de agua superficial fueron determinados por medio de varias normas, ya que una sola no considera todos los parámetros analizados. También se trata de tener información de países con similares condiciones climáticas. Los niveles de los parámetros que cumplieron las recomendaciones y límites exigidos para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces fueron pH, oxígeno disuelto (mg L^{-1} y %), demanda bioquímica de oxígeno y nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$). Los parámetros en que la mayoría de los muestreos sobrepasaron los límites establecidos fueron turbidez, color y bacterias no coliformes.

El límite de temperatura en el que se basó este estudio fue de $32 \text{ }^\circ\text{C}$ y fue tomado de la norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes de Colombia. Este parámetro fue cumplido por la mayoría de las muestras y excedido únicamente por el Río Los Almendros (Sp7). Debido a que Honduras se encuentra en la zona intertropical las temperaturas a lo largo del año son poco variables, por lo que este parámetro incide poco en el deterioro de la calidad del agua para la vida acuática. Sin embargo, las variaciones de temperatura si pueden alterar los valores de conductividad eléctrica (Hayashi 2003).

El valor de alcalinidad es relativamente alto en el sitio Sp3 (768 mg L^{-1} como CaCO_3) con respecto a la media de los demás sitios (135 mg L^{-1} como CaCO_3). Igualmente la dureza del mismo sitio (758 mg L^{-1} como CaCO_3) es mayor a la media del resto de sitios de muestreo (80 mg L^{-1} como CaCO_3). En cuanto a pH, todas las muestras cumplieron con lo recomendado por la norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes de Colombia. El valor medio de pH del agua de los sitios de muestreo es 8.02, que es ligeramente alcalino pero no afecta a los organismos acuáticos ya que son los valores más frecuentes en la naturaleza (Addy *et al.* 2004).

Los análisis de turbidez y color verdadero son los resultados más altos y los que más contribuyen a la disminución de la calidad del agua superficial en el estudio. Solamente tres de las ocho muestras no excedieron los 25 UNT recomendadas por el reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales de Costa Rica. Con respecto a color verdadero, únicamente una muestra cumplió con los márgenes del mismo reglamento, estas condiciones podrían deberse a que la erosión de los suelos es mayor en época lluviosa (Ballestero *et al.* 2007).

Las concentraciones de NO_3^{-2}N y PO_4^{-3} están dentro de todos los valores recomendados para preservación de la vida acuática, con excepción del sitio Sp5 que sobrepasó el límite de los ortofosfatos. Las concentraciones altas de nitratos son un mal indicador de calidad de agua para la vida acuática, ya que el exceso de nutrientes provoca eutrofización en los cuerpos de aguas (Nishio 2002).

La contaminación de las aguas superficiales con organismos patógenos está relacionada con la ganadería. Sin embargo, este tipo de contaminación también se encuentra en cuencas no agrícolas a causa de presencia humana en la zona (Jamieson *et al.* 2003). En los ríos analizados los conteos de bacterias no coliformes exceden los valores adecuados, en su gran mayoría son demasiado numerosos para contar, mientras los valores de bacterias coliformes fecales excedieron la norma en los sitios Sp5 y Sp8. El sitio Sp3 tiene menor cantidad de coliformes termotolerantes que el sitio Sp8 el cual está ubicado aguas abajo en el mismo río, estas diferencias podrían ser efecto de la dilución o degradación biológica de los contaminantes.

Índice de calidad de agua subterránea. Su aplicación en este estudio se enfocó en los criterios y normas establecidas para agua de consumo humano, ya que éste es el uso que se le da al agua que se extrae de los pozos. La variación de los índices de calidad obtenidos en el agua subterránea es muy amplio, el índice más bajo es de 40 y el mayor 100 (Figura 2). El valor medio de ICA es 67 y la mediana es 64, lo que significa que la mitad del agua los pozos muestreados se consideran de calidad marginal o menor. Únicamente un pozo (Sb24) se consideró de calidad excelente al obtener un valor de ICA de 100. De los pozos muestreados 18.5 % se consideran de buena calidad, 25.9 % de calidad media, 40.7 % de calidad marginal y 11.1 % de pobre calidad.

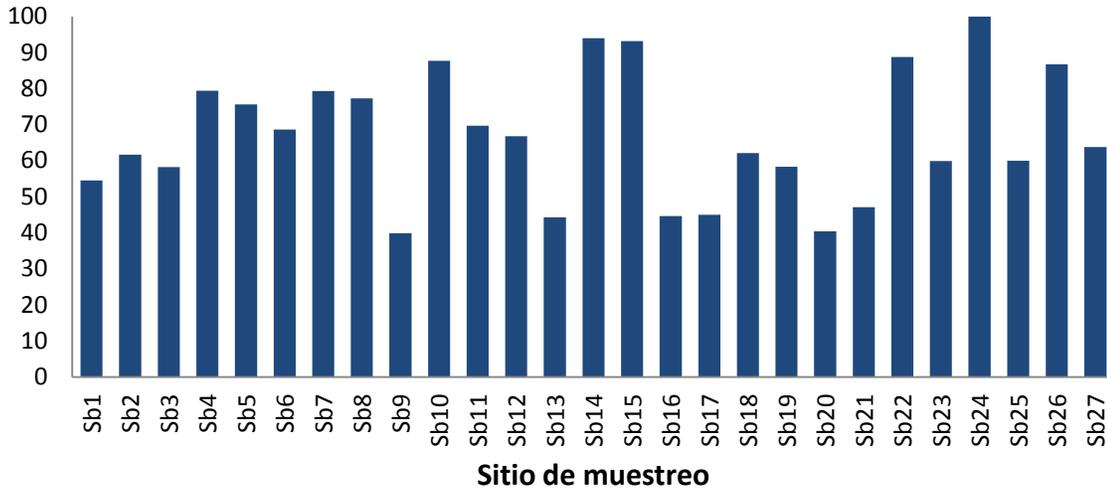


Figura 2. Índice de calidad de agua en los pozos estudiados en el Departamento de El Paraíso, Honduras.

Algunos tipos de contaminantes incidieron más que otros para deteriorar la calidad del agua analizada. Los valores de conductividad eléctrica y conteos de bacterias no coliformes fueron los parámetros que más determinaron el valor del ICA. En 16 muestras se excedieron los límites recomendados por la Secretaría de Salud de Honduras (MSP 1995). Los valores de dureza y turbidez se excedieron en 12 y 11 muestras respectivamente y la turbidez fue sobrepasada en ocho muestras. Los tipos de contaminantes que menos incidieron en el deterioro de la calidad del agua fueron los relacionados a los SDT y nitratos cuyos valores recomendados fueron incumplidos únicamente en una ocasión (Sb20 en SDT y Sb25 en nitratos, que fueron muestreados en junio y agosto respectivamente).

Se realizó un ICA de agua para cada uno de los muestreos en los cuales la mayoría de los sitios no presentó una marcada diferencia (Cuadro 4). Generalmente el ICA del primer muestreo fue mayor que el del segundo, con excepción de Sb3 y Sb9. Las diferencias de estos datos indican que hubo disminución considerable de la calidad del agua de 36 unidades para Sb3 y de 33 en Sb9.

Cuadro 4. Número de pozos en cada categoría de calidad de agua.

Categoría de calidad de agua	Valor del índice	No. de pozos según ICA		
		Primer muestreo	Segundo muestreo	General
Excelente	95-100	2	1	1
Buena	80-94	6	6	5
Media	65-79	6	6	7
Marginal	45-64	7	11	11
Pobre	0-44	3	3	3
Total de muestras		24	27	27

Espacialmente no hay un patrón de distribución definida de las categorías de calidad de agua (Figura 3), sin embargo, los pozos que se encuentran en el área urbana de la ciudad de Danlí (Sb2, Sb3, Sb19) son de categoría marginal a excepción de Sb4 que es de categoría media. De igual manera los sitios Sb5, Sb6, Sb7 y Sb8 están cerca y todos tienen categoría de calidad media. Estas diferencias y similitudes pueden estar influenciadas por el uso del suelo o características propias de los acuíferos. El pozo Sb24 presenta condiciones óptimas, esto indica que el acuífero en ese sitio al que pertenece no tiene contaminación de ningún tipo. La contaminación presente en los pozos relativamente cercanos al Sb24 puede deberse a que se encuentren en otro acuífero.

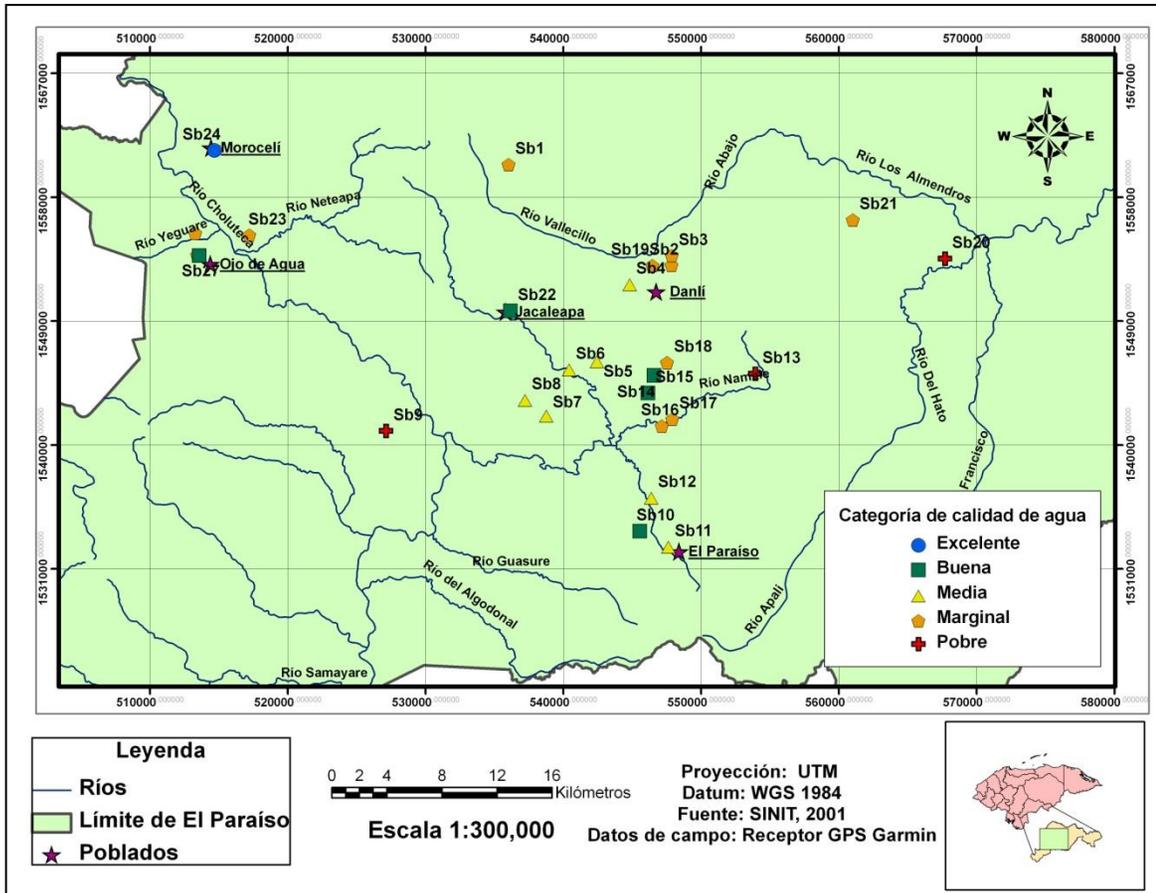


Figura 3. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de agua subterránea por categoría de calidad.

Índice de calidad de agua superficial. En el desarrollo del ICA para el agua superficial se tomó como referencia las condiciones deseables para la preservación de la vida acuática (CCME, 2001). Los parámetros seleccionados en el ICA concuerdan con dichas condiciones y con la existencia de límites recomendados para tales parámetros en el mantenimiento de la vida acuática.

Los valores de ICA para agua superficial tienen menor variación entre sí, que los del agua subterránea (Figura 4). La media y mediana del ICA de la zona es 72, lo que se considera como calidad media. Los tipos de contaminantes que más incidieron en el deterioro de la calidad del agua fueron los relacionados con el color y la turbidez, ya que no cumplieron con los valores recomendados en siete y cinco muestras respectivamente. Por otro lado el pH, oxígeno disuelto, DBO, sólidos disueltos totales y nitratos cumplieron con los valores recomendados en todos los sitios de muestreo.

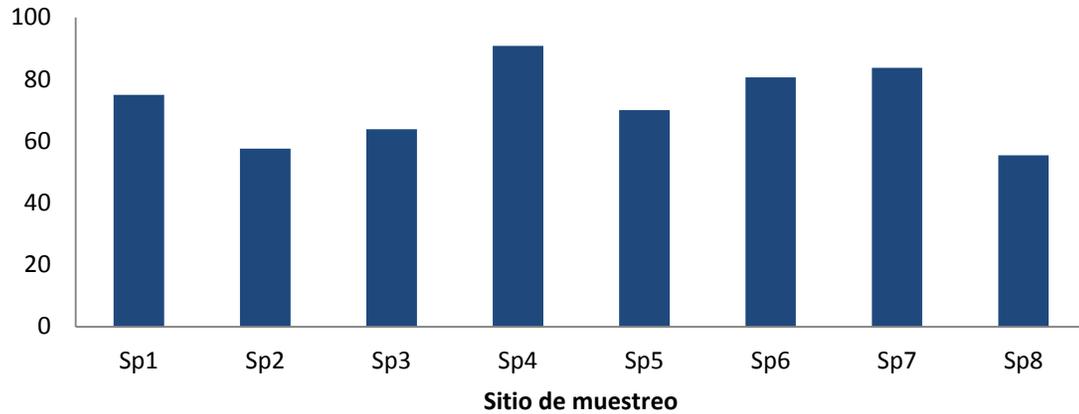


Figura 4. Índice de calidad de agua superficial en el Departamento de El Paraíso, Honduras.

El ICA en el sitio Sp8 (Río Choluteca arriba) es menor que el sitio Sp3 (Río Choluteca abajo), a pesar de que se trata del mismo río (Figura 5). Esto puede deberse a que en el punto Sp3 el Río Choluteca ya ha ocurrido un proceso de dilución ocasionado por la unión con el Río Namale y sus tributarios.

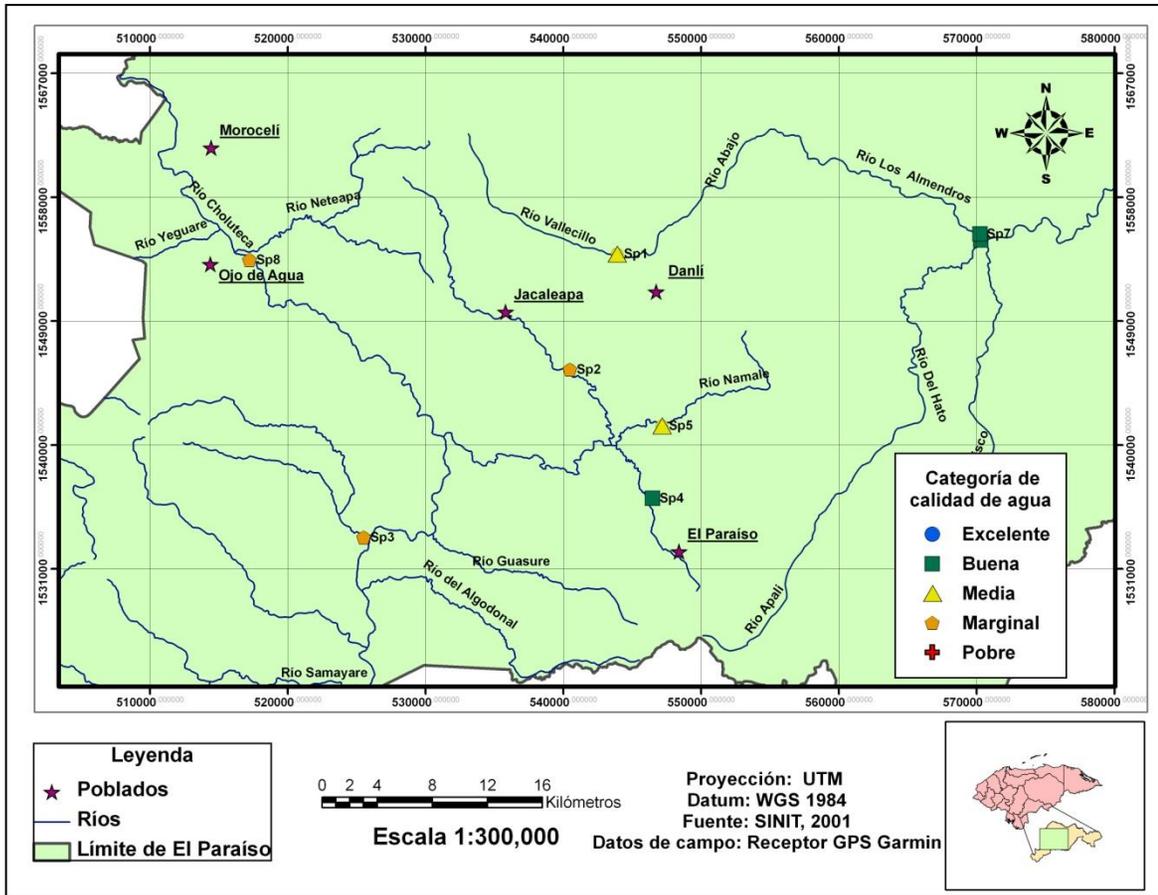


Figura 5. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de agua superficial por categoría de calidad.

4. CONCLUSIONES

- La calidad del agua subterránea en los pozos estudiados en el Departamento de El Paraíso es afectada principalmente por la presencia de bacterias indicadoras de contaminación no fecal. Otros parámetros cuyos valores excedieron lo recomendado son la conductividad eléctrica, turbidez y dureza, los cuales indican la presencia de otros contaminantes no identificados por el presente estudio.
- La calidad del agua superficial estudiada en el Departamento de El Paraíso es afectada por contaminantes relacionados a altos valores de color verdadero y turbidez. Las actividades antropogénicas en la zona contribuyen al aumento en los niveles de dichos parámetros.
- El índice de calidad de agua (ICA) utilizado en el presente estudio se basa en los parámetros que cumplen o no con los valores recomendados. Por lo tanto es adaptable a las realidades de las diferentes regiones y países.
- El ICA califica al agua superficial del Departamento de El Paraíso entre marginal y buena. En cuanto a agua subterránea el ICA resumió las condiciones actuales de los pozos y demostró que la mitad de ellos poseen agua de calidad media a excelente y la otra mitad es considerada como agua marginal y pobre.
- La degradación de la calidad del agua de los pozos en el área de estudio es influenciada por factores externos a las características propias de los acuíferos y condiciones de los sistemas de extracción, distribución y almacenamiento del agua de los pozos.
- No hubo cambios significativos entre muestreos realizados en diferentes épocas de los resultados de cada parámetro. Esto puede deberse a las condiciones similares de precipitación en casi todos los muestreos y a que el agua en el subsuelo es menos susceptible a variaciones temporales de calidad en comparación con el agua superficial.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar un monitoreo continuo de la calidad del agua de los pozos en el Departamento de El Paraíso para garantizar el suministro de agua potable a las comunidades que de ellos se abastecen. Esto sería un inicio para tomar medidas basadas en registros confiables para mantener o mejorar, según sea el caso, la calidad del agua.
- Diseñar y realizar un estudio de la calidad del agua en el Departamento de El Paraíso teniendo en cuenta la distribución de la precipitación, debido a que pueden existir diferencias en la calidad del agua entre la época seca y lluviosa. Para tener datos más precisos y confiables es recomendable realizar muestreos de manera frecuente.
- Restaurar y dar mantenimiento a las estructuras y equipo que facilita la extracción del agua subterránea. Así mismo, a los tanques de almacenamiento para evitar contaminación de factores externos a las condiciones naturales de los acuíferos.
- Asegurar la desinfección previa al consumo del agua de los pozos en los sistemas comunitarios de abastecimiento. La instalación de bombas eléctricas en los pozos y construcción de tanques de podría garantizar el adecuado tratamiento antes de que el agua entre en el sistema de distribución.
- Ejecutar medidas de prevención de la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y acuíferos en las cuencas y microcuencas del área donde se realizó el estudio, sobre todo de la contaminación causada por actividades antropogénicas. Es necesario ejecutar estas medidas para garantizar la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos para los diferentes usos.

6. LITERATURA CITADA

Addy, K; Green, L; Herron, E. 2004. pH and alkalinity (en línea). Rhode Island, Estados Unidos. Consultado 27 sep. 2011. 4 p. Disponible en: <http://www.uri.edu/ce/wq/ww/-Publications/pH&alkalinity.pdf>

Anaya, M. y Martínez, J. 2007. Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano en América Latina y el Caribe (en línea). Montecillos, México. Consultado 16 ago. 2011. 151 p. Disponible en: <http://www.pnuma.org/reclnat/esp/documentos/cap5.pdf>

Balairón, L; Álvarez Rodríguez, J; Borrell, E; Delgado, M. 2004. Balance hídrico de Honduras. CEDEX. Madrid, España. 506 p.

Ballesteros, M; Reyes, V; Astorga, Y. 2007. Groundwater in Central America: its importance, development and use, with particular reference to its role in irrigated agriculture (en línea). Consultado 16 ago. 2011. 29 p. Disponible en: http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/CABI_Publications/CA_CABI_Series/Ground_Water/protected/Giordano_1845931726-Chapter6.pdf

Cardona, A.J. 2003. Calidad y riesgo de contaminación de las aguas superficiales en la microcuenca del Río La Soledad, Valle de Angeles, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 158 p.

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment, Canadá). 2009. Phosphorus (en línea). Winnipeg, Canadá. Consultado 29 sep. 2011. Disponible en: <http://www.ccme.ca/sourcetotap/phosphorus.html>

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment, Canadá). 2001. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0 User's Manual. Winnipeg, Canadá. 5 p.

Decreto 253/79. Normas para prevenir la contaminación ambiental, Uruguay. 9 de mayo de 1979. Montevideo, Uruguay. 14 p.

Decreto No. 33903-MINAE-S. Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales, Costa Rica. No. Gaceta 178. 17 de septiembre de 2009.

Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 2011. Base de datos de precipitación de la Unidad de Maquinaria y Riego. Zamorano, Honduras. Consultado 31 sep. 2011.

Hach Company. 1999. DR/820, DR/850, and DR/890 Portable Datalogging Colorimeter Instrument Manual, Cat. No. 48440-18 (en línea). Consultado 21 may. 2011. Estados Unidos de América. 75 p. Disponible en: http://www.hach.com/fmmimghach?/-CODE%3A890_INSTRUMENTMANUAL142151

Hach Company. 2006. Model 16900 digital titrator manual (en línea). Consultado 21 may. 2011. Estados Unidos de América. 24 ed. 196 p. Disponible en: http://www.hach.com/fmmimghach?/CODE%3A1690008_24ED-2105091

Hayashi, M. 2003. Temperature – electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion. *Environmental Monitoring Assessment* 96:119-128

Health Canada. 1991. Total dissolved solids (en línea). Canadá. Consultado 30 sep. 2011. Disponible en http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/water-eau/tds-mdt/tds-mdt-eng.pdf

INE (Instituto Nacional de Estadísticas, Honduras). 2002. V Censo de población y XVI de vivienda. Tegucigalpa, Honduras. s.p.

Jamieson, R; Gordon, R; Tattrie, S; Stratton, G. 2003. Sources and persistence of fecal coliform bacteria in a rural watershed. *Water Quality Research Journal of Canada* 38: 33-47.

MSP (Ministerio de Salud Pública, Honduras). 1995. Norma técnica para la calidad del agua potable. Tegucigalpa, Honduras. 19 p.

Moral, F; Giráldez, J; Laguna, A. 1996. Aplicación de la onda cinemática a la infiltración y drenaje en un suelo arenoso repelente al agua (en línea). Almería, España. Consultado 29 sep. 2011. 7 p. Disponible en: http://books.google.com/books?id=ZSDh7KCQtXAC&-printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Nishio, M. 2002. Effect of intensive fertilizer use on groundwater quality. Tsukuba, Japón. University of Tsukuba. 9 p.

Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua, Colombia. 55 p.

Norma Oficial Mexicana NOM-041-SSA1-1993. Bienes y servicios. Agua purificada envasada. Especificaciones sanitarias. 3 de marzo de 1995. 53 p.

NSE (Nova Scotia Environment, Canadá). 2008. The drop on water colour (en línea). Halifax, Canadá. Consultado 29 de sep. 2011. 8 p. Disponible en: http://www.gov.ns.ca/nse/water/docs/droponwaterFAQ_Colour.pdf

OMS (Organización Mundial de la Salud). 2006. Guías para la calidad de agua potable (en línea). Consultado 21 may. 2001. Ginebra, Suiza. 3 ed. v. 1, 398 p. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf

OMS (Organización Mundial de la Salud, Suiza). 2003. pH in drinking – water: background document for development of WHO Guidelines for drinking – water quality (en línea). Ginebra, Suiza. Consultado 1 oct. 2011. 7 p. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/en/ph.pdf

OMS (Organización Mundial de la Salud, Suiza). 2011. Hardness in drinking – water: background document for development of WHO Guidelines for drinking – water quality (en línea). Ginebra, Suiza. Consultado 1 oct. 2011. 19 p. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/hardness.pdf

Ongley, E. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Roma, Italia. Estudio FAO: Riego y Drenaje. v. 55, 116 p.

Robertz, M; Danell P. 1997. The importance of biochemical oxygen demand (BOD) in the water analysis sector (en línea). Dortmund, Alemania. Consultado 27 sep. 2011. 3 p. Disponible en: http://dl.aqualytic.de/studies/importance_aqua_gb.pdf

Saeedi, M; Abessi, O; Sharifi, F; Meraji, H. 2009. Development of groundwater quality index. Environmental Monitoring and Assessment 163:327-335

Sánchez, L. 2000. Control de la contaminación de las aguas (en línea). Campinas, Brasil. Consultado 25 sep. 2011. UNESCO. 345 p. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/-bvsacd/cd29/control-aguas.pdf>

Torres, P; Cruz, C; Patiño, P; Escobar, J.C; Pérez, A. 2010. Aplicación de índices de calidad de agua – ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. Revista Ingeniería e Investigación. 30 ed. 13 p.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. Development and use of global water quality indicators and indices (en línea). Consultado 5 sep. 2011. Viena, Austria. 27 p. Disponible en: http://www.gemswater.org/publications/pdfs/indicators_workshop_report.pdf.

UNEP (United Nations Environment). 2007. Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report (en línea). Consultado 8 sep. 2011. Burlington, Canadá. 60 p. Disponible en: <http://www.gemswater.org/publications/pdfs/-gwqi.pdf>.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, FR). 2003. Agua para todos, Agua para la vida. Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. París, Francia. 34 p.

Ureña, N. 2004. Efectos del aumento poblacional y del cambio de uso del suelo sobre los recursos hídricos en la Microcuenca del Río Ciruelas, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 170 p.

Ward, C.H; Giger, W; McCarty, P.L. 1985. Groundwater quality. New York, Estados Unidos de América. WILEY. 547 p.

Weyer, P. 2002. Nitrate in drinking water and human health (en línea). Iowa City, Estados Unidos de América. Consultado 30 sep. 2011. 12 p. Disponible en: <http://www.agsafety-andhealthnet.org/Nitrate.PDF>.

Wilson, P. 2010. Water quality notes: Water Clarity (turbidity, suspended solids, and color) (en línea). Gainesville, Estados Unidos de America. Consultado 30 sep. 2011. 9 p. Disponible en: <http://edis.ifas.ufl.edu/ss526>

7. ANEXOS

Anexo 1. Valores recomendados para calidad de agua potable.

Parámetros	Unidad	Valor recomendado	Fuente
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	< 400	Norma técnica para la calidad del agua potable (Honduras)
pH		6.5 – 8	Guías para la calidad de agua potable (OMS)
DBO	mg L^{-1}	< 1	Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano
STD	%	< 600	Guías para la calidad de agua potable (OMS)
Alcalinidad	mg L^{-1}	< 300	Norma Oficial Mexicana NOM-041-SSA1-1993
Dureza	mg L^{-1}	< 200	Guías para la calidad de agua potable (OMS)
Turbidez	UNT	< 5	Guías para la calidad de agua potable (OMS)
Color	Pt-Co	< 15	Norma técnica para la calidad del agua potable (Honduras)
$\text{NO}_3\text{-N}$	mg L^{-1}	< 11	Guías para la calidad de agua potable (OMS)
$\text{PO}_4\text{-}^3$	mg L^{-1}	< 1	Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano
Bacterias no coliformes	UFC	< 3	Norma técnica para la calidad del agua potable (Honduras)
Bacterias coliformes termotolerantes	UFC	0	Norma técnica para la calidad del agua potable (Honduras)

Anexo 2. Valores recomendados para calidad de agua para vida acuática.

Parámetros	Unidad	Valor recomendado	Fuente
Temperatura	°C	< 32	Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua (Colombia)
Potencial de hidrógeno (pH)		6.5 – 9	Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua (Colombia)
Oxígeno disuelto	mg L ⁻¹	> 5	Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua (Colombia)
Oxígeno disuelto	%	> 60	Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua (Colombia)
DBO (mg L ⁻¹)	mg L ⁻¹	< 10	Normas para prevenir la contaminación ambiental (Uruguay)
Sólidos disueltos totales	mg L ⁻¹	< 250	Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales (Costa Rica)
Turbidez	UNT	< 25	Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales (Costa Rica)
Color	Pt-Co	< 10	Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales (Costa Rica)
NO ₃ -N	mg L ⁻¹	< 10	Normas para prevenir la contaminación ambiental (Uruguay)
Coliformes termotolerantes	UFC	< 200	Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua (Colombia)

Anexo 3. Índice de calidad de agua subterránea en el Departamento de El Paraíso, Honduras.

Código	Ubicación	F ₁	F ₂	F ₃	ICA
Sb1	La Chapetona	25.0	29.2	68.7	55
Sb2	Iglesia Mano de Dios	16.7	37.5	52.3	62
Sb3	Las Acacias	25.0	20.8	64.7	58
Sb4	Eben Ezer	25.0	25.0	5.4	79
Sb5	El Robledal	25.0	33.3	7.0	76
Sb6	San Matías	25.0	25.0	41.3	69
Sb7	Guayacán	25.0	25.0	5.5	79
Sb8	Los Espinitos	25.0	29.2	8.5	77
Sb9	Las Crucitas	50.0	37.5	83.3	40
Sb10	Col. Emanuel	16.7	12.5	4.6	88
Sb11	La Resurrección	33.3	12.5	38.5	70
Sb12	Los Terrones	40.0	36.8	19.0	67
Sb13	Linaca	33.3	33.3	84.3	44
Sb14	San Marcos Abajo	8.3	6.1	1.8	94
Sb15	Las Tunas	8.3	8.3	0.2	93
Sb16	El Pescadero "1"	41.7	47.6	72.2	45
Sb17	El Pescadero "2"	41.7	42.9	74.3	45
Sb18	Ocobas	25.0	33.3	50.7	62
Sb19	San Cristobal	33.3	28.6	57.4	58
Sb20	Zamorano, Jamastrán	58.3	45.8	71.9	40
Sb21	San Lorenzo	33.3	33.3	78.7	47
Sb22	Jacaleapa	8.3	16.7	5.7	89
Sb23	El Cacao	16.7	20.8	64.2	60
Sb24	Morocelí	0.0	0.0	0.0	100
Sb25	Los Galpones	41.7	47.8	28.0	60
Sb26	Ojo de Agua	16.7	13.0	9.1	87
Sb27	Ojo de Agua 2	16.7	16.7	58.1	64

Anexo 4. Índice de calidad de agua superficial en el Departamento de El Paraíso, Honduras.

Código	Ubicación	F ₁	F ₂	F ₃	ICA
Sp1	Río Vallecillo	20	20	33	75
Sp2	Río Azul	20	20	68	58
Sp3	Río Choluteca, Abajo	20	20	56	64
Sp4	Río San Matías	10	10	7.4	91
Sp5	Río Namale	20	20	44	70
Sp6	Río del Hato	10	10	31	81
Sp7	Río Los Almendros	20	20	1.2	84
Sp8	Río Choluteca (Ojo de Agua)	30	30	64	55

Anexo 5. Análisis de estadísticos descriptivos de parámetros para agua superficial.

Estadísticos descriptivos	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza
Temperatura (°C)	8	25.1	32.6	28.725	2.3469	5.508
Conductividad (µs/cm)	8	129	323	204.77	65.159	4245.742
pH	8	7.72	8.29	8.0287	0.21006	0.044
Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	8	6.13	8.04	7.2513	0.64993	0.422
Oxígeno disuelto (%)	8	83.40	108.30	97.0375	8.52072	72.603
DBO (mg L ⁻¹)	8	0.00	2.00	0.8750	0.83452	0.696
SDT (mg L ⁻¹)	8	61	162	99.94	34.213	1170.546
Alcalinidad (mg L ⁻¹ como CaCO ₃)	8	49	768	213.88	253.875	64452.411
Dureza (mg L ⁻¹ como CaCO ₃)	8	44	758	164.50	242.412	58763.429
Turbidez (UNT)	8	9.86	225.00	75.4575	75.13596	5645.412
Color (PtCo)	8	0.0	195.0	73.500	66.2571	4390.000
NO ₃ N (mg L ⁻¹)	8	0.2	0.8	0.462	0.1923	0.037
PO ₄ ⁻³ (mg L ⁻¹)	8	0.38	1.46	0.7463	0.32311	0.104
N válido (según lista)	8					

Anexo 6. Análisis de estadísticos descriptivos de parámetros de agua subterránea.

	N	Media	Des. típica	Mín	Máx	Percentiles		
						25	50 Mediana	75
pH	2 4	6.9421	0.40807	6.12	7.55	6.6200	7.0750	7.2375
Conductividad	2 4	444.80	211.823	96	802	263.50	439.50	637.50
STD	1 9	222.12	123.462	43	488	123.00	192.00	303.00
Alcalinidad	2 4	256.13	308.251	29	1620	86.00	240.00	291.25
Dureza	2 4	196.88	118.935	11	383	76.50	199.00	294.25
Turbidez	2 4	30.06	61.775	0	234	1.02	2.55	36.95
Color	1 7	14.24	31.860	0	118	0.00	0.00	14.50
Nitratos	2 4	3.126	4.4313	0	21.1	0.925	1.550	4.400
Fosfatos	2 4	0.5225	0.42450	0.09	1.78	0.2150	0.4250	0.6625
No coliformes	2 2	13.91	23.432	0	92	0.00	2.00	20.50
Coliformes	2 3	0.35	1.465	0	7	0.00	0.00	0.00
DBO	1 8	1.23	1.397	0	5	0.00	0.75	1.95
pH2	2 7	6.99	0.363	6	7	6.80	7.05	7.31
Conductividad2	2 7	510.89	368.467	81	1975	265.00	515.00	661.00
STD2	2 7	288.59	254.083	37	1370	139.00	279.00	368.00
Alcalinidad2	2 7	246.37	233.980	37	1276	90.00	226.00	286.00
Dureza2	2 7	202.33	131.362	4	432	57.00	192.00	323.00
Turbidez2	2 7	27.56	58.562	0	223	0.54	2.43	27.20
Color2	2 7	32.78	96.095	0	473	0.00	0.00	16.00
Nitratos2	2 7	1.857	2.1594	0	8.9	0.500	1.000	2.500
Fosfatos2	2 7	0.7867	0.65366	0.14	2.75	0.3500	0.5700	1.0000
Nocoliformes2	2 4	32.25	52.795	0	191	0.00	5.50	42.75
Coliformes2	2 6	1.58	5.700	0	29	0.00	0.00	0.25
DBO2	2 7	0.56	0.577	0	2	0.00	1.00	1.00

Anexo 7. Prueba de rangos de Wilcoxon.

		N	Rango promedio	Suma de rangos
pH2 – pH	Rangos negativos	8 ^a	12.63	101.00
	Rangos positivos	15 ^b	11.67	175.00
	Empates	1 ^c		
	Total	24		
Conductividad2 – Conductividad	Rangos negativos	7 ^d	9.79	68.50
	Rangos positivos	15 ^e	12.30	184.50
	Empates	2 ^f		
	Total	24		
STD2 – STD	Rangos negativos	9 ^g	10.56	95.00
	Rangos positivos	10 ^h	9.50	95.00
	Empates	0 ⁱ		
	Total	19		
Alcalinidad2 – Alcalinidad	Rangos negativos	13 ^j	13.12	170.50
	Rangos positivos	10 ^k	10.55	105.50
	Empates	1 ^l		
	Total	24		
Dureza2 – Dureza	Rangos negativos	13 ^m	9.23	120.00
	Rangos positivos	11 ⁿ	16.36	180.00
	Empates	0 ^o		
	Total	24		
Turbidez2 – Turbidez	Rangos negativos	13 ^p	11.92	155.00
	Rangos positivos	10 ^q	12.10	121.00
	Empates	1 ^r		
	Total	24		
Color2 – Color	Rangos negativos	3 ^s	5.83	17.50
	Rangos positivos	7 ^t	5.36	37.50
	Empates	7 ^u		
	Total	17		
Nitratos2 – Nitratos	Rangos negativos	15 ^v	13.27	199.00
	Rangos positivos	8 ^w	9.63	77.00
	Empates	1 ^x		
	Total	24		
Fosfatos2 – Fosfatos	Rangos negativos	10 ^y	8.35	83.50
	Rangos positivos	14 ^z	15.46	216.50

	Empates	0 ^{aa}		
	Total	24		
Nocoliformes2 - No coliformes	Rangos negativos	8 ^{ab}	8.63	69.00
	Rangos positivos	12 ^{ac}	11.75	141.00
	Empates	1 ^{ad}		
	Total	21		
Coliformes2 – Coliformes	Rangos negativos	1 ^{ae}	3.00	3.00
	Rangos positivos	3 ^{af}	2.33	7.00
	Empates	19 ^{ag}		
	Total	23		
DBO2 – DBO	Rangos negativos	10 ^{ah}	9.70	97.00
	Rangos positivos	6 ^{ai}	6.50	39.00
	Empates	2 ^{aj}		
	Total	18		

a. pH2 < pH

b. pH2 > pH

c. pH2 = pH

d. Conductividad2 < Conductividad

e. Conductividad2 > Conductividad

f. Conductividad2 = Conductividad

g. STD2 < STD

h. STD2 > STD

i. STD2 = STD

j. Alcalinidad2 < Alcalinidad

k. Alcalinidad2 > Alcalinidad

l. Alcalinidad2 = Alcalinidad

m. Dureza2 < Dureza

n. Dureza2 > Dureza

o. Dureza2 = Dureza

p. Turbidez2 < Turbidez

q. Turbidez2 > Turbidez

r. Turbidez2 = Turbidez

s. Color2 < Color

t. Color2 > Color

u. Color2 = Color

v. Nitratos2 < Nitratos

w. Nitratos2 > Nitratos

x. Nitratos2 = Nitratos

y. Fosfatos2 < Fosfatos

z. Fosfatos2 > Fosfatos

aa. Fosfatos2 = Fosfatos

ab. Nocoliformes2 < No coliformes

ac. Nocoliformes2 > No coliformes

-
- ad. Nocoliformes2 = No coliformes
 - ae. Coliformes2 < Coliformes
 - af. Coliformes2 > Coliformes
 - ag. Coliformes2 = Coliformes
 - ah. DBO2 < DBO
 - ai. DBO2 > DBO
 - aj. DBO2 = DBO
-

Anexo 8. Resultados estadísticos de la prueba de rangos de Wilcoxon

Estadísticos de contraste ^d																
	pH2 pH	-	CE2 CE	-	STD 2 - STD	Alc.2 Alc.	-	Dureza2 Dureza	Turb.2 - Turb.	Color2 - Color	Nit.2 Nit.	-	Fosfatos 2 - Fosfatos	Nocolif.2 - colif.	Colif.2 - Colif.	DBO2 - DBO
Z	-1.126 ^a		-1.883 ^a		0.00 ^b	-0.989 ^c		-0.857 ^a	-0.517 ^c	-1.021 ^a	-1.856 ^c		-1.900 ^a	-1.345 ^a	-0.730 ^a	-1.502 ^c
Sig. asintót	0.260		0.060		1.000	0.323		0.391	0.605	0.307	0.063		0.057	0.179	0.465	0.133

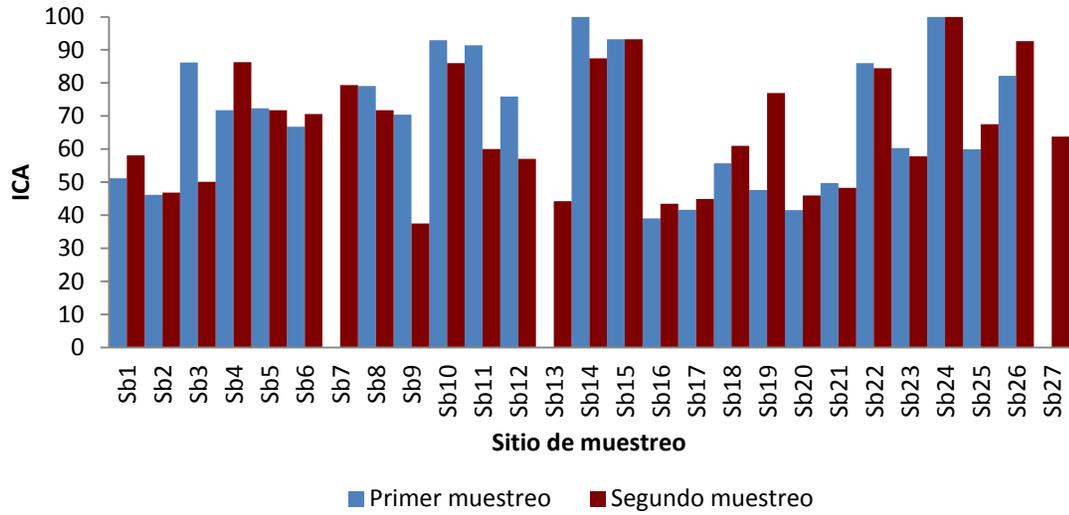
a. Basado en los rangos negativos.

b. La suma de rangos negativos es igual a la suma de rangos positivos.

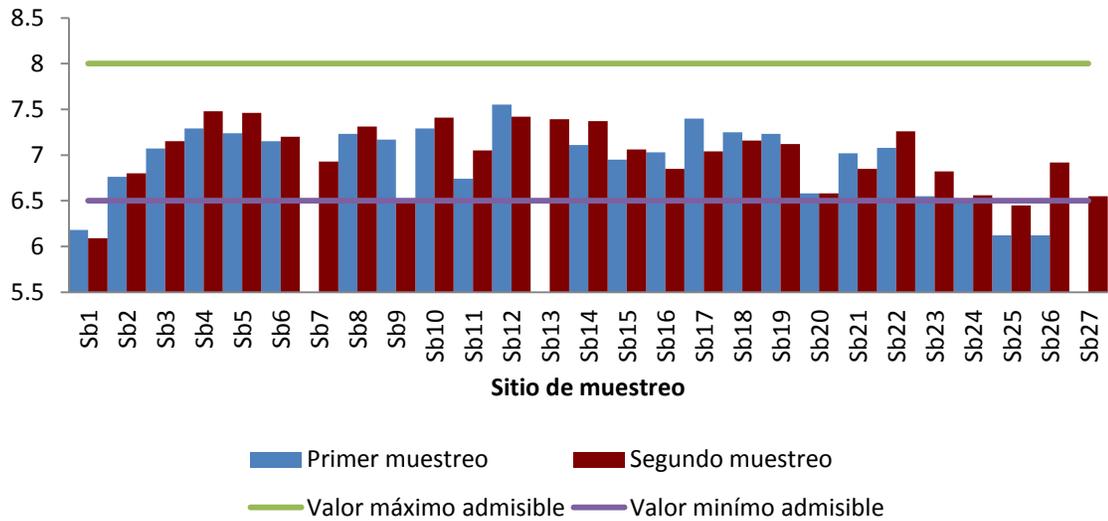
c. Basado en los rangos positivos.

d. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

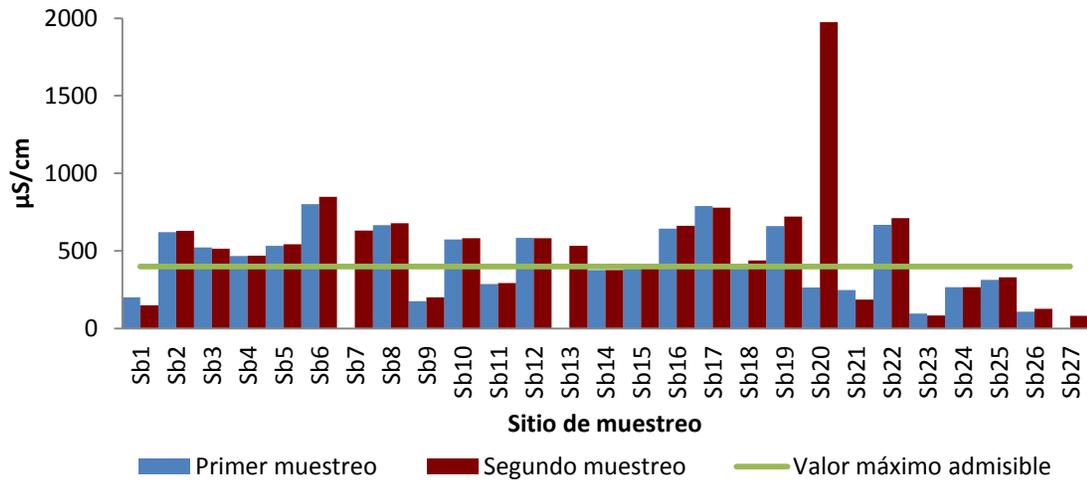
Anexo 9. Índice de calidad de agua por muestreo en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



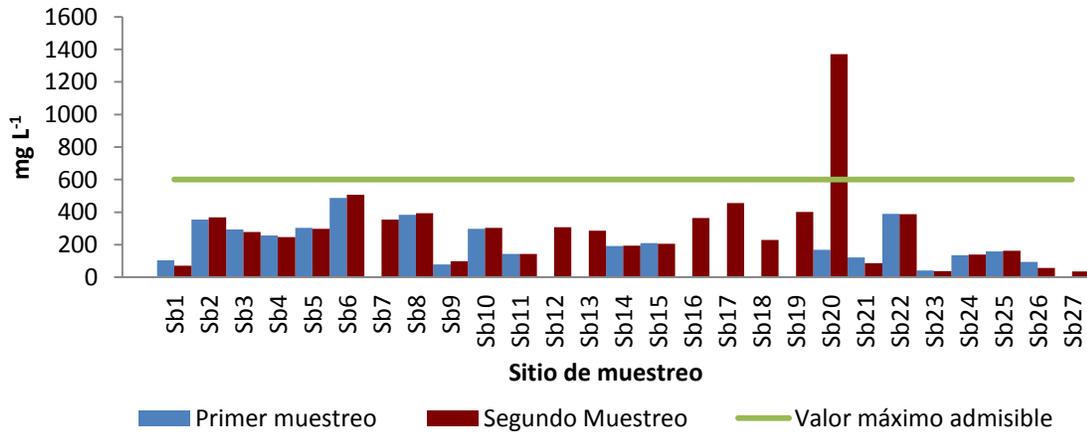
Anexo 10. Potencial de hidrógeno (pH) del agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



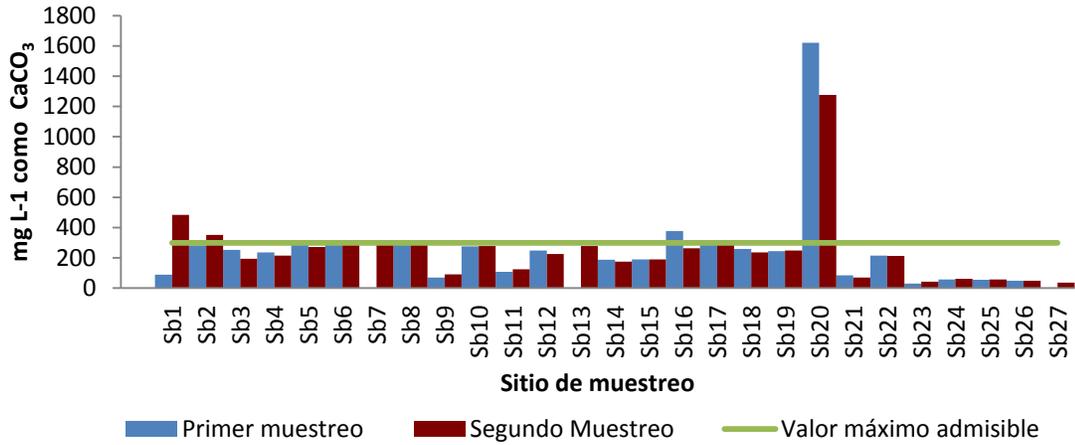
Anexo 11. Conductividad eléctrica (CE) del agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras



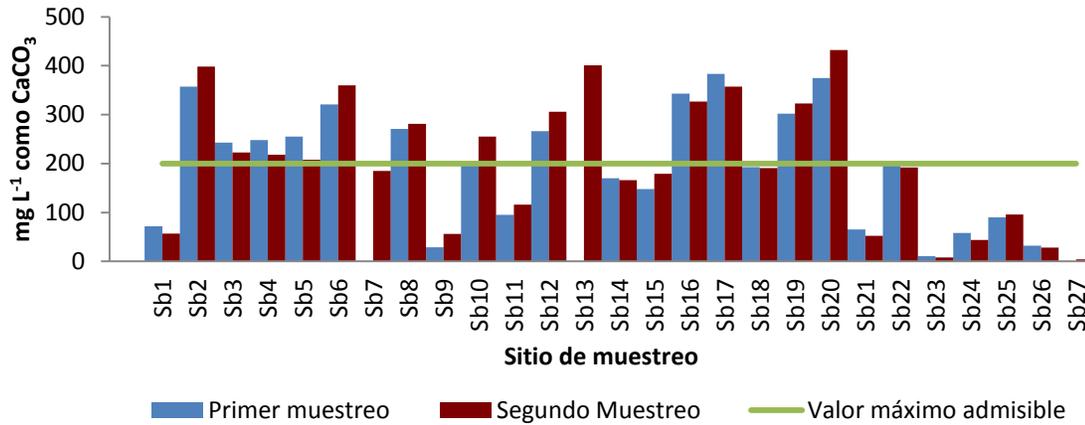
Anexo 12. Concentración de sólidos totales disueltos del agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



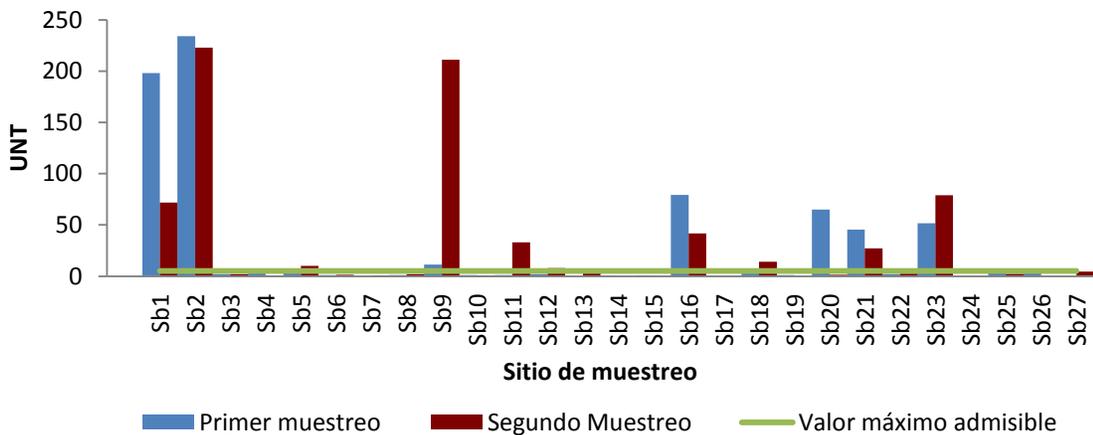
Anexo 13. Alcalinidad del agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



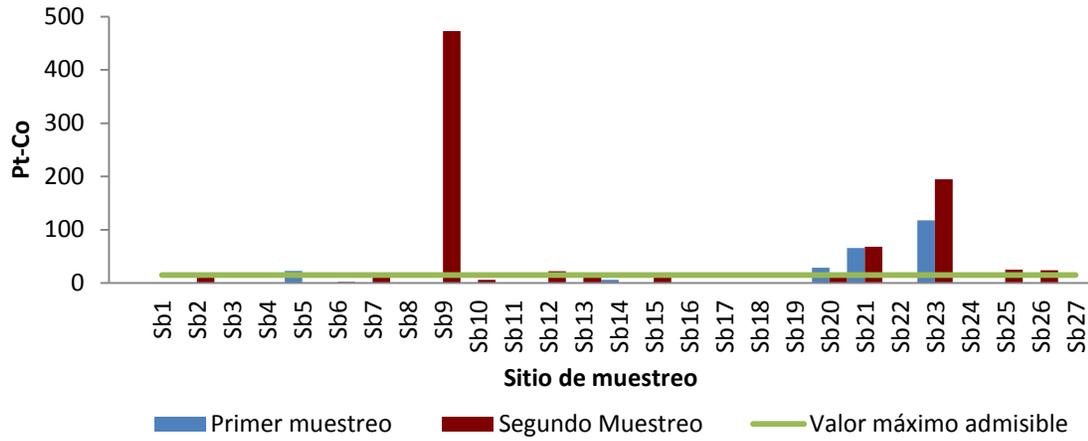
Anexo 14. Dureza del agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



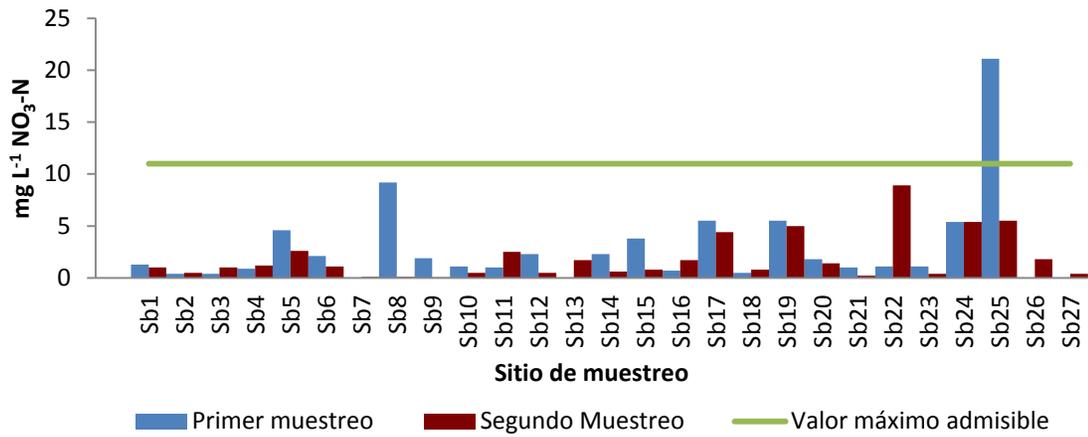
Anexo 15. Turbidez del agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



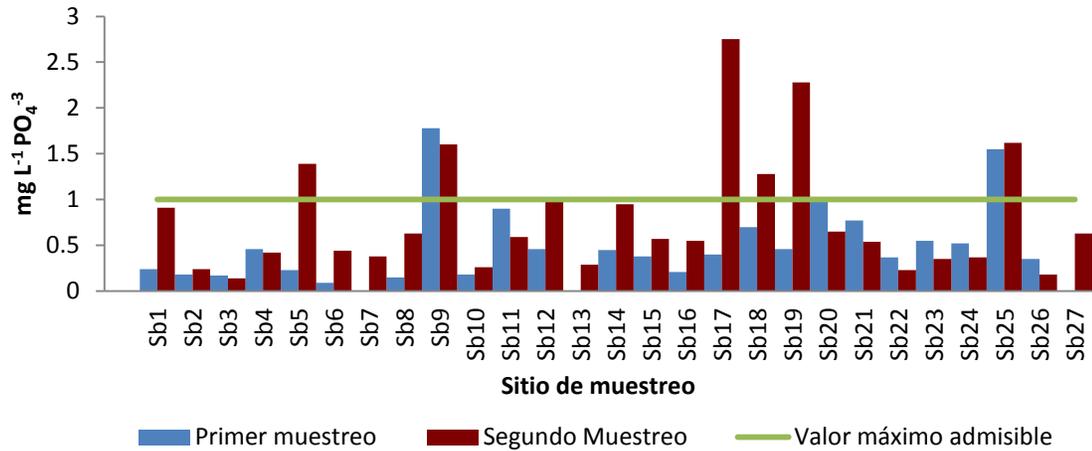
Anexo 16. Color verdadero del agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



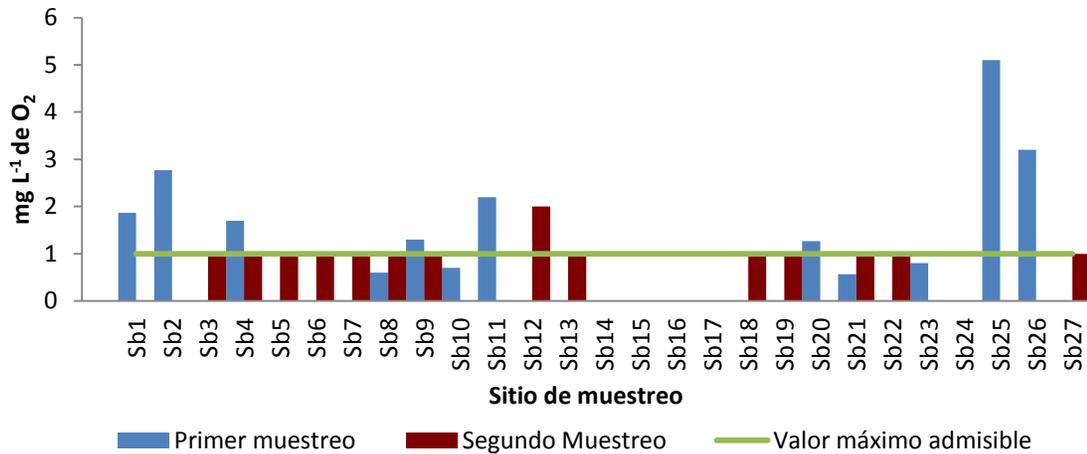
Anexo 17. Concentración de nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$) del agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



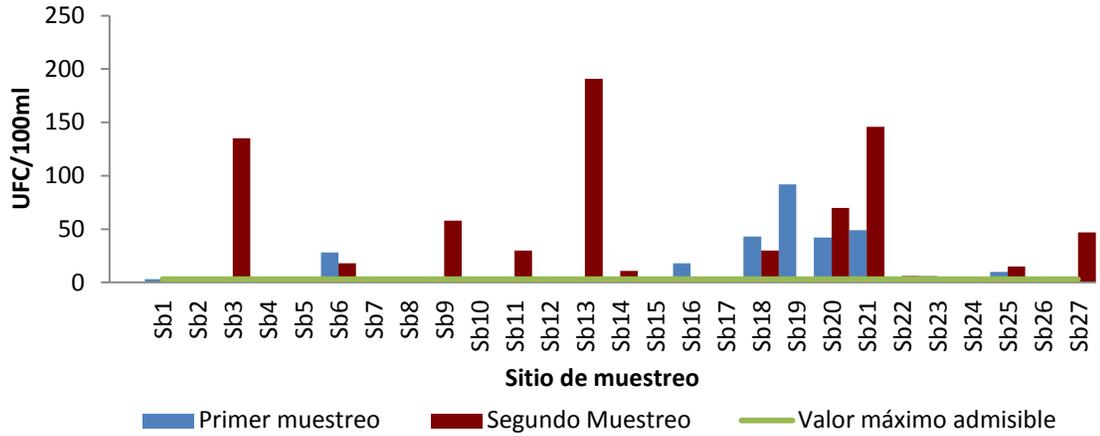
Anexo 18. Concentración de ortofosfatos (PO_4^{-3}) del agua en 27 pozos en el departamento de El Paraíso, Honduras.



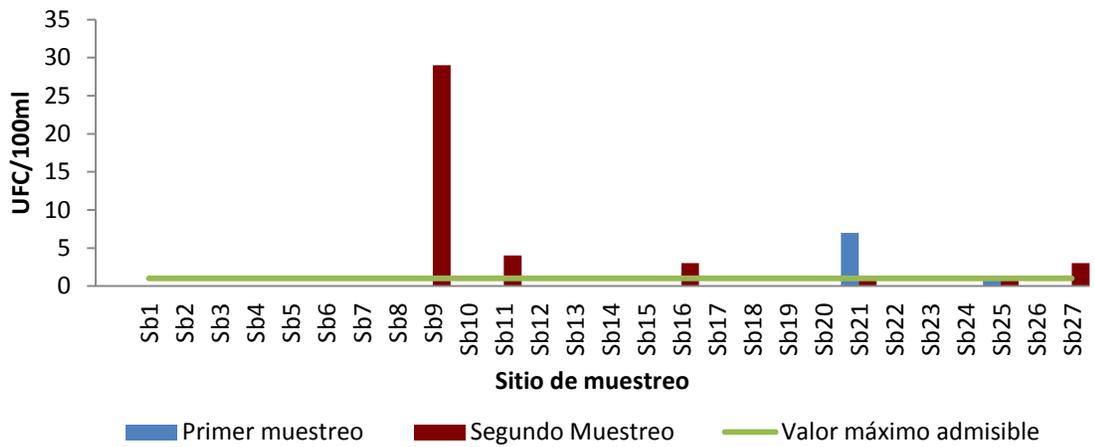
Anexo 19. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del agua de 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



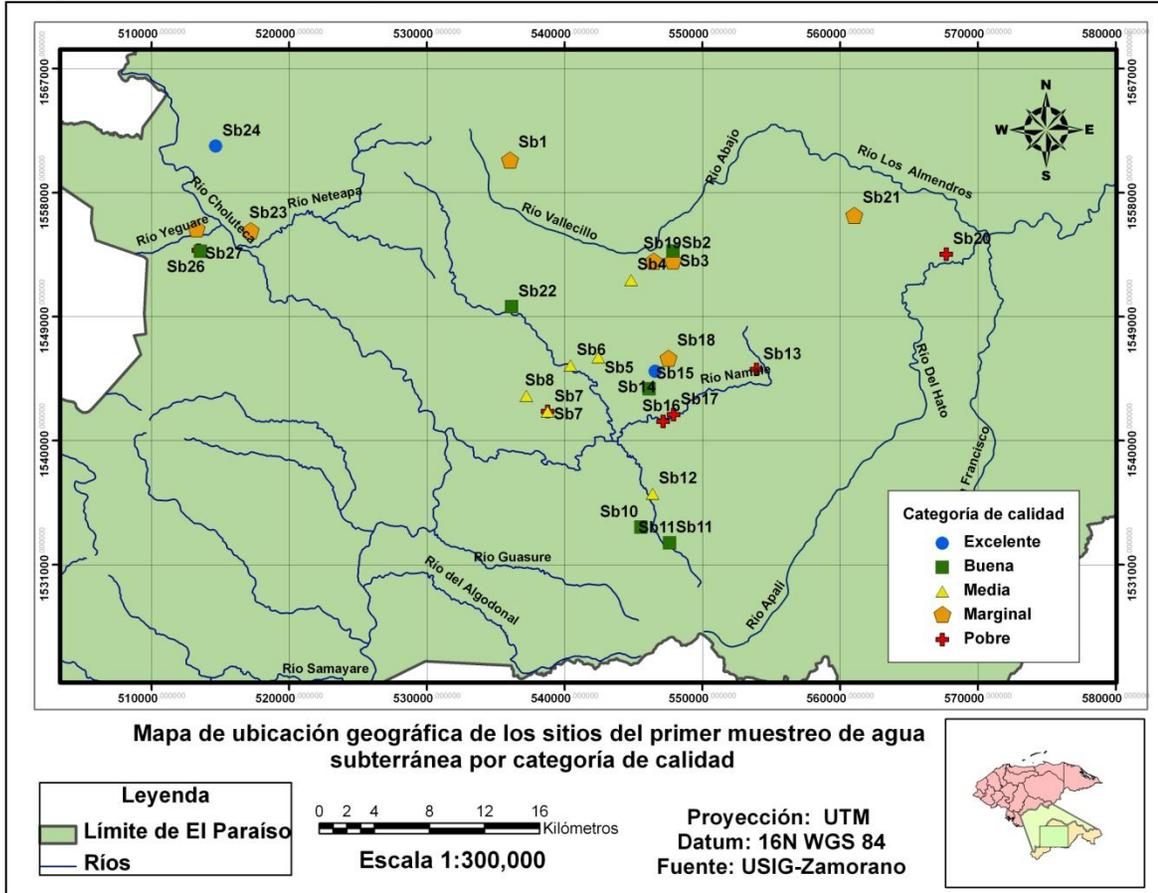
Anexo 20. Conteo de bacterias no coliformes en 100 ml de agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



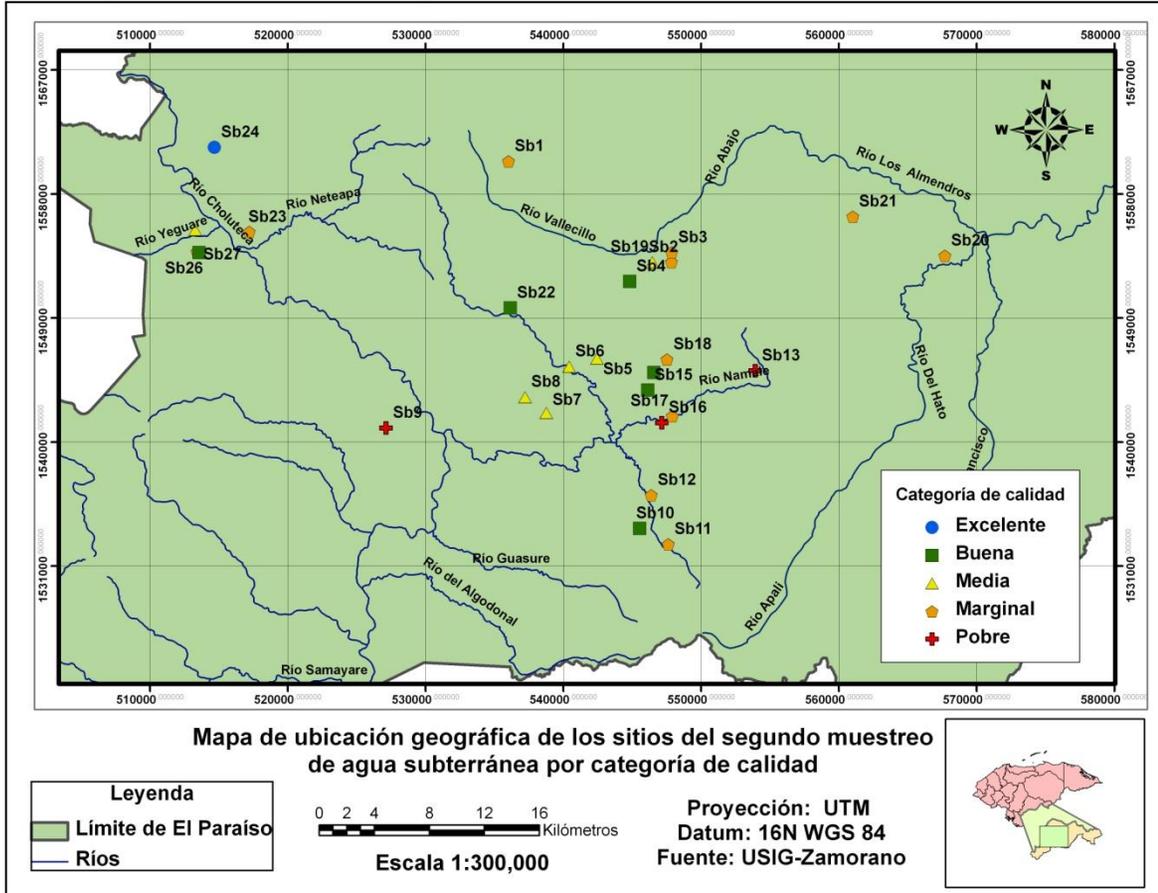
Anexo 21. Conteo de bacterias coliformes termotolerantes en 100 ml de agua en 27 pozos en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



Anexo 22. Ubicación geográfica de los sitios del primer muestreo de agua subterránea por categoría de calidad en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



Anexo 23. Ubicación geográfica de los sitios del segundo muestreo de agua subterránea por categoría de calidad en el Departamento de El Paraíso, Honduras.



Anexo 24. Fotografía del sitio de muestreo en el pozo Eben Ezer.



Anexo 25. Fotografía del sitio de muestreo en el pozo San Cristóbal.



Anexo 26. Fotografía del sitio de muestreo en el Río del Hato.

