



**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Maestría en Cambio Climático (MCC)**

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM)**

**Tema:**

**Estructura termo-halina y patrones de circulación estacional en la fuente volcánica submarina de CO<sub>2</sub> localizada en Roca Redonda (Galápagos)**

**Maestrante:**

Mario Hurtado Domínguez

**Docente:**

Dr. rer. nat. Rafael Bermúdez.

ENERO 2021



## **DEDICATORIA**

El presente proyecto va dedicado a todas esas personas que ya no están con nosotros en especial a Mamá Angelita, Yoly y mi madre. A mi padre por esas incansables conversaciones de sobremesa, a mis hermanos por mantenerse siempre juntos y a toda mi familia.

A todas las personas que han sufrido pérdidas en esta pandemia.

Es grato regresar a trabajar al lugar que me vió crecer.



## **AGRADECIMIENTOS**

Al Proyecto GMaRe (a cada uno de sus investigadores) que junto a ESPOL y FCD financiaron este proyecto. Al IPIAP por el apoyo institucional que me brindaron.

A cada una de las personas que alimentaron con ideas para la elaboración de este documento.



## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Mario Armando Hurtado Domínguez* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Mario Hurtado Domínguez





## EVALUADORES

M.Sc. Jonathan Cedeño

Evaluador Coordinación

Ph.D. Gladys Rincón Polo

Evaluador Alterno



## RESUMEN

El objetivo principal de este estudio es el de caracterizar los parámetros oceanográficos en Roca Redonda (30 Km al norte de Isabela, 16 m profundidad aproximadamente) durante dos campañas (desarrolladas en estación seca y lluviosa). se tomaron datos de CTD, corrientes, pH. Dos juegos de mediciones: i) Roca Redonda (lluviosa-transición seca, mayo de 2019), ii) Punta Albemarle (lluviosa-transición seca, mayo de 2019), iii) Roca Redonda (seca, septiembre-2019); y, iv) Punta Albemarle (seca, septiembre-2019).

Se ha demostrado que este lugar está acidificado naturalmente debido a las aportaciones de la actividad volcánica submarina existente en el sitio. Actualmente existen pocos lugares identificados como "acidificados naturalmente", lo cual, por consecuencia se traduce a que no existe mayor información sobre el comportamiento de lugares con estas características. Este estudio es la primera caracterización oceanográfica que se hace del sitio "Roca Redonda".

Estudiar estos espacios acidificados naturalmente permitiría construir escenarios que sirvan de modelos para entender el funcionamiento de estos ecosistemas y poder ayudar y aportar al conocimiento científico.

Los datos colectados indican diferenciación estacional en el lugar de estudio, tanto en temperatura, salinidad observándose influencia determinante de Cromwell. Debido a que la zona de estudio es somera no existe termoclina identificada.

El sistema de corrientes presente en el área de estudio indica mayores magnitudes en la superficie y no muestra un patrón de dirección de corrientes, mientras que, los valores en el punto de control, muestran dominancia en sus direcciones tanto en la superficie como en el fondo. En general, las corrientes en el fondo muestran valores bajos.

Roca Redonda registra valores de pH ácido, sin importar las variaciones estacionales en los parámetros oceanográficos.

**Palabras claves:** acidificación oceánica, temperatura, salinidad, densidad, corrientes



## ABSTRACT

The main objective of this study is to characterize the oceanographic parameters in Roca Redonda (30 km north of Isabela, approximately 16 m deep) during 02 campaigns (developed in summer (dry) and winter (rainy) seasons). CTD data, currents, pH were taken. Two sets of measurements: i) Round Rock (dry transition, May 2019), ii) Punta Albemarle (rainy-dry transition, May 2019), iii) Round Rock (dry, September-2019), and; iv) Punta Albemarle (dry, September-2019)

It has been shown that this place is naturally acidified due to the contributions of the underwater volcanic activity existing at the site. Currently there are few places identified as "naturally acidified", which consequently means that there is no more information on the behavior of places with these characteristics. This study is the first oceanographic characterization of the "Roca Redonda" site.

Studying these naturally acidified spaces would allow the construction of scenarios that serve as models to understand the functioning of these ecosystems and to be able to help and contribute to scientific knowledge.

The data collected indicate seasonal differentiation in the study place, both in temperature, salinity and depth, observing a determining influence of Cromwell. Because the study area is shallow, there is no identified thermocline.

The current system present in the study area indicates higher magnitudes on the surface and does not show a pattern of direction of currents, while the values at the control point show dominance in their directions both on the surface and on the bottom. In general, the bottom currents show low values.

Roca Redonda records acidic pH values, regardless of seasonal variations in oceanographic parameters.

**Keywords:** ocean acidification, temperature, salinity, density, currents



## ÍNDICE GENERAL

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO I .....  | 1  |
| 1. Introducción.....  | 1  |
| 1.1. Planteamiento del problema .....   | 2  |
| 1.2. Objetivos .....  | 4  |
| 1.2.1. Objetivo General .....   | 4  |
| 1.2.2. Objetivos Específicos.....   | 4  |
| 1.3. Marco teórico.....   | 6  |
| 1.3.1. Propiedades conservativas del Mar.....                                   | 6  |
| 1.3.1.1. Temperatura .....  | 6  |
| 1.3.1.2. Salinidad.....   | 7  |
| 1.3.1.3. Presión .....  | 8  |
| 1.3.1.4. Densidad .....   | 9  |
| 1.3.2. Equipos de medición de temperatura, conductividad y densidad (CTD) ..... | 9  |
| 1.3.3. Corrientes.....  | 10 |
| 1.3.3.1. Equipos medidores de corrientes .....                                  | 11 |
| 1.3.4. Cambio Climático .....   | 13 |
| 1.3.5. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....                            | 15 |
| 1.3.6. Acidificación Oceánica .....   | 16 |
| 1.3.7. Lugares acidificados naturalmente en el mar .....                        | 19 |
| 1.3.8. Galápagos.....   | 21 |
| 1.3.9. Roca Redonda .....   | 25 |
| CAPÍTULO II .....   | 27 |
| 2. Metodología.....   | 27 |
| 2.1. Fase Inicial.....  | 29 |
| 2.1.1. Información Referencial.....   | 29 |
| 2.1.2. Determinación del Área de Estudio.....                                   | 30 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.1.3.   | Diseño de muestreo.....                        | 31 |
| 2.1.3.1. | Espacialidad del estudio.....                  | 31 |
| 2.1.3.2. | Temporalidad del estudio .....                 | 32 |
| 2.2.     | Fase de Pre Monitoreo.....                     | 32 |
| 2.2.1.   | Elección de los equipos de medición .....      | 32 |
| 2.2.2.   | Configuración de los equipos para pruebas..... | 32 |
| 2.2.2.1. | CTD.....                                       | 32 |
| 2.2.2.2. | Correntómetro .....                            | 33 |
| 2.2.3.   | Pruebas de Equipos configurados.....           | 35 |
| 2.3.     | Fase Monitoreo.....                            | 35 |
| 2.3.1.   | Configuración de Equipos .....                 | 36 |
| 2.3.2.   | Instalación de Equipos .....                   | 36 |
| 2.3.3.   | Toma de información.....                       | 36 |
| 2.3.3.1. | Equipos oceanográficos .....                   | 36 |
| 2.3.3.2. | Muestras de agua – Medición de pH .....        | 37 |
| 2.3.4.   | Recuperación de los equipos .....              | 39 |
| 2.3.5.   | Descarga de datos.....                         | 39 |
| 2.4.     | Fase de Post Monitoreo.....                    | 39 |
| 2.4.1.   | Tratamiento de datos.....                      | 39 |
| 2.4.2.   | Filtrado de datos .....                        | 40 |
| 2.4.3.   | Depuración de datos.....                       | 40 |
| 2.4.3.1. | Análisis Exploratorio de datos.....            | 40 |
| 2.4.3.2. | Visualización.....                             | 40 |
| 2.4.4.   | Elaboración de Geobase .....                   | 40 |
| 2.5.     | Análisis de Resultados.....                    | 40 |
| 2.5.1.   | Geovisualización de datos.....                 | 41 |
| 2.5.2.   | Construcción de scripts.....                   | 41 |
| 2.5.3.   | Análisis estadístico de los datos.....         | 41 |
| 2.5.4.   | Elaboración de gráficos y tablas.....          | 41 |
|          | CAPÍTULO 3 .....                               | 43 |



|   |    |
|---|----|
| 3. Resultados y Análisis .....  | 43 |
| 3.1. Evaluar datos de la estructura termo-halina (temperatura, salinidad, densidad) de la columna de agua en el área de estudio y en el lugar de referencia ..... | 43 |
| 3.1.1. Temperatura .....  | 43 |
| 3.1.2. Salinidad .....  | 45 |
| 3.1.3. Densidad .....   | 48 |
| 3.2. Evaluar magnitudes y direcciones de las corrientes marinas presentes en el área de estudio y en el lugar de referencia. ....                                 | 51 |
| 3.3. Evaluar datos de acidificación presentes en el área de estudio y en el lugar de referencia. ....   | 56 |
| 3.4. Evaluar la información colectada de análisis temporales y espaciales mediante herramientas de procesamiento y de visualización.....                          | 59 |
| CAPÍTULO 4 .....  | 69 |
| 4. Conclusiones y Recomendaciones .....   | 69 |
| 4.1 Conclusiones .....  | 69 |
| 4.2 Recomendaciones .....   | 70 |
| CAPITULO 5 .....  | 71 |
| 5. BIBLIOGRAFÍA.....  | 71 |
| CAPITULO 6 .....  | 77 |
| 6. ANEXOS .....   | 77 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Flujograma resumen de la metodología empleada para la elaboración del presente documento (primera parte). .....                    | 28 |
| Figura 2. . Flujograma resumen de la metodología empleada para la elaboración del presente documento (segunda parte). .....                  | 29 |
| Figura 3. Vista General de los puntos de muestreo en Galápagos .....   | 30 |
| Figura 4. Diseño de muestreo para los puntos de monitoreo. (degradado de colores representa la batimetría de Galápagos). .....               | 31 |
| Figura 5. Estructura térmica (°C) en Roca Redonda en época seca (eje x sentido muestra oeste – este).....                                    | 44 |
| Figura 6. Estructura térmica (°C) en Roca Redonda en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).....                                  | 44 |
| Figura 7. Estructura térmica (°C) en Punto de Control en época seca (eje x muestra sentido oeste – este).....                                | 45 |
| Figura 8. Estructura térmica (°C) en Punto de Control en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).....                              | 45 |
| Figura 9. Estructura de salinidad (UPS) en Roca Redonda en época seca (eje x muestra sentido oeste – este).....                              | 46 |
| Figura 10. Estructura de salinidad (UPS) en Roca Redonda en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).....                           | 46 |
| Figura 11. Estructura de salinidad (UPS) en Punto de Control en época seca (eje x muestra sentido oeste – este).....                         | 47 |
| Figura 12. Estructura de salinidad (UPS) en Punto de Control en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este). .....                     | 47 |
| Figura 13. Estructura de densidad (Sigma-t. kg/m <sup>3</sup> ) en Roca Redonda en época seca (eje x muestra sentido oeste – este) .....     | 48 |
| Figura 14. Estructura de densidad (Sigma-t. kg/m <sup>3</sup> ) en Roca Redonda en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).....    | 49 |
| Figura 15. Estructura de densidad (Sigma-t. kg/m <sup>3</sup> ) en Punto de Control en época seca (eje x muestra sentido oeste – este) ..... | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 16 Estructura de densidad ( $\Sigma$ -t. kg/m <sup>3</sup> ) en Punto de Control en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).....   | 50 |
| Figura 17. Valores de magnitud (m/s) y dirección en la columna de agua en Roca Redonda...   | 51 |
| Figura 18. Velocidad y dirección de corrientes por profundidad a) fondo, b) 5 metros del fondo, c) 10 metros del fondo y d) superficie en Roca Redonda.....   | 53 |
| Figura 19. Valores de magnitud (m/s) y dirección en la columna de agua en el Punto de control.....  | 54 |
| Figura 20. Velocidad y dirección de corrientes por profundidad a) fondo, b) 5 metros del fondo, c) 10 metros del fondo y d) superficie en Punta Albemarle.....  | 55 |
| Figura 21. Distribución espacial de valores de pH encontrados en Roca Redonda, Época seca   | 57 |
| Figura 22. Distribución espacial de valores de pH encontrados en Roca Redonda, Época Húmeda.....  | 57 |
| Figura 23. Distribución espacial de pH en Punto de Control. Época seca.....   | 57 |
| Figura 24. Distribución espacial de pH en Punto de Control. Época húmeda. ....  | 57 |
| Figura 25. pH registrado en lugares acidificados naturalmente alrededor del mundo. El valor de Ecuador corresponde al valor encontrado en Roca Redonda medidos en el presente estudio. (azul: valores de pH registrados; rojo: pH promedio del mar). ....   | 58 |
| Figura 26. Lugares acidificados naturalmente alrededor del mundo .....  | 59 |
| Figura 27. Comportamiento temporal durante 24 horas en Roca Redonda y el Punto de Control (Punta Albemarle). Izquierda se observan los valores de temperatura del mar. Derecha: Valores de marea. Los datos de Punta Albemarle fueron tomados en un día y posteriormente al día siguiente se monitoreo Roca Redonda. .... | 60 |
| Figura 28. Comparación estacional de temperatura (°C) en el fondo del área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos). ....  | 61 |
| Figura 29. (Superior) Promedio de temperatura en época húmeda (2002-2018). (Inferior) Promedio de temperatura en época seca (2002-2018). Datos boyas ARGO.....  | 62 |
| Figura 30. Comparación estacional de salinidad (UPS) en el fondo del área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos). ....   | 63 |
| Figura 31. (Superior) Promedio de salinidad en época húmeda (2002-2018). (Inferior) Promedio de salinidad en época seca (2002-2018). Datos boyas ARGO.....  | 64 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 32. Comparación estacional de densidad ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) en el fondo del área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos). .....      | 64 |
| Figura 33. Comparación estacional de fluorescencia ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) en el fondo del área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos). ..... | 65 |
| Figura 34. Comparación de magnitud y dirección de corriente registrada en el área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos). .....                         | 66 |
| Figura 35. Vista general de los puntos de medición de corrientes en el área de estudio. ....   | 77 |
| Figura 36. Corrientes registradas en el fondo del punto acidificado. Roca Redonda.....   | 78 |
| Figura 37. Corrientes registradas en el fondo del punto de control. Punta Albemarle.....   | 78 |
| Figura 38. Equipos de medición instalados en el fondo del sitio de muestreo .....  | 82 |
| Figura 39. Toma de muestra de agua para medición de pH y otros parámetros químicos en el lugar de estudio. ....  | 83 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Lugares acidificados naturalmente a nivel mundial .....   | 20 |
| Tabla 2. Detalle de temporalidad en el muestreo .....  | 32 |
| Tabla 3. Parámetros de configuración del correntómetro AquaPro Version 1.36.06.<br>.....   | 33 |
| Tabla 4. Parámetros de configuración del correntómetro AquaPro Version 1.36.06<br>(Continuación). .....  | 35 |
| Tabla 5. Resumen descriptivo de los valores registrados con el CTD en Roca Redonda y el<br>punto de control. ....                                    | 50 |
| Tabla 6. Cuenta de frecuencia de la dirección de la corriente en Roca Redonda<br>(grados).....   | 52 |
| Tabla 7. Cuenta de frecuencia de la dirección de la corriente en Punta Albemarle<br>(grados).....  | 54 |
| Tabla 8. Resumen de datos de Corrientes registradas en Roca Redonda y en el<br>punto de control.....   | 56 |
| Tabla 9. Resumen descriptivos de los valores encontrados en las estaciones de<br>muestreo en Roca Redonda y en Punta Albemarle. ....                 | 67 |
| Tabla 10. Resumen descriptivos de los valores encontrados en las estaciones de<br>muestreo en Roca Redonda y en Punta Albemarle (Continuación). .... | 68 |





## ABREVIATURAS

|        |  |
|--------|--|
| CC     | Cambio Climático   |
| AO     | Acidificación Oceánica   |
| SCOR   | Scientific Committee on Oceanic Research                                       |
| UNESCO | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura |
| NOAA   | National Oceanic and Atmospheric Administration                                |
| ENSO   | El Niño-Oscilación del Sur   |
| TSM    | Temperatura superficial del mar  |
| UPS    | Unidades Prácticas de Salinidad  |



## CAPÍTULO I

### 1. Introducción

El Cambio Climático (CC) de acuerdo al IPCC (2013) está definido como *“Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. Adicionalmente, La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. Siendo más específicos, la CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales”*. Dentro de todos los análisis que enmarca el CC se ha podido identificar a la Acidificación Oceánica (OA por sus siglas en inglés) como un potencial impacto en los océanos.

De acuerdo a Cazar Cadena, S. I. (2015) el incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> no solo causa aumento de la temperatura de la atmósfera, sino que también se considera responsable del cambio en la química del carbono inorgánico incorporado al mar, dando lugar al proceso denominado AO. Por otro lado, se asegura que el descenso de los valores de pH oceánico está bien documentado; el informe de 2013 del IPCC concluye que en el agua superficial del mar el pH ha descendido 0.1 unidades, medido desde el comienzo de la era industrial. Puede que una diferencia de 0,1 unidades pueda parecer pequeña, pero la escala de pH es logarítmica, por lo

que una disminución de 0,1 representa un aumento en la concentración de hidrogeniones del 26%.

Con este antecedente, en agosto 2018, ESPOL, The Ocean Acidification International Coordination Center junto con otras instituciones ecuatorianas, Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), Universidad de Concepción, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), entre otros; organizaron el evento “CO Vents at Roca Redonda, Galapagos Islands: A Natural Laboratory for Long-Term Multidisciplinary Ocean Acidification Experiments and Capacity Building”, producto de esta capacitación han surgido proyectos que buscan aportar con más información para poder entender el área de estudio que está ubicado en la parte noroeste de las Islas Galápagos “Roca Redonda”, la cual se encuentra acidificada naturalmente.

Este sitio, ha sido identificado como un “Laboratorio Viviente de Historia Natural”, debido a que posee fuentes naturales de CO<sub>2</sub> que provienen de un volcán submarino, sin embargo, no existe información actualizada de las características oceanográficas del área, por lo que, debido a las condiciones especiales de OA en el lugar se considera que necesario poder realizar análisis detallado y profundo del comportamiento oceanográfico del área.

Adicionalmente, junto con datos de acidificación el aporte al conocimiento científico sería de gran importancia debido a que el conocimiento real de sitios con acidificación natural es escaso en todo el mundo, debido a que no existen muchos lugares identificados con características similares.

Con lo anteriormente dicho, también se puede indicar que el presente estudio es la primera caracterización oceanográfica que se hace del sitio “Roca Redonda”.

### **1.1. Planteamiento del problema**

En agosto 2018, ESPOL, organizó una escuela de verano como se indicó anteriormente, producto de esta capacitación han surgido proyectos que buscan aportar con más información para poder entender esta área de estudio “única” que está ubicado en la parte noroeste de las Islas Galápagos “Roca Redonda”.

Este sitio, ha sido identificado como un “Laboratorio Viviente de Historia Natural”, debido a que posee fuentes naturales de CO<sub>2</sub> que provienen de un volcán submarino, sin embargo, no existe información actualizada de las características oceanográficas del área de estudio, por lo que, debido a las condiciones especiales de OA en el lugar, es necesario poder realizar un análisis más detallado y profundo del comportamiento oceanográfico del área mediante la toma de información *in situ* y su correspondiente interpretación.

Adicionalmente, el aporte al mundo científico sería de gran importancia debido a que el conocimiento real de sitios acidificados naturalmente es escaso en todo el mundo como lo indican varios autores como Castillo-Briceño, P., & Navarrete-Mierb, F. (2015), Silva, B. J., Gaspar, F. L., Tyaquicã, P., Lefèvre, N., & Montes, M. J. F. (2019), entre otros.

Actualmente, Roca Redonda es uno de los pocos lugares registrados a nivel mundial que presenta acidificación natural y que permite estudiarlo para poder tener una idea de cómo funciona el ecosistema, como conocimiento general los lugares identificados con acidificación natural a nivel mundial son alrededor de nueve (Tabla 1). De acuerdo a la información buscada y plasmada en la Tabla 1 existen pocos lugares acidificados naturalmente en el mundo y dos de ellos quedan en la zona tropical en el Pacífico Sudeste.

Tomando en cuenta la ventaja de tener un lugar en Ecuador que puede ser explorado y debido a la escasa información alrededor del mundo sobre este tema, se plantea sumar esfuerzos para entender a fondo el ecosistema de Roca Redonda, y así; aportar con información valiosa a la ciencia y tomadores de decisión. Este ecosistema está compuesto por varios elementos en la que se entiende como cadena trófica, entre ellos: físico (temperaturas, salinidad, densidad, corrientes, entre otros), químico (nitritos, nitratos, fosfatos, entre otros), biológico (fitoplancton, zooplancton, ictioplancton, peces, crustáceos, equinodermos, moluscos, entre otros).

Para ello, se ha mentalizado un programa de seguimiento, el cual tiene una conformación multidisciplinaria en sus componentes (físico, químico, biológico).

Para el presente trabajo se pretende tener un entendimiento más amplio de cuáles son los factores que predominan e influyen en el área de estudio.

Concretamente, para este documento se plantea llenar el vacío de información colectando data oceanográfica física tal como: temperatura, salinidad, densidad, corrientes, y paralelamente la toma y medición de muestras de agua para cálculos de acidificación, estas variables son pH, alcalinidad total y carbono inorgánico disuelto, para posteriormente hacer una descripción de los mismos. De cada una de las variables mencionadas se pretende describir su comportamiento en la columna de agua y también registrar temporalmente los datos para observar su comportamiento diario y nocturno. La información disponible indica una estrecha relación inversa entre las concentraciones de pH y la temperatura, la causa de que el pH varíe por la temperatura es que cuando aumenta la temperatura, las moléculas tienden a separarse en sus elementos: hidrógeno y oxígeno.

En consecuencia, se espera contribuir con este trabajo al conocimiento y entendimiento de un ecosistema acidificado naturalmente, aportar con el fortalecimiento de herramientas y análisis de datos oceanográficos en torno a acidificación oceánica.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

- Generar información sobre el comportamiento e interacción de la temperatura, salinidad y circulación de la columna de agua marina con la acidificación natural en Roca Redonda y sitios control en Galápagos.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar datos de la estructura termo-halina (temperatura, salinidad, densidad) de la columna de agua en el área de estudio y en el lugar de referencia.
- Evaluar magnitudes y direcciones de las corrientes marinas presentes en el área de estudio y en el lugar de referencia.
- Evaluar datos de acidificación presentes en el área de estudio y en el lugar de referencia.

- Evaluar la información colectada de análisis temporales y espaciales mediante herramientas de procesamiento y de visualización de datos.

### **1.3. Marco teórico**

#### **1.3.1. Propiedades conservativas del Mar.**

Dentro de las propiedades conservativas del mar podemos describir: temperatura, salinidad, densidad, a continuación, una breve revisión de dichos parámetros de acuerdo a la literatura disponible.

##### **1.3.1.1. Temperatura**

La primera propiedad conservativa a revisar será la temperatura del mar, se puede indicar que disminuye con la profundidad, sin embargo, no lo hace de manera lineal; de manera general la disminución de la temperatura se da de forma más rápida en las capas más superficiales que en el fondo. Por lo tanto, el estudio de perfiles de temperatura suele quedar definida en una capa de una decena de metros conocida como capa de mezcla (CM), donde la temperatura no varía sustancialmente y que se debe al papel primordial que tiene el viento en el agua y el mantenimiento de las condiciones casi isotérmicas en esta capa. Luego, a partir de la capa de mezcla se encuentra una zona de rápida variación de temperatura con la profundidad que se conoce con el nombre de termoclina. Posterior a la termoclina, la temperatura continúa descendiendo con la profundidad, pero menos pronunciada, definiendo nuevamente una región casi isotérmica (Knauss, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Profundizando en las características a la termoclina, esta varía su espesor y profundidad entre otras cosas dependiendo de la estación del año; en verano se observa que el agua del mar es más caliente que en invierno, debido a el agua absorbe radiación solar principalmente en las capas superficiales, los cambios en los perfiles de temperaturas se observan mayormente en las capas más superficiales. Este efecto se acentúa en las zonas costeras (poca profundidad) donde el agua de las capas superficiales se encuentra más turbia debido a que registran alta productividad biológica y a la influencia de material particulado como sedimento hacia capas superiores. Por otro lado, la influencia de la latitud y el clima son factores que también determinan el comportamiento de la termoclina; en climas tropicales esta es prácticamente permanente, a excepción que exista la presencia de algún evento extremo océano atmosférico como El Niño. En los climas templados de las latitudes medias presenta variaciones muy notables según a la



estación del año, y finalmente, en las latitudes altas prácticamente la columna de agua es isotérmica, caracterizada por presentar temperaturas muy bajas (Knauss, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

En cuanto, a como se mide y registra la temperatura es oportuno señalar que es la propiedad física del agua del mar menos compleja de medir con precisión. Existen varias maneras de medir la temperatura del mar en la superficie o en la columna, para mencionar se puede indicar: a partir de la expansión de un líquido o metal, a partir de la expansión de dos metales, a partir de la presión de vapor de un líquido, mediante termopares, a partir de cambios en una resistencia eléctrica o mediante radiación infrarroja desde la superficie del mar en el caso de sensores aéreos o satélites. De todas las formas de medición, un aspecto importante a señalar a cerca de las diferentes formas de medida de temperatura es que ningún sensor responde de manera inmediata a los cambios de temperatura que se producen en el medio que se está midiendo. Entonces, este desfase (o lag en inglés) es debido a que el calor primero debe pasar por difusión a través de la capa contorno instalada alrededor de la sonda, a través de la cubierta protectora del sensor, además de las propiedades del material montado en el interior del sensor. Por lo que, teniendo en cuenta lo anteriormente dicho la mayoría de sistemas de medición tipo CTD usan un termómetro de resistencia de platino (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

#### **1.3.1.2. Salinidad**

Como marco conceptual, se puede decir que la salinidad se define como la cantidad total de materia no-orgánica y no-volátil disuelta en el agua del mar (Knauss, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014). Su unidad de medición puede expresarse como partes por mil gramos de sal disuelta en un kilogramo de agua marina (‰ ó ppt del inglés parts per thousand). Inicialmente, la conductividad eléctrica del agua depende del contenido de iones, en consecuencia, es directamente proporcional al contenido de sal disuelta. Posteriormente, las mejoras en la medición de la conductividad eléctrica dieron preferencia a usarla como medida de la salinidad por encima de otras técnicas utilizadas anteriormente. Debido a esto se desarrolló una nueva definición de salinidad en la que esta pasa a ser una cantidad adimensional escrita como PSU o UPS (que se refiere a las siglas en inglés para Practical Salinity Units). En esta

escala, por definición se sugiere que el estándar de agua marina debería de tener una conductividad, y el mismo contenido iónico que la correspondiente al agua de Copenhague. Entonces, se define la salinidad de todas las aguas en términos del ratio de conductividad derivada del estudio de las disoluciones en el agua marina estándar (la llamada agua de Copenhague). Se puede concluir que esta escala de salinidad resulta, por tanto, diferente de la medida absoluta de la salinidad definida en términos de masa total de sal en un kilogramo de disolución (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014). Se puede agregar que en cuanto a los sistemas de medida de la conductividad instalados en los perfiladores CTD contemporáneos, estos registran la conductividad directamente ya que tienen tiempos de respuesta rápidos. Actualmente, los CTDs usan electrodos en vez de sensores inductivos para medir la conductividad, de la cual se deriva la salinidad, a partir de una función que incluye también las medidas de presión y temperatura. Técnicamente, la diferencia de voltaje se mide entre los elementos conductivos en el circuito puente de la célula conductiva. La principal ventaja del sensor conductivo es que tiene mayor precisión y mejora notablemente en los tiempos de respuesta (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

#### **1.3.1.3. Presión**

Existe una relación directamente proporcional y prácticamente lineal entre la presión hidrostática  $p=p(z)$  y la profundidad geométrica, esta relación es tal que: la presión expresada en decibares es prácticamente igual al valor numérico de la profundidad expresada en metros. Cabe recalcar que la validez de esta aproximación depende de la profundidad a la que se trabaje, pero para la mayor parte de las aplicaciones el error es despreciable (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014), adicionalmente, se puede indicar que para las profundidades de trabajo en el campo de la ingeniería costera es tan insignificante el error que puede ser despreciado de tal manera que el valor de la presión hidrostática puede ser convertido directamente a la profundidad geométrica. Como resultado de esto, la mayoría de instrumentos basan la medida de la profundidad en la medida de la presión hidrostática. Dependiendo de los equipos, existen ciertas técnicas que permiten el registro continuo de la presión hidrostática mientras que otras permiten únicamente un registro discreto de la profundidad en ciertos puntos (Crespo Muñoz, D. 2014).

Finalmente, de acuerdo a windows2universe (2020) un CTD registra la presión usando un monitor de presión por deformación, o un medidor de presión digital de cristal de cuarzo. La presión generalmente se registra en decibares, y debido a que la profundidad y la presión están relacionadas directamente, una medida en decibares puede ser convertida en metros de profundidad. Ventajosamente, la presión en decibares, es prácticamente la misma a la profundidad en metros . Es decir, una presión medida de 100 decibares es equivalente a 100 metros de profundidad. El CTD puede medir presión, con un margen de error de aproximadamente 1%.

#### **1.3.1.4. Densidad**

La densidad del agua del mar está condicionada por la temperatura (T), salinidad (S) y presión (p). Así, la densidad del agua del mar no se mide de forma directa, sino que debe de ser calculada a partir de la ecuación de estado y con valores de temperatura, salinidad y presión necesariamente conocidos. De forma general y como se puede deducir de la ecuación de estado, la densidad aumenta cuando la temperatura desciende, e igualmente aumenta con el aumento de salinidad y presión (Knauss, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

#### **1.3.2. Equipos de medición de temperatura, conductividad y densidad (CTD)**

De acuerdo a Crespo Muñoz, D. (2014) la caracterización de la columna de agua y en general en el estudio de la oceanografía física es la medida y registro de las magnitudes físico-químicas más importantes del agua marina. Los parámetros que se registran con mayor frecuencia son: temperatura, salinidad, profundidad y densidad. De todas ellas, la densidad no puede ser medida de manera directa y por lo que es necesario calcularla mediante la ecuación de estado a partir de las otras magnitudes físicas enumeradas anteriormente. Así, la medida precisa de la temperatura, salinidad y profundidad se vuelve especialmente relevante. La medida in situ de estas propiedades se hace de forma directa o indirecta según la propiedad física que se desea registrar. Así, el valor de la presión determina indirectamente la profundidad y la conductividad determina indirectamente la salinidad, mientras que la temperatura puede medirse directamente.

Todas las mediciones de los parámetros anteriormente descritos son posibles gracias al desarrollo de los equipos llamados CTD (siglas de las palabras inglesas Conductivity, Temperature y Depth) que se componen de diferentes sensores (según la propiedad física medida) y que permiten la toma de datos continua. La herramienta primaria para determinar las propiedades físicas esenciales del agua del mar son los perfiladores CTD. Estos equipos permiten obtener in situ la distribución vertical y variación de la temperatura, la salinidad y la densidad del agua marina (WHOI, 2007 en Crespo Muñoz, D. 2014) a partir de la medida también de la profundidad. Es oportuno recalcar que, aunque los sistemas CTD se diseñaron para reemplazar las muestras embotelladas a distintas profundidades y permitir un registro continuo de las propiedades del agua, es posible utilizar la toma de muestras discretas a diferentes profundidades para la calibración in situ de los equipos de medición o sensores que integran el CTD (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014). Así, para la colecta de las muestras de agua, los CTD pueden utilizarse en conjunto con botellas multimuestreadoras fijadas a una rueda roseta de metal situada en el final del cable conductor/transmisor del CTD y que permite mediante control remoto encerrar selectivamente muestras discretas de agua a diferentes profundidades, estas profundidades usualmente con las estandarizadas (0, 10, 30, 50, 75, 100, 300, 500, 750 y 1000 m) (WHOI, 2007 y Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014). Una campaña completa de toma de datos de un CTD estándar, dependiendo de la profundidad a la que se sumerja, puede requerir entre 2 y 5 horas (WHOI, 2007 en Crespo Muñoz, D. 2014).

### **1.3.3. Corrientes**

Adicionalmente, se definen los parámetros físicos de medición de corrientes como: la velocidad medida y la dirección como un ángulo referenciado geográficamente. Es necesario definir la posición geográfica en que se realizan los registros de las corrientes (Estaban, 2004 en Crespo Muñoz, D. 2014) para de esta forma poder representarlos espacialmente.

En el campo de la oceanografía uno de los mayores avances modernos es el desarrollo de equipos con capacidad de autoregistrar de manera fiable las corrientes, y es consecuencia, en parte, del desarrollo de los sistemas de medida y

grabación electrónica que permite registrar grandes volúmenes de datos en la toma de muestras extensas (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Las corrientes se pueden medir desde dos perspectivas diferentes: i) euleriana, y ii) lagrangiana, siendo la diferencia entre ambas la posición del equipo que realiza las mediciones de la corriente. Es decir, la medición Euleriana se lleva a cabo desde una posición fija, anclando el equipo, situado ya sea en la superficie, de forma subsuperficial o en el fondo marino; mientras que en la medición Lagrangiana, el equipo de registro está libre de manera que pueda seguir el recorrido de parcelas individuales de agua. (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Como dato referencial de magnitudes de corrientes de acuerdo a Collins, et al (2013) son de alrededor de 0.38 m/s con predominancia de un flujo hacia el noreste.

#### **1.3.3.1. Equipos medidores de corrientes**

Los Acoustic Doppler Current Meters conocidos por las siglas ADCM, son un tipo de correntómetro acústico que mide velocidad y dirección de la corriente a partir de la transmisión de ondas de sonido de alta frecuencia y determinando el cambio de frecuencia (efecto Doppler) de la señal de retorno que se ha dispersado por el conjunto de elementos dispersivos del agua. En otras palabras, puede decirse que los equipos Doppler emiten una frecuencia conocida y escuchan para encontrar los cambios en la frecuencia del eco. Esta técnica se basa asumiendo dos cosas: i) el sonido es reflejado y/o dispersado cuando encuentra cambios en la densidad del medio por el que se propaga y, ii) a frecuencia del sonido reflejado aumentada o disminuye de forma directamente proporcional al valor en que los elementos de dispersión se acercan o se alejan del equipo. (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Por otro lado, los equipos acústicos que poseen tecnología Doppler permiten obtener la serie temporal del flujo medio en una cantidad de capas determinadas a varias profundidades en una sola toma (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014) debido a esto reciben el nombre de perfiladores de corrientes, abreviado como ADCP por sus siglas en inglés Acoustic Doppler Current Profilers. Se puede comprender la idea de las diferentes capas en que queda dividida la columna del

agua por encima (o debajo) del equipo que corresponde al esquema de un perfilador acústico Doppler con almacenamiento interno de los datos.

Los ADCP estándar de banda estrecha de manera general tienen tres o cuatro transductores diferentes orientados con una configuración que recibe el nombre de Janus (dios romano que tenía la habilidad de mirar hacia adelante y hacia atrás en el mismo instante) y con los haces acústicos apuntando en un ángulo de entre 20° y 30° respecto al plano en el que se sitúan los diferentes transductores que deben estar referenciados con respecto a los ejes X, Y y Z. Además, para un equipo ADCP que emita un pulso acústico fijado de pocos milisegundos, el cambio de frecuencia ( $\Delta f$ ) de la señal de vuelta es proporcional a la componente de velocidad relativa a lo largo del eje de la señal acústica de vuelta ( $v \cdot \cos\theta$ ) entre los elementos de dispersión/reflectantes y la cabeza de los transductores-receptores (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Siendo más específicos, debido a que la instrumentación sólo puede “ver” o recibir información a lo largo de los ejes perpendiculares a un transductor concreto, y no a través de ellos, deben de aplicarse funciones trigonométricas a las velocidades registradas para transformarlas y deducirlas en todos sus componentes (X, Y, Z). Así, los ADCP calculan la velocidad relativa al equipo combinando los valores de cambio de frecuencia observados a lo largo de los ejes de los diferentes pulsos, y después registra las componentes de velocidad absoluta en coordenadas referenciadas (este-oeste y norte-sur), mediante las medidas del compás magnético interno (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Las velocidades de las distintas capas registradas cada vez que se emite un pulso acústico se promedian para dar el registro que se almacena en la memoria del equipo, de manera que se reduce la cantidad de procesos y datos que almacena (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Por lo que respecta a las frecuencias con las que se configuran los equipos ADCP, cabe señalar que, cuanto más alta sea la frecuencia, menor será la profundidad a la que el equipo puede trabajar, pero mayor es la capacidad que tiene el equipo para resolver la estructura de la velocidad. Dicho esto, se puede señalar que, suelen utilizarse frecuencias de entre 75 y 150 kHz para medidas en profundidades

comprendidas en un rango de 0 a 500 metros, mientras que en el rango de profundidades más superficial entre 25 y 50 metros es más favorable utilizar frecuencias más altas, de entre 600 y 1200 kHz (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Adicionalmente, existe una zona que no debe de tenerse en cuenta a la hora de interpretar los datos, se denomina zona de blanco (blanking zone). La mínima distancia de blanco está determinada por la frecuencia emitida, pero se pueden dar valores mayores (Emery & Thomson, 1997 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Según Crespo Muñoz, D. (2014) a pesar de ventajas ofrecidas por este tipo de correntómetros existen algunos factores que limitan la precisión en la toma de medidas de los ADCP, estas limitaciones se detallan a continuación:

- La precisión en la medición mediante el software instalado en el equipo y depende fuertemente de la proporción señal/ruido y de la distribución de velocidades de los elementos de dispersión/reflectantes.
- El tamaño del área en que se toman las mediciones y la homogeneidad del campo de velocidad de las corrientes. En los bins más alejados del transductor, la separación espacial entre los volúmenes de agua que se muestrean con pulsos acústicos salidos de transductores opuestos podría ser tan grande que estuvieran viendo diferentes partes de la columna de agua.

#### **1.3.4. Cambio Climático**

En consecuencia, se puede indicar en primera instancia de manera general que el Cambio Climático de acuerdo al IPCC (2013) está definido como “Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo”. Adicionalmente, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como

“cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. Es importante indicar que la CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales”.

De acuerdo a Collins, M, et al. (2010) la región del Pacífico bajo la influencia del calentamiento global probablemente sufrirá cambios significativos, entre ellos se espera que los vientos alisios tropicales del este se debiliten; temperaturas superficiales (TSM) se calienten más rápido cerca del ecuador y más lentamente más lejos; se espera que baje la termoclina ecuatorial que marca la transición entre el océano superior mezclado con el viento y las capas más profundas; y se espera que los gradientes de temperatura en la termoclina se vuelvan más pronunciados.

Adicionalmente, Ruperti, H., Carroll, D., & Breaker, L. (2015) indica que la variabilidad en la TSM aumenta a medida que nos alejamos de la costa y hacia el sur. A medida que la velocidad del viento aumenta de forma temporal en la costa de Ecuador, la transferencia de energía cinética turbulenta de la atmósfera al océano se incrementa considerablemente.

Sachs, J. P., & Ladd, S. N. (2010) indica que bajo el escenario que los gases de efecto invernadero sigan incrementándose a futuro, y de que el planeta en su totalidad seguramente se calentará como resultado, se supone que la oceanografía y el clima de Galápagos cambiarán también.

De acuerdo a Sachs, J. P., & Ladd, S. N. (2010) los mayores cambios probablemente incluirán elevación de la temperatura de la superficie del mar, continuación de los eventos de El Niño y La Niña (algunos de los cuales serán más intensos), una elevación del nivel del mar en varios cm, un incremento de la precipitación, un decremento del pH de la superficie del océano, y una reducción en las corrientes ascendentes.

Por otro lado, Sachs, J. P., & Ladd, S. N. (2010) indica que probablemente los impactos que se podrían registrar en Galápagos podrían ser elevación de la temperatura de la superficie del mar, intensificación de los eventos de El Niño y La



Niña, elevación del nivel del mar en varios cm, incremento de la precipitación, decremento del pH de la superficie del océano, y una reducción en las corrientes ascendentes. Adicionalmente, indica que estos cambios probablemente alterarán los ecosistemas marinos y terrestres de Galápagos en modos difíciles de predecir.

Finalmente, Ruperti, H., Carroll, D., & Breaker, L. (2015) concluye que, si bien existe un cierto grado de conocimiento general sobre los posibles impactos del cambio climático en los ecosistemas marinos, resulta primordial entender que las vulnerabilidades al cambio climático y sus consecuentes efectos negativos afectan en diferentes escalas a todos por igual. Para lo cual, recalca que existe apremio para alcanzar un mayor conocimiento que permita mejorar la capacidad de adaptación y productividad de los ecosistemas marinos.

### **1.3.5. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**

En PNUD (2020) de sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos, existe el Objetivo 14, el cual trata específicamente sobre Vida Submarina, en donde recalcan la importancia de los océanos en todo el mundo, se indica que su temperatura, composición química, corrientes y vida son de suma importancia en los sistemas globales que hacen que el planeta sea un lugar habitable. En como gestionamos este recurso nos ayudara para contrarrestar los efectos del cambio climático.

Analizando los datos que nos entrega PNUD (2020), sobresale que existen más de 3.000 millones de personas que dependen de la biodiversidad marina y costera. El problema con esto es que se estima que el 30% de las poblaciones de peces del mundo está sobreexplotado, siendo esto una amenaza para la sostenibilidad de los recursos.

Adicionalmente, PNUD (2020) indica en sus datos que los océanos absorben alrededor del 30% del dióxido de carbono generado por las actividades humanas, y por este motivo se ha registrado un 26% de aumento en la acidificación de los mares desde el inicio de la revolución industrial.

Contextualizando los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se puede sugerir que generan un marco para ordenar y proteger de manera sostenible los ecosistemas

marinos y costeros de la contaminación, así como para abordar los impactos de la acidificación de los océanos, objetivo principal del presente trabajo.

CEPAL (2018) muestra un enfoque más regional, sin embargo, sostiene el mismo argumento del PNUD (2020) indicando que los océanos del mundo —su temperatura, química, corrientes y vida— mueven sistemas mundiales que hacen que la Tierra sea habitable para la humanidad. Adicionan que, la correcta gestión de este recurso mundial esencial es una característica clave del futuro sostenible.

Como se mencionó anteriormente, el ODS 14 trata específicamente sobre la vida marina, y entre sus 10 metas, la meta 14.3 indica lo siguiente “Minimizar y abordar los efectos de la acidificación de los océanos, incluso mediante una mayor cooperación científica a todos los niveles”.

Gil (2018) menciona que los ODS adoptados por las Naciones Unidas en 2015 contienen la agenda global ambiciosa aprobada por la comunidad internacional en torno a objetivos comunes. Dentro de su análisis, señala que, si bien se proponen luchar contra la pobreza extrema, integran y equilibran tres dimensiones esenciales del desarrollo sostenible como son la económica, la social y la ambiental. Esto se convierte en una valiosa hoja de ruta para articular la formulación de políticas a todo nivel. Sin embargo, también indica que la arquitectura compleja de los ODS, sus limitaciones técnicas y las críticas de la comunidad internacional proyectan importantes retos para que esta novedosa agenda pueda alcanzar los objetivos previstos de construir un planeta mejor para las generaciones venideras.

#### **1.3.6. Acidificación Oceánica**

Se puede resaltar que Cazar Cadena, S. I. (2015) y González-Delgado & Hernández (2018) indican que el incremento de los niveles de CO<sub>2</sub> no solo causa aumento de la temperatura de la atmósfera, sino que también es responsable del cambio en la química del carbono inorgánico incorporado al mar (el mar es considerado el sumidero más grande del planeta), dando lugar al proceso denominado acidificación oceánica. Por otro lado, se asegura que el descenso de los valores de pH oceánico está bien documentado; Stocker, *et. al.* (2013) en el informe del IPCC concluye que el pH del agua de mar superficial ha descendido 0.1 unidades desde el comienzo de la era industrial. Esta diferencia de 0,1 unidades puede parecer pequeña, pero la

escala de pH es logarítmica, por lo que una disminución de 0,1 representa un aumento en la concentración de hidrogeniones del 26%.

Adicionalmente, González-Delgado & Hernández (2018) indica que lo que ha resultado en lo que ahora conocemos como acidificación oceánica (AO), está produciendo cambios en los ecosistemas marinos. Hasta hace poco, la mayor parte de la investigación en AO se había realizado en laboratorio a pequeña escala, utilizando variables controladas y especies con pocas etapas del ciclo de vida. Estas limitaciones plantean preguntas sobre el funcionamiento real de un ecosistema sometido a estas condiciones.

De acuerdo a Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) se pueden enumerar tres temas claves entorno a la importancia de estudiar la AO. i) Puede conducir a un desequilibrio ácido-base en muchos organismos marinos, como los peces, invertebrados y fauna de sedimentos, ii) El desequilibrio ácido-base puede conducir a la supresión metabólica, reducción de la síntesis de proteínas y reducción en forma física a largo plazo, y; iii) algunas especies pueden modificar la asignación energética para compensar el aumento de los costos energéticos de AO.

Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) indica que se han hechos esfuerzos internacionales dirigidos a ampliar y complementar programas existentes para abordar más explícitamente la acidificación de los océanos y sus impactos, con mayor atención a los mares de plataforma y las regiones costeras. La Red Global de Observación de Acidificación Oceánica recientemente establecida (GOA-ON). GOA-ON tiene como objetivo proporcionar una comprensión de la acidificación del océano condiciones y la respuesta del ecosistema, así como para entregar los datos necesarios para optimizar el modelado de acidificación del océano. Hasta la fecha, la mayoría de las observaciones de acidificación de los océanos se han basado en barcos. Sin embargo, se espera que se utilicen cada vez más los sensores de pH en los flotadores de perfilado y el uso de planeadores submarinos.

Adicionalmente, Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) indica que los factores físicos, geoquímicos y biológicos pueden contribuir a la variabilidad natural del pH, particularmente en los mares costeros y costeros. Así mismo,

características hidrodinámicas de meso escala, vientos, mareas, helo marino estacional y los gradientes de temperatura localizados (debido a características frontales y estratificación) que afectan directamente la solubilidad del CO<sub>2</sub>, por lo tanto, el pH (Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2014).

Los procesos biológicos de fotosíntesis y respiración / descomposición respectivamente absorben y liberan CO<sub>2</sub>; ambos procesos varían con la profundidad y generalmente son de mayor magnitud y variabilidad en mares poco profundos que en mar abierto. Los cambios que afectan el pH ocurren durante los ciclos día-noche y estacionalmente; así como localmente, debido al suministro variable de nutrientes y las interacciones biológicas que pueden promover la formación de parches en las comunidades planctónicas (Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2014).

En algunos sitios costeros (y también en lugares de aguas profundas tectónicamente activos), los respiraderos de CO<sub>2</sub> o metano pueden causar reducciones dramáticas de pH localizadas (Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2014).

Los aportes atmosféricos de compuestos de nitrógeno y azufre producidos por la quema de combustibles fósiles y por la agricultura también pueden influir en el pH y la química del carbono cerca de las regiones de origen (Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2014).

Castillo-Briceño & Navarrete-Mierb, F (2015) indican que el aumento de acidez de los océanos podría generar impactos en: i) alteraciones en redes tróficas, ii) pérdida de hábitats, iii) cambios en comunidades y ecosistemas marinos, iv) extinción de especies, v) disrupción en fisiología de organismos; lo cual, tendría repercusiones en sector socioeconómicos importantes como: i) pesca, biodiversidad, acuicultura, soberanía alimentaria.

El documento de Castillo-Briceño & Navarrete-Mierb, F (2015) sugiere que la AO por dióxido de carbono antropogénico representa un riesgo tanto para los ecosistemas marinos como para los costeros del Ecuador y los servicios que estos proveen. Sin embargo, el alcance del problema no ha podido ser calculado aún con precisión porque no existen investigaciones concretas, permanentes y continuas sobre AO en

el contexto propio de Ecuador, ni datos de los cuales desarrollar estrategias de mitigación de los impactos negativos esperables. Es por esto que, conociendo el alto costo que ha tenido para otros países esta problemática, la implementación de un programa de investigaciones que genere información relevante para el Ecuador sobre la AO constituye una inversión y una necesidad urgente en el contexto nacional.

#### **1.3.7. Lugares acidificados naturalmente en el mar**

Actualmente, Roca Redonda es uno de los pocos lugares registrados a nivel mundial que presenta acidificación natural y que permite ser estudiado para poder tener una idea de cómo funciona el ecosistema. Como conocimiento general los lugares identificados con acidificación natural a nivel mundial son:

**Tabla 1.** Lugares acidificados naturalmente a nivel mundial

| <b>País</b>                  | <b>Lugar Referencial</b>     | <b>Breve descripción</b>  | <b>Latitud</b> | <b>Longitud</b> | <b>Fuente</b>                   |
|------------------------------|------------------------------|---|----------------|-----------------|---------------------------------|
| Japón                        | Islas Iwotorishima y Shikine | Se encuentra en el mar de Filipinas al sur de Tokio. Catalogada como un volcán activo. La isla continúa en erupción bajo el agua.                 | 30.48          | 140.30611       | Yamamoto, Shoji. (2018)         |
| Japón                        | Isla Shikine                 | Es una isla volcánica ubicada en las islas Izu, forma parte del Parque Nacional Fuji-Hakone-Izu.  | 34.325         | 139.21451       | Yamamoto, Shoji. (2018)         |
| Italia                       | Ischia                       | Isla volcánica del mar Tirreno, situado a la entrada del golfo existente en el extremo septentrional de Nápoles, en la Campania, Italia.          | 40.731         | 13.9627         | Foo, et al. (2018).             |
| Italia                       | Vulcano                      | Vulcano es una isla italiana perteneciente al archipiélago de las islas Eolias, en Sicilia. Se ubica a unos 25 km al norte de la isla de Sicilia, | 38.393         | 14.97432        | Celis-Plá, et al. (2015).       |
| España                       | Isla El Hierro, Canarias     | Segunda isla más pequeña y más lejana al sur y al oeste de las Islas Canarias   | 27.635         | -17.977913      | Santana-Casiano, et al. (2018). |
| Ecuador                      | Roca Redonda, Galápagos      | Islote situado al norte de la Isla Isabela  | 0.2748         | -91.623039      | El presente estudio             |
| Nueva Guinea                 | Papua                        | D'Entrecasteaux Islands, Milne Bay Province, Papua New Guinea   | -9.824         | 150.81783       | Baylis, et al. (1997).          |
| Nueva Zelanda                | Wellinton                    | Capital de Nueva Zelanda, costa sur   | -41.35         | 174.78621       | Cornwall, & Eddy. (2015).       |
| San Vicente y Las Granadinas | San Vicente y Las Granadinas | Islas situadas en el Caribe, al norte de Venezuela  | 12.628         | -61.378222      | Enochs, et al. (2020).          |

Elaborado por: Mario Hurtado D.

Debido a la conocida actividad volcánica existente en Galápagos es relativamente fácil de suponer la existencia de fumarolas que aporten diverso tipo de minerales o gases al mar. De acuerdo a Haymon, R.M., et al. (2007) los primeros respiraderos hidrotermales se descubrieron en 1977 en un sitio denominado Rose Garden a 1000 m de profundidad también en Galápagos. El mismo documento indica que estas fumarolas son alimentadas por el magma de los volcanes de las Islas Galápagos.

Con todos estos antecedentes, se vuelve importante entender a fondo las dinámicas físicas marinas y su influencia en el ecosistema de Roca Redonda para así aportar con información valiosa a la ciencia y tomadores de decisión ya que nos ayudaría a proyectarnos y hacer escenarios futuros. Este ecosistema está influenciado por varios elementos, entre ellos: físicos como: temperaturas, salinidad, densidad, corrientes, entre otros; químicos: nitritos, nitratos, fosfatos, entre otros; y biológicos: fitoplancton, zooplancton, ictioplancton, peces, crustáceos, equinodermos, moluscos, entre otros.

### **1.3.8. Galápagos**

Spalding, et al, KD (2007) realizó una clasificación mundial basado en información de todo el mundo para poder determinar bioregiones, en Galápagos se han determinado tres bioregiones: i) Región Norte de las Islas Galápagos, ii) Región Este de las Islas Galápagos, y iii) Región Oeste de las Islas Galápagos (Figura 1 en Anexo 1). Adicionalmente a esto, se puede sumar las bioregiones especificadas por Dirección del Parque Nacional Galápagos. (2014) las cuales son las siguientes: i) Lejano Norte, ii) Elizabeth, iii) Oeste, iv) Norte, y, v) Central sureste

Eden, C. y Timmermann, A. (2004) indica en sus conclusiones que las Islas Galápagos imponen una barrera topográfica tanto para la Corriente Ecuatorial Sur (SEC) como para la Subcorriente Ecuatorial (UEC). En particular, durante la segunda mitad del año, el efecto de las islas es más pronunciado.

Eden, C. y Timmermann, A. (2004) detalla que la SEC se bifurca en el lado oriental de las Islas, creando así un patrón de corrientes del Este débiles al oeste de las Islas. Las anomalías de flujo muestran valores de 15 cm/s en las cercanías de las Islas con una extensión zonal y meridional de 2000 km y 600 km respectivamente. Adicionalmente, Dirección del Parque Nacional Galápagos. (2014) indica que la

SEC que se dirige con diferente intensidad sobre las islas a lo largo del año, recalcando que el ramal norte se caracteriza por tener mayor intensidad que el ramal sur.

Las Galápagos protegen a la EUC de la costa sudamericana, a excepción de un pequeño apéndice persistente de la EUC al norte del ecuador, que puede llegar a la costa en invierno boreal. El efecto directo de este blindaje son anomalías de flujo al este de las Islas de hasta 70 cm/s (Eden, C. y Timmermann, A. 2004). Además, se puede observar un desplazamiento hacia el sur de toda la cuenca de la EUC como un efecto de las islas (Eden, C. y Timmermann, A. 2004).

La convergencia de la EUC en el este de Galápagos tiene un efecto de incremento en la surgencia con posibles implicaciones en el sistema (Jiménez, 1981). Según Eden, C. y Timmermann, A. (2004), la surgencia induce fuertes anomalías negativas de Temperatura Superficial del Mar (SST) al oeste de las islas, y de señales opuestas a lo largo de la costa ecuatoriana y peruana.

Eden, C. y Timmermann, A. (2004), indica que la bifurcación de la SEC y la surgencia EUC al oeste de las islas crea una zona de cizallamiento meridional más fuerte de la corriente zonal al norte y al oeste de Galápagos que favorece la generación de Ondas de Inestabilidad Tropical (TIW) debido a una inestabilidad barotrópica (como respuesta al cizallamiento). El impacto a gran escala de las Islas se da por un patrón estacionario similar a una onda, modulando la intensidad de las TIW al norte del ecuador hasta en un 25%. Así mismo, Sweet et al. (2009) hace un análisis de las TIW indicando que afecta en los valores de TSM, corrientes meridionales y la isoterma de 20 °C (termoclina), aseverando que existe una respuesta biológica significativa dentro del archipiélago que se ve reflejada en los valores de clorofila mostrando un aumento en > 30% por encima de las concentraciones medias de 1998-2007 y así mismo coinciden con las temperaturas más frías, finalmente indica que la corriente ascendente inducida por TIW sobre la plataforma de la isla trajo más aguas ascendentes enriquecidas con hierro a la zona eufótica.

Definiendo las corrientes marinas se pueden establecer como los movimientos de masas del agua del mar, pueden ser transitorias, afectando a una zona pequeña y



tienen condiciones particulares o corrientes litorales (Estaban, 2004 en Crespo Muñoz, D. 2014).

Humphreys, AF, et al. (2018) indica que es importante identificar lugares de aguas poco profundas para centrar investigaciones que contengan gradientes oceanográficos naturales con el fin de ayudar a predecir los efectos de los estresores antropogénicos en ambientes de carbonato.

Humphreys, AF, et al. (2018) identifica el archipiélago de Galápagos como una cadena de islas en el Pacífico ecuatorial oriental, que posee gradientes naturales de nutrientes, pH y temperatura debido a la interacción de varias corrientes oceánicas importantes.

En Galápagos, parecería ser que las anomalías positivas repetidas de temperatura podrían ser responsables de la baja densidad de foraminíferos, mientras que los nutrientes crónicamente altos, la baja saturación de aragonita y pH bajo, junto con anomalías negativas, probablemente inhibieron la recuperación de los organismos.

De acuerdo a Humphreys, AF, et al. (2018), existe correlación inversa entre la riqueza y la abundancia de foraminíferos en cada isla de recolección, esto estuvo de acuerdo con estudios previos sobre foraminíferos en ambientes con alto contenido de nutrientes y bajo pH. Por ejemplo, los grupos de foraminíferos bentónicos a lo largo de un transecto de valores de pH decrecientes (comparables a los valores de pH en Galápagos) cerca de las filtraciones de CO<sub>2</sub> natural en Papua Nueva Guinea mostraron una caída en la abundancia antes de una disminución en la diversidad.

También se sabe que el pH bajo tiene un efecto perjudicial adicional sobre la función metabólica de algunas especies. Por ejemplo, en un estudio sobre la influencia de la reducción del pH en la tasa de crecimiento de foraminíferos como *Marginopora rossi*, Reymond, et al., informaron una reducción drástica en el crecimiento a través de la disolución e inhibición de la calcita precipitada en el sitio de calcificación. Además, las tasas de fotosíntesis en esta especie disminuyeron a lo largo de un gradiente de pH decreciente, incluso a valores de pH similares a los observados en el sur del archipiélago de Galápagos (Humphreys, AF, et al. 2018)

De acuerdo a Doo, S.S., et al. (2019) el antropoceno se define en gran medida por un rápido aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico, que causa el cambio climático global (calentamiento) y la acidificación de los océanos (OA, una reducción del pH oceánico), motivo por el cual es importante el seguimiento de los parámetros indicadores de estos cambios.

Sachs, J. P., & Ladd, S. N. (2010) indica que, a partir del 2007, no se encontró una tendencia perceptible en la temperatura de la superficie del mar (TSM) en la región de Galápagos desde el comienzo de la Revolución Industrial (Smith et al. 2008). Tampoco hubo ninguna tendencia en las TSM locales en la Isla Santa Cruz en Galápagos en los últimos 44 años (Wolff 2010).

De acuerdo al IPCC (2007), el Pacífico ecuatorial, como lo indica el índice Niño 3 de TSM en la región de 90-150 ° W y 5 ° S-5 ° N, se ha calentado en 0.4-0.8 °C en los últimos 40 años, y se ha calentado a lo largo de los últimos 40 años. Se espera que la tendencia continúe durante el siglo XXI, y las mejores estimaciones indican 1–3 °C de calentamiento adicional.

La variabilidad decadal predicha en la TSM ecuatorial del Pacífico puede describirse mejor como predominantemente aleatoria con algo de memoria. Una de las variaciones decenal más prominentes, la Oscilación Decadal del Pacífico, puede no forzar cambios de temperatura, sino que simplemente podría ser el resultado de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Newman et al. 2003).

Sachs, J. P., & Ladd, S. N. (2010) indica que existe una clara necesidad de observaciones meteorológicas e hidrográficas, combinadas con una amplia difusión de datos, por lo que se pueden comparar las series de tiempo existentes de TSM y las condiciones meteorológicas.

Adicionalmente, Sachs, J. P., & Ladd, S. N. (2010) recalca que la investigación adicional debería centrarse en modelos de reducción de escala, especialmente los atmosféricos, mediante la inclusión de más miembros del conjunto (es decir, predicciones numéricas utilizando condiciones iniciales ligeramente diferentes), con la ayuda de investigadores de dinámica oceánica.

Finalmente, Sachs, J. P., & Ladd, S. N. (2010) sugiere que la calibración de proxies paleoclimáticos en condiciones modernas debería ser una parte integral de esto. Sin embargo, necesitamos una mejor comprensión de la dinámica e interacciones de las corrientes de Panamá y Humboldt con las Galápagos. Y en perspectiva del autor así mismo de la corriente de Cromwell.

Es por esto que, se fundamenta la importancia de realizar las campañas de medición en Galápagos usando un área acidificada naturalmente.

### **1.3.9. Roca Redonda**

Standish (1998), describe a Roca Redonda como un volcán principalmente submarino. Tiene una parte expuesta de 60 metros de altura sobre el mar nivel, y varios otros flujos están expuestos en la poca profundidad de agua que rodea el islote. Numerosas fumarolas que pueden tener un componente magmático están presentes en la zona submarina poco profunda (<30 m) e indican que el volcán probablemente todavía esté activo.

Por otro lado, se puede indicar de acuerdo a Glass, *et al* (2007) que Roca Redonda se encuentra a 30 km aproximadamente al norte de la isla Isabela, el cual se caracteriza por ser parte de un volcán activo que posee una zona somera en donde se puede observar burbujas provenientes de la actividad volcánica que se incorporan al mar. Existen trabajos que describen brevemente características del área, tales como, morfología, batimetría (Glass, et al, 2007), peces (Grove & Lavenberg, 1997) debido a que es una zona identificada para actividad pesquera, entre otros.

No existe mayor información que describa con detalle Roca Redonda, aunque existe información que reconoce su importancia pesquera y sus características morfológicas.



## CAPÍTULO II

### **2. Metodología**

La toma de datos y procesamiento de información de las variables oceanográficas correspondió con los estándares usuales para este tipo de medidas. Guías de CPPS y UNESCO para procesamiento de CTD; Dirección de Hidrografía y Navegación (2013) para corrientes y Disckon (2014) para las mediciones de pH. Luego, se usó estadística descriptiva para caracterizar los valores típicos de las variables oceanográficas en Punta Albemarle (control) y Roca Redonda (sitio acidificado naturalmente). Para poder explicar gráficamente la metodología que se va a utilizar en el presente documento, se ha elaborado el siguiente diagrama (Figura 1 y 2).

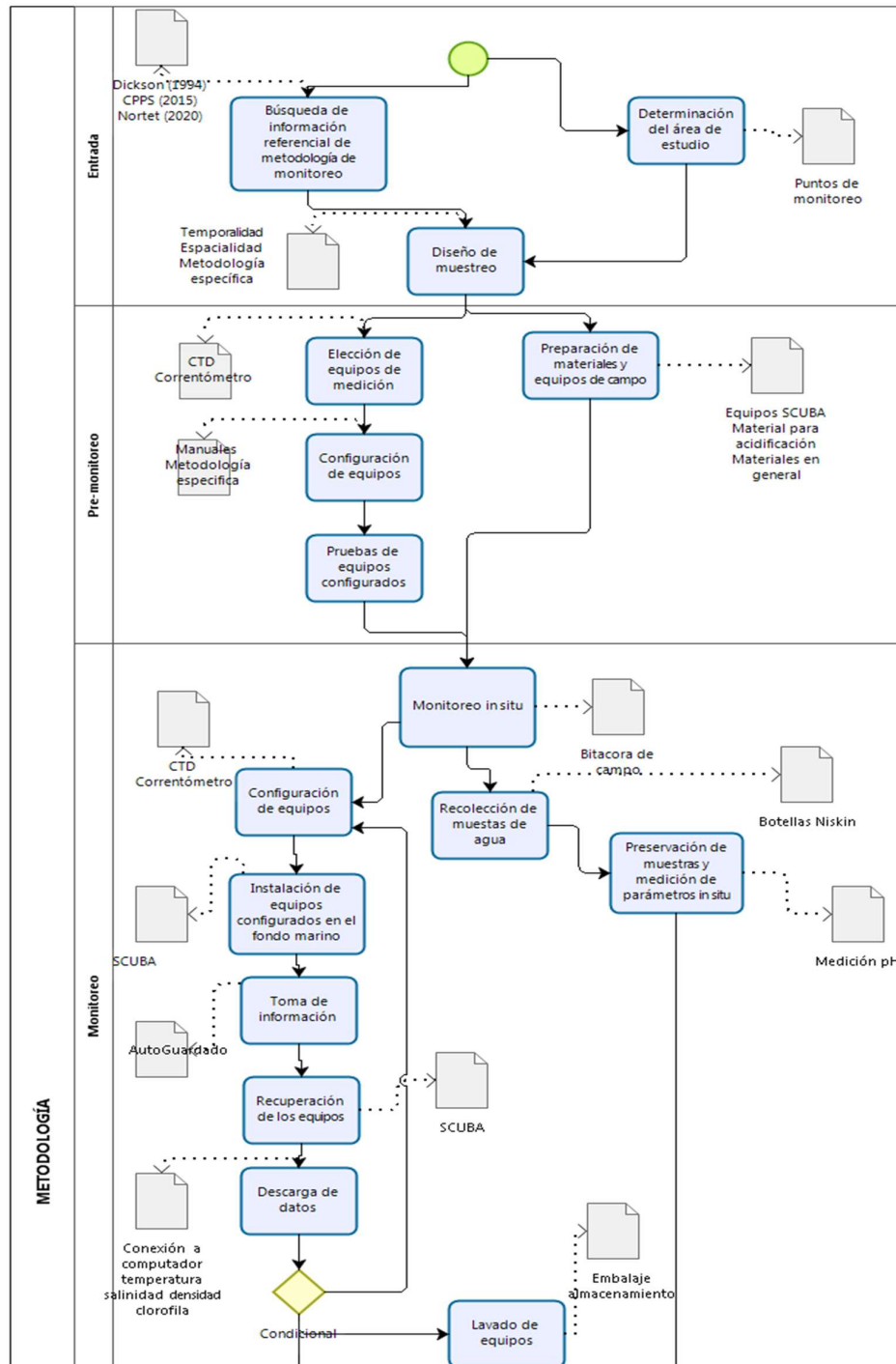


Figura 1. Flujograma resumen de la metodología empleada para la elaboración del presente documento (primera parte).

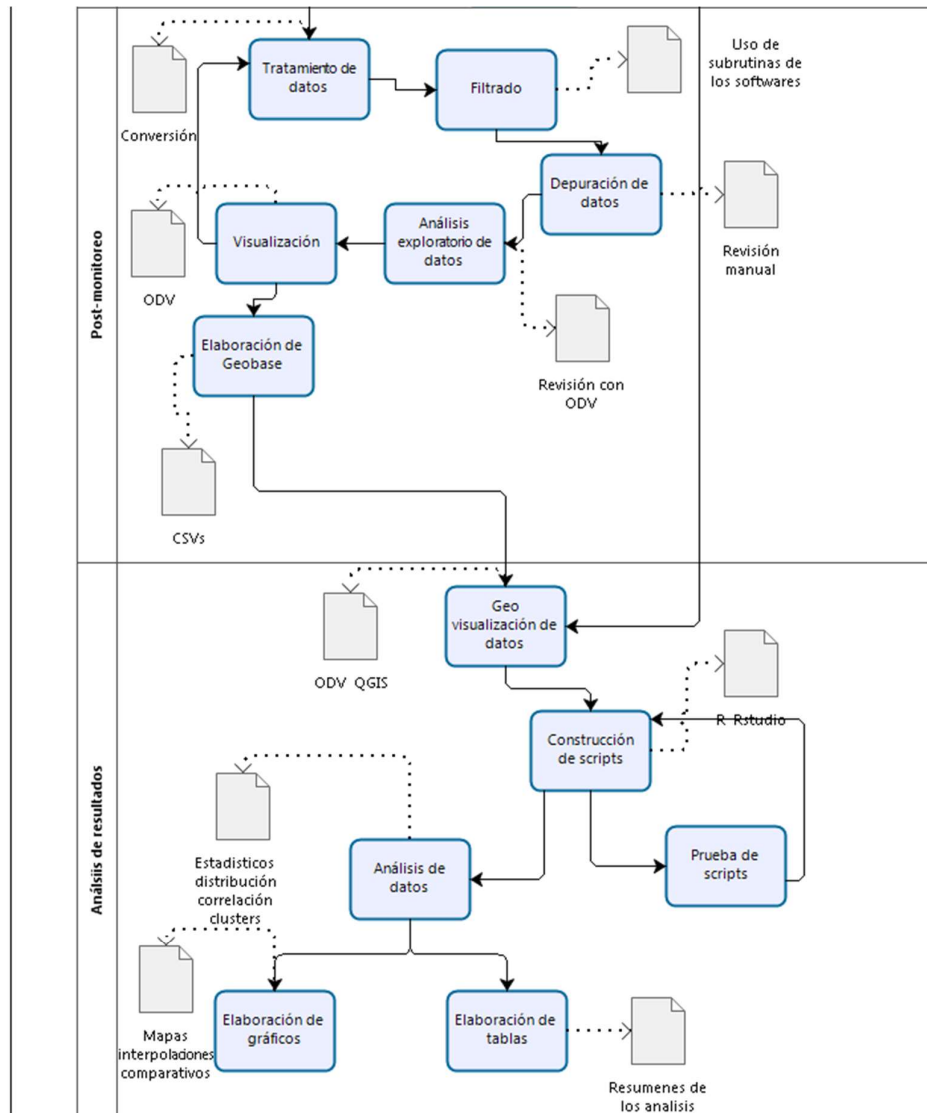


Figura 2. . Flujograma resumen de la metodología empleada para la elaboración del presente documento (segunda parte).

## 2.1. Fase Inicial

### 2.1.1. Información Referencial.

Como primer paso se establece la búsqueda de información referencial en todos los temas referentes al estudio, estos temas serán los siguientes:

- Monitoreo de variables oceanográficas: temperatura, salinidad, densidad, corrientes, pH, acidificación oceánica.
- Configuración de equipos oceanográficos
- Tratamiento de datos oceanográficos
- Visualización de datos oceanográficos

### 2.1.2. Determinación del Área de Estudio.

El área de estudio se encuentra en la provincia de Galápagos en Roca Redonda, ubicada al norte de la Isla Isabela, de igual forma el punto de control que se propone está ubicado norte de la Isla Isabela (Figura 3). Los dos puntos son independientes, con la premisa que en el punto de control no existe presencia de valores de pH por debajo de lo normal esperado para la zona de estudio.

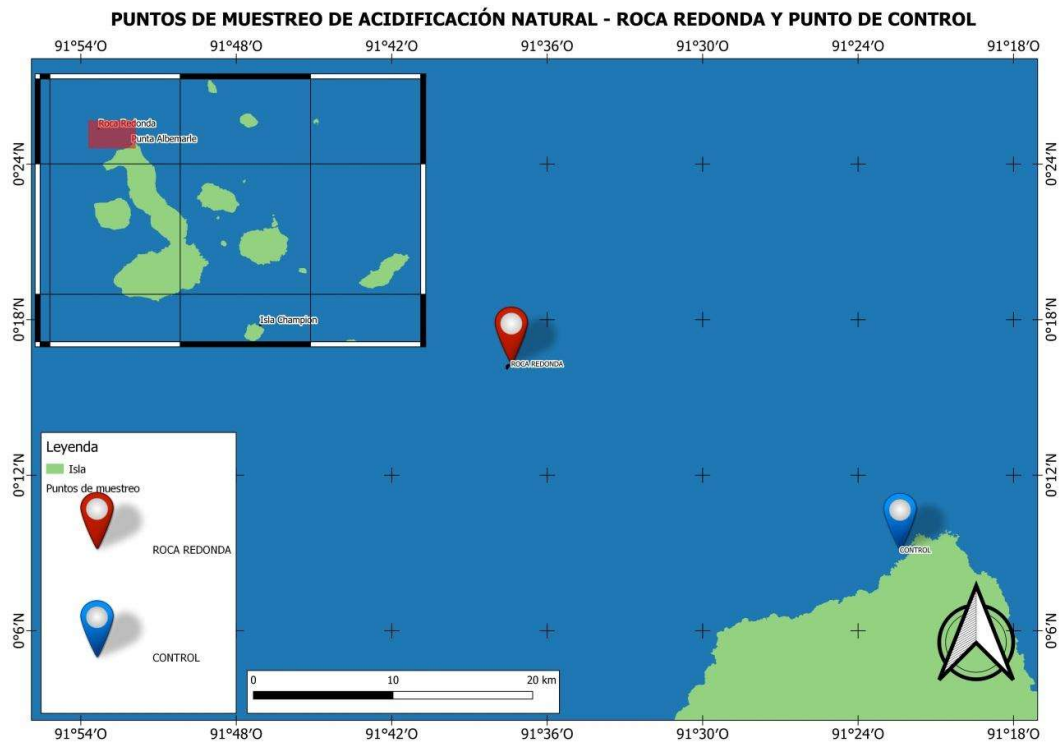


Figura 3. Vista General de los puntos de muestreo en Galápagos  
Fuentes: Sistema Nacional de Información. División Política



### 2.1.3. Diseño de muestreo

En el diseño de muestreo se plantea de tal forma que permita poder obtener información espacio-temporal del área de estudio, para poder explicar el funcionamiento del sistema oceanográfico en la zona.

#### 2.1.3.1. Espacialidad del estudio

- Se propone muestrear en Roca Redonda (al norte de Isabela) y control (Punta Albemarle), para la toma de parámetros oceanográficos físicos y de variables que permitan determinar la acidificación y además muestras biológicas (estas últimas no forman parte del presente estudio). Se plantea un punto central y puntos ubicados a 50 m en cada punto cardinal (norte, sur, este y oeste) como se puede ver en la Figura 4. Esta distribución de monitoreo permitirá establecer la distribución horizontal de la “pluma” del área acidificada y poder observar el alcance incluso de la “pluma”.

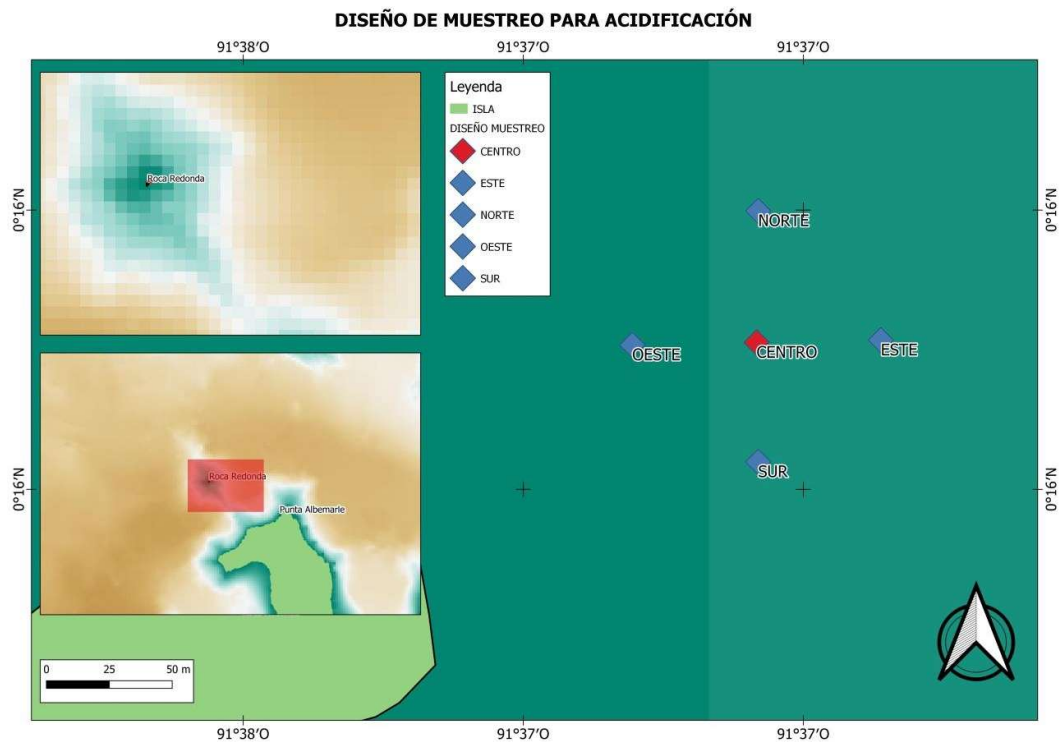


Figura 4. Diseño de muestreo para los puntos de monitoreo. (degradado de colores representa la batimetría de Galápagos).

Fuentes: Sistema Nacional de Información. División Política. Datos de campo.

### 2.1.3.2. Temporalidad del estudio

- Se tomaron datos en las dos épocas (lugar acidificado y control) en mayo (época cálida) y septiembre (época fría) del 2019. Cada sitio de muestreo se hizo en un día entero de trabajo y al siguiente día en el lugar acidificado (Roca Redonda). Como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Detalle de temporalidad en el muestreo**

|                                  | <b>Época cálida<br/>(mayo)</b> | <b>Época fría<br/>(septiembre)</b> |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| <b>Control (Punta Albemarle)</b> | 22 may 2019                    | 10 sep 2019                        |
| <b>Roca Redonda</b>              | 23 may 2019                    | 11 sep 2019                        |

## 2.2. Fase de Pre Monitoreo

### 2.2.1. Elección de los equipos de medición

Para la presente investigación se trabajó con los siguientes equipos:

- CTD Seabird 19 plus V2 con sensor de presión, temperatura, conductividad y fluorescencia.
- Correntómetro tipo ADCP marca Nortek con tecnología doppler para aguas poco profundas

### 2.2.2. Configuración de los equipos para pruebas

#### 2.2.2.1. CTD

El equipo CTD tiene la posibilidad de ser configurado de dos modos: “profile” o “moored”, para el presente documento se escogió la modalidad “profile” para asegurar tomar la mayor cantidad de datos posibles en todo el tiempo en que los equipos están bajo el agua.

Los equipos deben ser revisados mediante el software SEATERM 1.59 del equipo para comprobar si existe comunicación entre el equipo y el computador.

- Se debe verificar si se transmiten correctamente datos tanto de entrada y de salida en el equipo.

- Verificar el status del equipo en donde se puede visualizar la capacidad de memoria del equipo, las baterías, cantidad de archivos, configuración, entre otros.
- Se debe evaluar la cantidad de baterías a usarse para llevar a la salida de campo. Necesitan ser cambiadas dependiendo del voltaje que muestren para asegurar la toma continua de información.
- Colocar 9 baterías nuevas tipo D Alcalinas al equipo. Revisar el O-ring ubicado en la tapa y untar con grasa silicona y cierre bien para evitar que ingrese el agua a las partes electrónicas y dañe el equipo.
- Verificar los cables de interconexión se encuentren correctamente conectados sin dejar la posibilidad que se filtre el agua de mar (conectar usando grasa aisladora siliconada). También revisar los tornillos de seguridad que sujetan el equipo.

#### 2.2.2.2. Correntómetro

El correntómetro debe ser configurado cada vez que debe ser sumergido, dentro de los parámetros de configuración se debe especificar:

- Profundidad del sitio
- Salinidad referencial del sitio

**Tabla 3.** Parámetros de configuración del correntómetro AquaPro Version 1.36.06.

| Archivo de configuración del correntómetro |          |
|--|----------|
| Profile interval (s)                       | 600      |
| Number of cells                            | 20       |
| Cell size (m)                              | 1        |
| Blanking distance (m)                      | 1        |
| Measurement load (%)                       | 100      |
| Average interval (s)                       | 60       |
| Power level                                | LOW+     |
| Wave data collection                       | DISABLED |
| Compass upd. rate (s)                      | 600      |
| Coordinate System                          | ENU      |
| Speed of sound (m/s)                       | MEASURED |
| Salinity (ppt)                             | 35       |

|                        |          |
|------------------------|----------|
| Analog input 1         | NONE     |
| Analog input 2         | NONE     |
| Analog input power out | DISABLED |
| File wrapping          | OFF      |
| TellTale               | OFF      |
| Acoustic modem         | OFF      |
| Serial output          | ON       |
| Baud rate              | 9600     |

**Tabla 4.** Parámetros de configuración del correntómetro AquaPro Version 1.36.06 (Continuación).

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| Assumed duration (days)   | 30       |
| Battery utilization (%)   | 35       |
| Battery level (V)         | 13.4     |
| Recorder size (MB)        | 3886     |
| Recorder free space (MB)  | 3885.506 |
| Memory required (MB)      | 0.9      |
| Vertical vel. prec (cm/s) | 1.8      |
| Horizon. vel. prec (cm/s) | 5.5      |
|                           |          |
| Instrument ID             | AQD11366 |
| Head ID                   | AQP 6337 |
| Firmware version          | 3.39     |
| ProLog ID                 | 775      |
| ProLog firmware version   | 4.14     |
|                           |          |
| SD Card Inserted          | YES      |
| SD Card Ready             | YES      |
| SD Card Write protected   | NO       |
| SD Card Type              | SDHC     |
| SD Card Supported         | YES      |
|                           |          |
| AquaPro Version 1.36.06   |          |
| Copyright (C) Nortek AS   |          |

### 2.2.3. Pruebas de Equipos configurados

Posteriormente, se deben realizar CAST de prueba con los equipos para confirmar su correcto grabado y configuración.

### 2.3. Fase Monitoreo

La fase de monitoreo comprende el momento en el campo en el que:

- Se instalan los equipos en el agua.
- Se toma la información.

- Se recogen los equipos del agua.
- Se descargan los datos guardado en las memorias de los equipos.
- Antes de hacer el lanzamiento y procesamiento, se recomienda crear una carpeta en la PC, para guardar todos los archivos necesarios que se van a extraer y procesar los datos que se obtendrán de cada lance de los muestreos. En esta carpeta se debe incluir el archivo de configuración del CTD (archivo \*.con o \*.xmlcom).
- Paralelamente, se toman las muestras de agua para análisis de acidificación.

### **2.3.1. Configuración de Equipos**

- La configuración de los equipos se hace en base a las pruebas realizadas en la sección 1.2.2 en la fase previa al monitoreo.

### **2.3.2. Instalación de Equipos**

Se instaló en los puntos de muestreo por 24 horas consecutivas con toma de datos cada 10 minutos, un correntómetro perfilador acústico doppler “Sontek” para tomar datos de magnitud y dirección de corrientes y perfilador CTD marca “SEABIRD” 19 plus V2, para tomar datos de temperatura, salinidad y variables que pueden ser calculadas con estos datos.

El equipo se baja al lugar de muestreo por SCUBA y con líneas de seguridad, se procede a encender en el caso del CTD, mientras que el correntómetro debe bajar configurado para empezar a tomar información de acuerdo a la planificación.

### **2.3.3. Toma de información**

#### **2.3.3.1. Equipos oceanográficos**

El CTD es marca SBE modelo 19plusV2, para operar. Internamente se encuentra una batería de Litio que provee una copia de seguridad de la memoria intermedia y el reloj de tiempo real en caso de fallo electrónico o agotamiento de la batería principal. El CTD SBE19plus V2 viene con un Memory con una capacidad de 64 Mbyte.

Los equipos tienen autoguardado que permiten posteriormente extraer los datos de la memoria interna y así poder procesarlos en un ordenador mediante el software

del equipo y herramientas de filtrado y manejo de datos. En el caso del correntómetro se usa el software AquaPro. Version 1.36.06 de Nortek AS y para el CTD se usa Sea Term. Version 1.59.

### **2.3.3.2. Muestras de agua – Medición de pH**

Paralelamente, se tomarán muestras de agua para medición de pH, mediante utilización de botellas Niskin en los lugares planificados anteriormente, estas muestras serán tomadas y analizadas de acuerdo a la metodología de Dickson (1994) y también serán incluidas en los análisis estadísticos descritos anteriormente.

#### **a) Colección de muestra:**

Las muestras se recogen en frascos de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de vidrio borosilicato con tapón esmerilado, aprox., 60 ml o 125 ml dependiendo del volumen requerido en el análisis. Las botellas deben ser enjuagadas tres veces con agua desionizada. Las tapas se llevan a cabo con un dispositivo de cierre positivo, por lo general, una banda de goma con clip de plástico.

#### **b) Equipo:**

En el mar, botellas Niskin se utilizan para coleccionar muestras de agua en la profundidad del sitio, y luego llevadas de vuelta a la superficie.

#### **c) Preservación:**

A parte de la medición de pH se toma muestras para la medición de alcalinidad total (TA) y de carbono inorgánico disuelto (DIC). Cada muestra se fija con una pequeña cantidad de solución saturada de cloruro de mercurio. La Guía de Buenas Prácticas para las mediciones de CO<sub>2</sub> (2007) menciona un volumen de cloruro de mercurio saturado de aproximadamente 0,02% del volumen correspondiente de cada muestra. Esto se traduce en aproximadamente 12µl para 60 ml de muestra, o 25 µl para las botellas de 125 ml. Este preservante se mantiene en una botella de vidrio con un tapón engrasado, o una botella de plástico con una tapa hermética. Para dispensarlo se utiliza una pipeta desechable o gotero. Una vez fijadas las muestras, idealmente mantenerlas bajo temperatura ambiente y de preferencia en lugar oscuro.

Si se utiliza una botella Niskin, y se están recogiendo muestras de oxígeno no Winkler, la muestra TA se debe retirar primero de la botella. Esto garantiza una cantidad mínima de intercambio de gases del aire-agua, que puede cambiar los valores de DIC.

### **Muestreo**

Se lleva la botella Niskin por buceo hasta la profundidad del sitio, se debe asegurar de que la perilla blanca cerca de la parte superior de la botella está completamente cerrada, y luego empuje la llave de paso en la parte inferior de la botella. Muy poca agua debe salir de la llave de paso. Para colecta de AT y pH inserte una longitud corta de tubo "Tygon" sobre la llave de paso y para el muestreo de DIC una manguera de "silicona".

Asegúrese de que la botella ya está rotulada, ya que esto es difícil de realizar cuando la etiqueta está mojada.

Vaciar el agua desionizada de la botella de muestra.

Se enjuega la botella tres veces con una pequeña cantidad de agua de la Niskin (muestra), con el botón de color blanco cerca de la parte superior para iniciar y detener el flujo de la llave de paso. En primer lugar, lave la tubería, apretándolo si es necesario para asegurar que no hay aire o burbujas en la tubería antes de llenar los recipientes.

Llene la botella lentamente, dejando que el agua corra por el lado de la botella. El objetivo es evitar la formación de burbujas en la muestra. Alternativamente, puede utilizar un trozo de manguera Tygon o silicona según corresponda, unido a la llave de paso, nuevamente de la misma forma, dejar escurrir la muestra por la pared del frasco, llenando la botella desde su parte inferior hacia arriba. Llene la botella y deje desbordar muestra unas 2-3 veces el volumen de la botella. Cuando se llene definitivamente, solo para el caso de muestreo de "alcalinidad total" asegurarse de dejar un espacio muy pequeño entre la muestra y la tapa. Esto debe resultar en una pequeña burbuja una vez que el tapón se pone en su lugar. Para el caso de pH y DIC, llenar completamente, sin presencia de burbujas.

Fijar la muestra con la solución de cloruro de mercurio.



Vuelva a tapar el frasco y refrigerar. En su defecto mantener en lugar fresco y oscuro durante el transporte al laboratorio.

Si una muestra está siendo tomada desde una cubeta, el procedimiento esencialmente es el mismo que con la botella Niskin. Sólo recuerde, el objetivo es conseguir una muestra libre de burbujas en la botella.

Finalmente, se hace la medición de pH con sensor de al menos tres decimales. La metodología indica que debe tomarse tres alícuotas de la muestra y tomar tres mediciones para poder garantizar las lecturas con mayor precisión estadística, dando en total nueve valores de pH por muestra.

#### **2.3.4. Recuperación de los equipos**

Los equipos se recuperan del lugar de muestreo realizando SCUBA y con líneas de seguridad, se procede a subirlos y a apagarlo en el caso del CTD, mientras que el correntómetro debe apagarse conectándolo al computador, para luego ser configurado para empezar a tomar nuevamente información de acuerdo a la planificación para la siguiente estación.

#### **2.3.5. Descarga de datos**

Los equipos deben conectarse al computador por medio del cable de comunicación luego de haberse asegurado de haberlos secado bien en todas sus partes.

Se procede a descargar los datos de los equipos para guardarlos en la carpeta correspondiente para su posterior análisis.

### **2.4. Fase de Post Monitoreo**

Luego de la fase de monitoreo hemos denominado a post monitoreo a la fase en donde se hace todo el tratamiento de los datos previo a los análisis estadísticos.

#### **2.4.1. Tratamiento de datos**

Usando los softwares de los equipos se realizará control de calidad de datos para descartar datos erróneos. El CTD genera los datos crudos en formato \*.HEX estos datos deber ser transformados a formato \*.CNV (Ascii).

### **2.4.2. Filtrado de datos**

El procesamiento de los datos obtenidos por los perfiladores CTD, se basa en una serie de subrutinas que permiten: graficar, filtrar, promediar, etc. la información adquirida.

El uso de cada una de estas subrutinas, dependerá del modelo de CTD utilizado, en la adquisición de la información. En el caso del SBE19PlusV2 se recomienda el siguiente orden: seaseve, data conversión, filter, alling CTD, cell termal mass, loop edit, derive, bin average, seaplot.

### **2.4.3. Depuración de datos**

#### **2.4.3.1. Análisis Exploratorio de datos**

Para el análisis exploratorio de los datos se usó el software R (open source), usando el ambiente gráfico RStudio, con su paquete de análisis RCDMR Comander, el cual está diseñado para hacer análisis exploratorio.

#### **2.4.3.2. Visualización**

Para la visualización de los datos se usó varios softwares:

- Rstudio para hacer plots y distribución de los datos
- Qgis para hacer análisis espacial, visualización y construcción de mapas,
- Ocean Data View para poder visualizar los datos del CTD y Correntómetro en espacio y tiempo,
- Wrplot para la construcción de rosas para expresar las corrientes.

### **2.4.4. Elaboración de Geobase**

Una vez terminada el procesamiento de los datos se procede a la construcción en una sola base de datos la cual debe estar debidamente georeferenciada para poder usarla en todos los softwares de análisis y visualización en el presente trabajo

## **2.5. Análisis de Resultados.**

La fase de análisis de resultados está prevista para poder hacer todos los procedimientos posteriores al tratamiento de datos y una vez la geodata esté depurada.

### **2.5.1. Geovisualización de datos**

La geovisualización se utiliza para poder verificar que los datos estén ubicados correctamente en el espacio en la geodata. Esta visualización de igual forma ayuda a construir gráficos de interpolación de las áreas monitoreadas.

### **2.5.2. Construcción de scripts**

Es de suma importancia para poder hacer análisis estadístico la construcción de scripts que faciliten el análisis de todos los datos y también que faciliten su visualización para una mejor comprensión del comportamiento de las variables.

### **2.5.3. Análisis estadístico de los datos**

Análisis estadístico básico de los datos colectados y descripción de los mismos se hará primeramente mediante análisis exploratorio de datos para inferir diferencias o similitudes, principalmente se analizarán mediante la construcción de boxplots, posteriormente se plantea realizar análisis de clúster analizando espacialidad y temporalidad, y así poder determinar si existen diferencias entre los puntos de muestreo y entre los diferentes tiempos de toma de información.

### **2.5.4. Elaboración de gráficos y tablas**

Finalmente, con la información analizada fue posible la construcción de gráficos explicativos, tablas resumen de los datos encontrados y mapas temáticos de las áreas analizadas con sus respectivos valores encontrados para poder ser comparados.



## CAPÍTULO 3

### 3. Resultados y Análisis

#### 3.1. Evaluar datos de la estructura termo-halina (temperatura, salinidad, densidad) de la columna de agua en el área de estudio y en el lugar de referencia

##### 3.1.1. Temperatura

La primera variable conservativa a revisar en el presente documento será la temperatura, en la presente sección se describirá la estructura de la columna de agua del sitio en estudio y del punto de control.

##### **Roca Redonda**

En la estructura térmica se observa lo esperado para cada una de las épocas de muestreo, es decir, mayores temperaturas en la época húmeda debido a la influencia y fortalecimiento de masas de aguas provenientes de la bahía de Panamá. La media de temperatura para la época seca fue de 22.1 °C (desviación estándar de +/- 1.1), mientras que para la época húmeda fue de 24.0 °C (desviación estándar de +/- 0.7). En la época húmeda se observa un mayor gradiente de temperatura (-7.9 °C de superficie a fondo) (Figura 5).

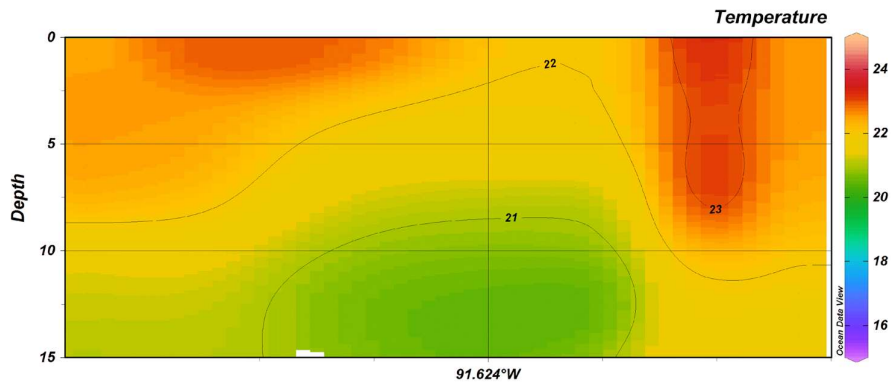


Figura 5. Estructura térmica (°C) en Roca Redonda en época seca (eje x sentido muestra oeste – este).

En las figuras 5 y 6 no es posible observar termoclina para ninguna de las estaciones, mostrando una capa prácticamente uniforme en la columna de agua sin gradientes; adicionalmente, se procedió a calcular Capa de Mezcla la cual fue de 16 metros para la época húmeda y de 9 metros para la época seca.

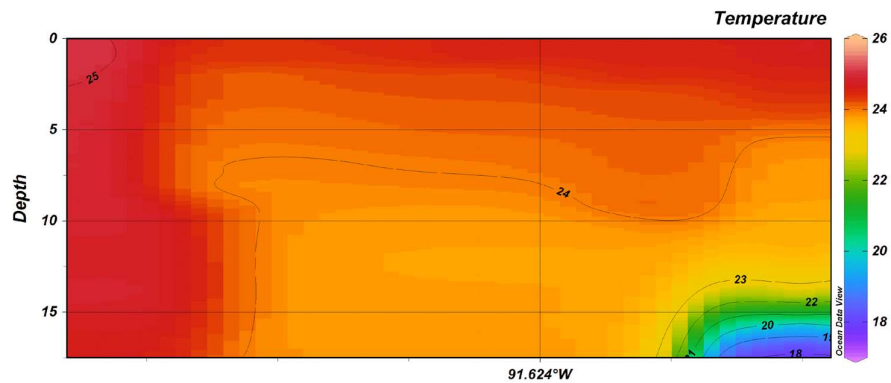


Figura 6. Estructura térmica (°C) en Roca Redonda en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).

### Punta Albemarle

En el punto de control la variación de temperatura en la columna de agua fue menor a la observada en Roca Redonda, siendo similar en las dos estaciones. La temperatura máxima observada fue de 23.4 °C mientras que el valor mínimo fue de 20.3 °C. (Figura 7 y 8).

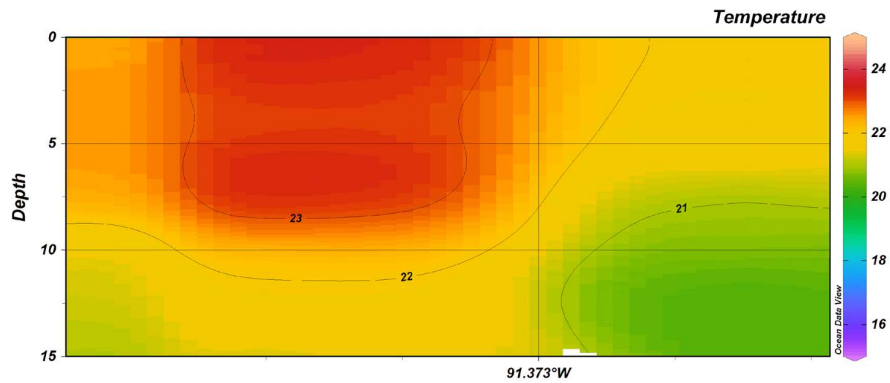


Figura 7. Estructura térmica (°C) en Punto de Control en época seca (eje x muestra sentido oeste – este).

De igual forma no se observa la presencia de termoclina, esto se atribuye a la poca profundidad del sitio de control. El cálculo de la capa de mezcla fue de tres metros para la época húmeda y nueve para la época seca, lo cual muestra poca influencia del viento al momento de monitorear.

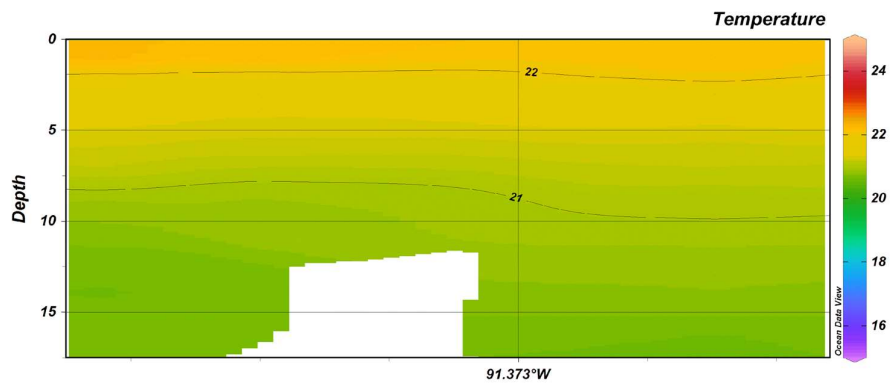


Figura 8. Estructura térmica (°C) en Punto de Control en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).

### 3.1.2. Salinidad

#### Roca Redonda

Se pudo observar en los valores de salinidad diferencias entre las diferentes épocas, mostrándose en la época seca influencia de aguas de menor salinidad en comparación con la época húmeda. La presencia de menores salinidades es

atribuible a la influencia de la Corriente de Cromwell la cual es muy marcada en el lado oeste de las islas.

En promedio, la salinidad en la época seca (34.4 UPS) es menor a la época húmeda (35 UPS). La mayor salinidad registrada en la columna de agua fue de 35.5 UPS, mientras que el valor mínimo fue de 34.2 UPS (Figura 9 y 10).

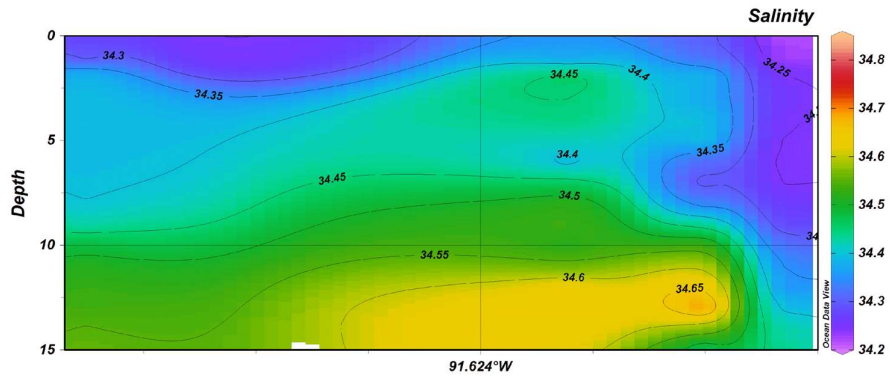


Figura 9. Estructura de salinidad (UPS) en Roca Redonda en época seca (eje x muestra sentido oeste – este).

La estructura de salinidad en la Figura 10 muestra en la parte más profunda influencia de salinidades más bajas, la presencia de este tipo de salinidades podría deberse a la intrusión de masas de agua que debido a la morfología del sitio se puedan registrar dentro del área de estudio.

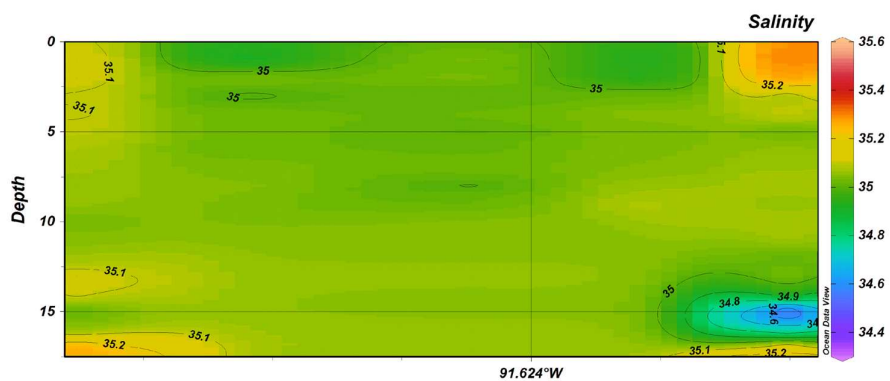


Figura 10. Estructura de salinidad (UPS) en Roca Redonda en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).



## Punta Albemarle

En el punto de control (Punta Albemarle) de igual forma se observó la presencia de salinidades menores en la época seca, lo cual indica que no fue un evento puntual de Roca Redonda, más bien refuerza la presunción de la influencia de masas de agua salinas al momento de la campaña de muestreo, atribuibles a la presencia de Cromwell (Figuras 11).

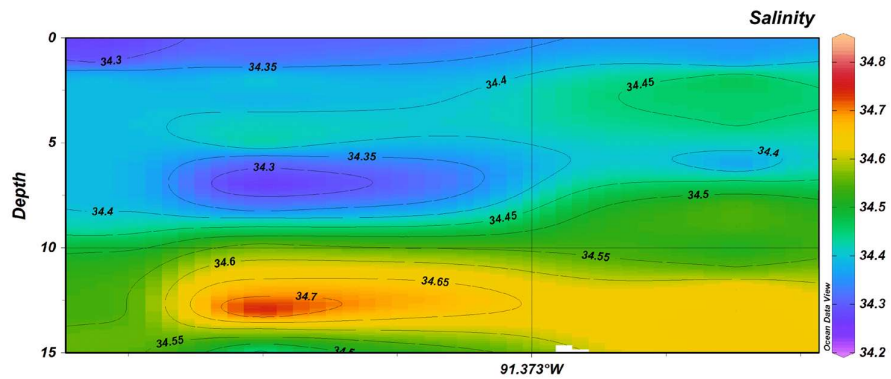


Figura 11. Estructura de salinidad (UPS) en Punto de Control en época seca (eje x muestra sentido oeste – este).

Para la época seca la salinidad media fue de 34.4 UPS, mientras que para la época húmeda fue de 35.1 UPS. El valor máximo registrado fue de 35.3 UPS y el valor mínimo fue de 34.2 UPS (Figuras 11 y 12).

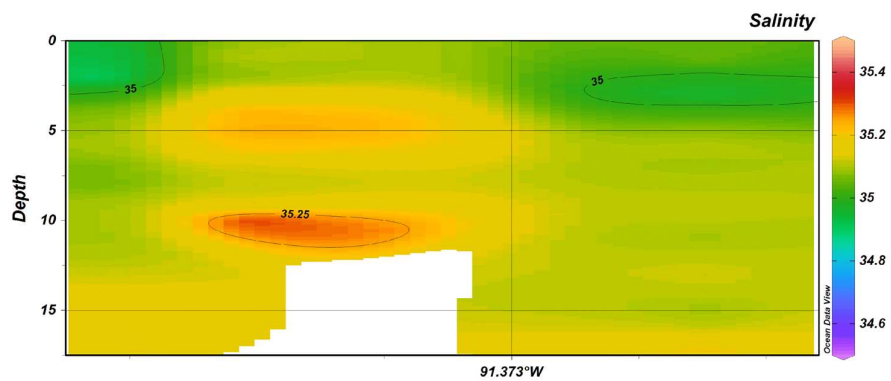


Figura 12. Estructura de salinidad (UPS) en Punto de Control en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).

Las salinidades registradas son mayores a los registrados normalmente en continente, es conocido que la salinidad en la zona insular es mayor, debido a la influencia de la corriente de Cromwell.

### 3.1.3. Densidad

#### Roca Redonda

La densidad en Roca Redonda presenta una diferencia estacional marcada, de acuerdo a la teoría la densidad es dependiente de la temperatura y salinidad, y la variación de temperatura y salinidad registrados como resultado muestran densidades marcadas entre estación (Figura 13 y 14).

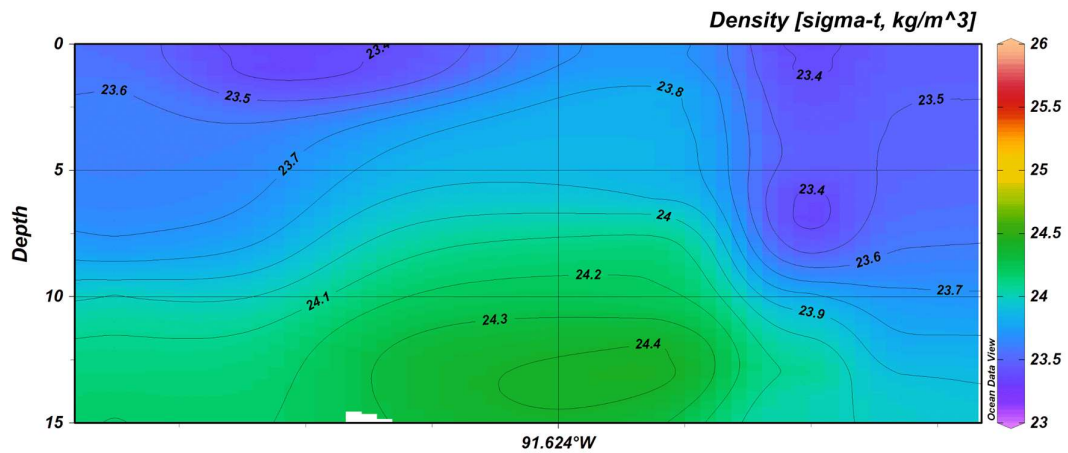


Figura 13. Estructura de densidad (Sigma-t. kg/m<sup>3</sup>) en Roca Redonda en época seca (eje x muestra sentido oeste – este)

Los valores de densidad registrados en el área de estudio en promedio fueron 23.7 kg/m<sup>3</sup> en la época seca y 23.6 kg/m<sup>3</sup> en la época húmeda. El valor máximo de densidad registrado fue de 25.9 kg/m<sup>3</sup> y el valor mínimo fue de 23.2 kg/m<sup>3</sup>.

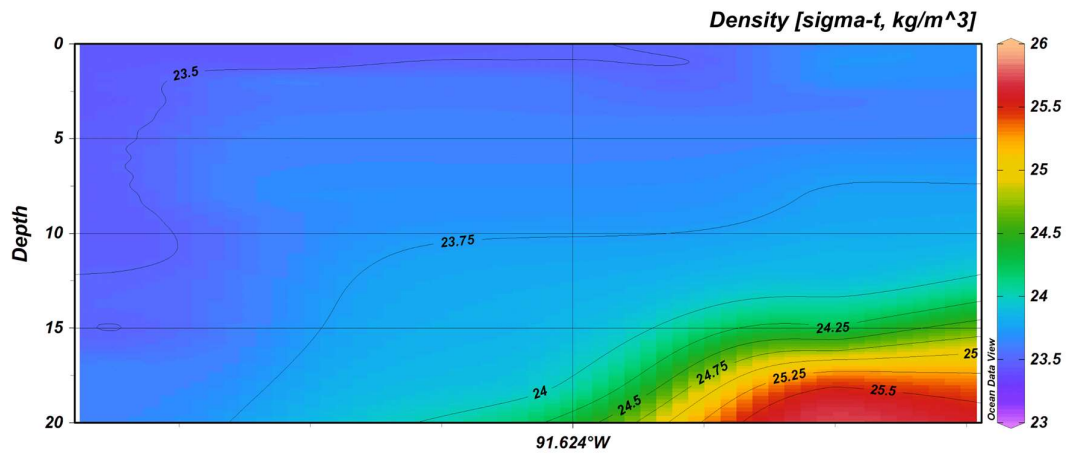


Figura 14. Estructura de densidad (Sigma-t. kg/m<sup>3</sup>) en Roca Redonda en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).

### Punta Albemarle

De igual forma en el sitio de control se observa una distribución de densidad variable en la columna de agua, con valores de 22,4 kg/m<sup>3</sup> en la superficie, mientras que en el fondo se registraron valores de 24.1 kg/m<sup>3</sup> (Figura 15).

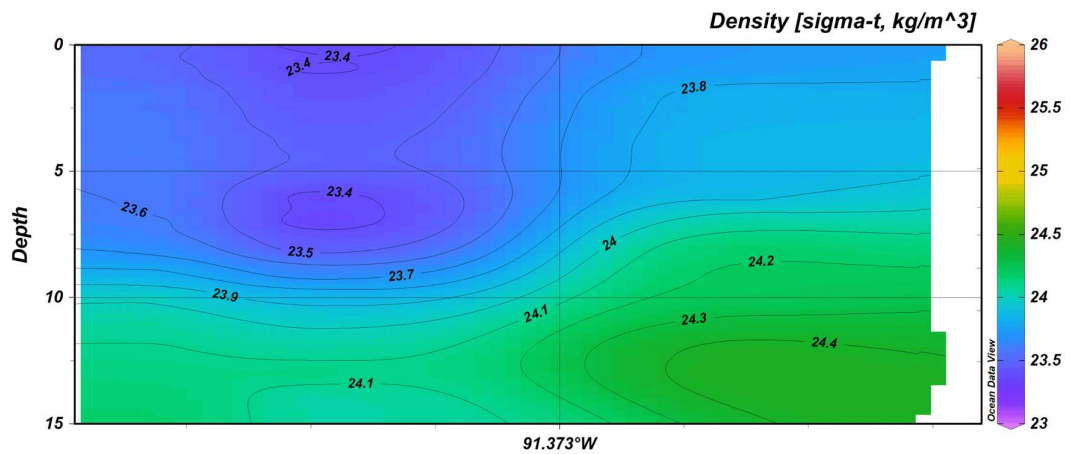
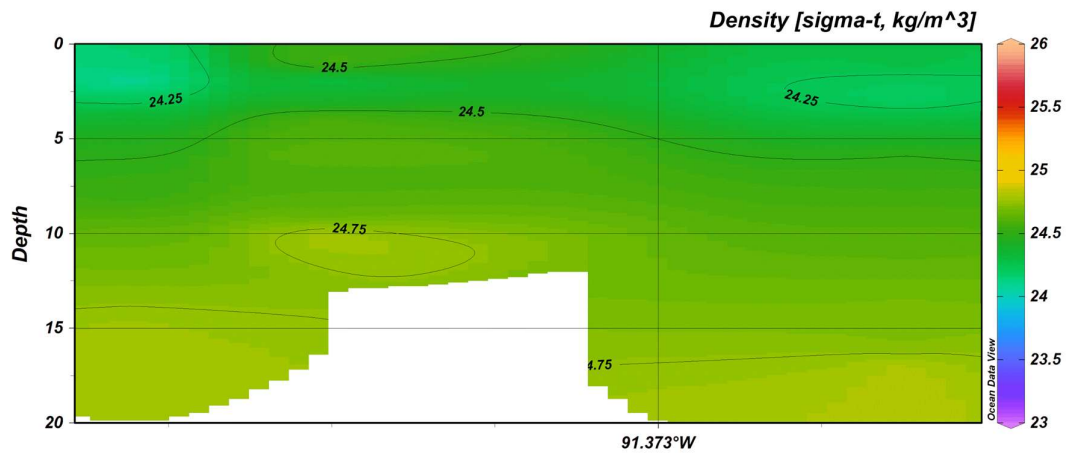


Figura 15. Estructura de densidad (Sigma-t. kg/m<sup>3</sup>) en Punto de Control en época seca (eje x muestra sentido oeste – este)

Los valores de densidad encontrados en promedio en el punto de control fueron de 23.8 kg/m<sup>3</sup> en época seca y de 24.5 kg/m<sup>3</sup> en época húmeda. El valor máximo registrado en el punto de control fue 24.8 kg/m<sup>3</sup> y el mínimo de 23.8 kg/m<sup>3</sup> (Figura 15 y 16).



**Figura 16** Estructura de densidad (Sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) en Punto de Control en época húmeda (eje x muestra sentido oeste – este).

En la tabla 5 se puede observar un resumen descriptivo de los datos registrados con el equipo CTD en la columna de agua.

**Tabla 5.** Resumen descriptivo de los valores registrados con el CTD en Roca Redonda y el punto de control.

| Variable      | Época | Mín    | Q1     | Media  | Media recortada | Mediana | Varianza | Desviación Estándar | Q3     | Máx    |
|---------------|-------|--------|--------|--------|-----------------|---------|----------|---------------------|--------|--------|
| Temperatura   | Seca  | 17.773 | 18.146 | 18.809 | 18.809          | 18.654  | 0.557    | 0.746               | 19.207 | 20.265 |
| Salinidad     | Seca  | 34.491 | 34.850 | 34.889 | 34.889          | 34.925  | 0.021    | 0.147               | 34.981 | 35.112 |
| Densidad      | Seca  | 24.200 | 24.830 | 25.015 | 25.015          | 25.090  | 0.079    | 0.282               | 25.200 | 25.400 |
| Fluorescencia | Seca  | -0.029 | 0.491  | 0.462  | 0.462           | 0.513   | 0.027    | 0.164               | 0.554  | 0.579  |
| Temperatura   | Hum   | 17.165 | 21.492 | 23.091 | 23.182          | 23.958  | 3.952    | 1.988               | 24.454 | 25.265 |
| Salinidad     | Hum   | 33.549 | 35.007 | 35.059 | 35.066          | 35.051  | 0.030    | 0.174               | 35.099 | 35.527 |
| Densidad      | Hum   | 22.230 | 23.537 | 23.958 | 23.934          | 23.712  | 0.400    | 0.632               | 24.300 | 25.900 |
| Fluorescencia | Hum   | -2.397 | 0.261  | 2.152  | 1.391           | 0.344   | 43.297   | 6.580               | 1.073  | 48.960 |

### 3.2. Evaluar magnitudes y direcciones de las corrientes marinas presentes en el área de estudio y en el lugar de referencia.

#### Roca Redonda

Los valores medidos de corrientes en la columna de agua en el seep <sup>1</sup> de Roca Redonda mostraron valores bajos, en la sección cercana al suelo se observaron valores mínimos de 0.006 m/s y máximos 0.721 m/s, en promedio durante toda la serie de tiempo fue de 0.17 m/s. La dirección promedio de la corriente fue de 218°, sin embargo, no existió una corriente predominante en todo el tiempo de monitoreo (Figura 17).

Por el tiempo de fondeo del equipo (un día), no es posible aseverar algún tipo de relación entre la marea y las corrientes observadas. La corriente de Cromwell es notoria en el sitio de estudio y control (los valores de salinidad y densidad encontrados sustentan su presencia), sin embargo estacionalmente también juega un papel importante la presencia de la Corriente de Panamá, la cual se fortalece en la época húmeda y debilita la presencia de Cromwell. Estos dos sistemas afectarían las corrientes locales junto a la influencia de la geomorfología del lugar.

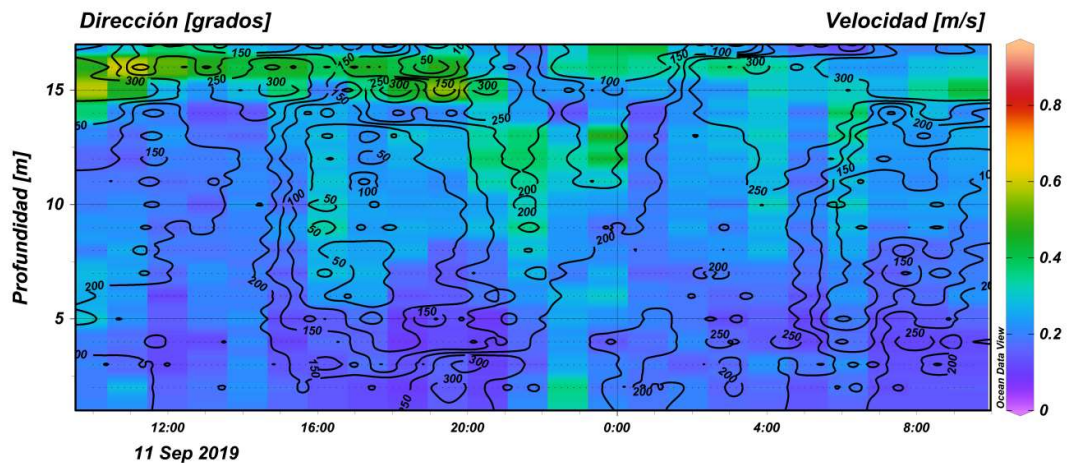


Figura 17. Valores de magnitud (m/s) y dirección en la columna de agua en Roca Redonda.

<sup>1</sup> Terminología en inglés usada para definir al espacio en donde se observan las burbujas de gas que emergen del suelo para mezclarse con el agua marina del sitio

Como se puede observar en la Tabla 6 en toda la columna de agua la mayoría de los datos se concentran en las secciones de los niveles de velocidad baja (entre 0 y 0,4 m/s) y entre los 150° - 330° de dirección.

**Tabla 6.** Cuenta de frecuencia de la dirección de la corriente en Roca Redonda (grados)

| I<br>D | Directions / Current<br>Classes (m/s) | 0,00 - 0,20 | 0,20 - 0,40 | 0,40 - 0,60 | 0,60 - 0,80 | 0,80 - 1,00 | 1,00 - 1,20 | >= 1,20  | Total      |
|--------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|------------|
| 1      | 337.5 - 22.5                          | 8           | 3           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0        | 11         |
| 2      | 22.5 - 67.5                           | 4           | 2           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0        | 6          |
| 3      | 67.5 - 112.5                          | 1           | 1           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0        | 2          |
| 4      | 112.5 - 157.5                         | 3           | 5           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0        | 8          |
| 5      | 157.5 - 202.5                         | 11          | 16          | 2           | 0           | 0           | 0           | 0        | 29         |
| 6      | 202.5 - 247.5                         | 13          | 21          | 4           | 2           | 0           | 0           | 0        | 40         |
| 7      | 247.5 - 292.5                         | 12          | 13          | 0           | 0           | 0           | 0           | 0        | 25         |
| 8      | 292.5 - 337.5                         | 13          | 7           | 1           | 0           | 0           | 0           | 0        | 21         |
|        | <b>Sub-Total</b>                      | <b>65</b>   | <b>68</b>   | <b>7</b>    | <b>2</b>    | <b>0</b>    | <b>0</b>    | <b>0</b> | <b>142</b> |
|        | Calma                                 |             |             |             |             |             |             |          | 0          |
|        | Missing/Incomplete                    |             |             |             |             |             |             |          | 0          |
|        | <b>Total</b>                          |             |             |             |             |             |             |          | <b>142</b> |

Visualizando por estratos, en el presente documento se decidió mostrar los estratos del fondo y mostrarlos cada 5 metros hasta llegar a la superficie. Se puede observar claramente que las mayores velocidades se registran cerca de la superficie sin embargo en direcciones totalmente distintas a las registradas en el fondo del lugar de estudio (Figura 18).

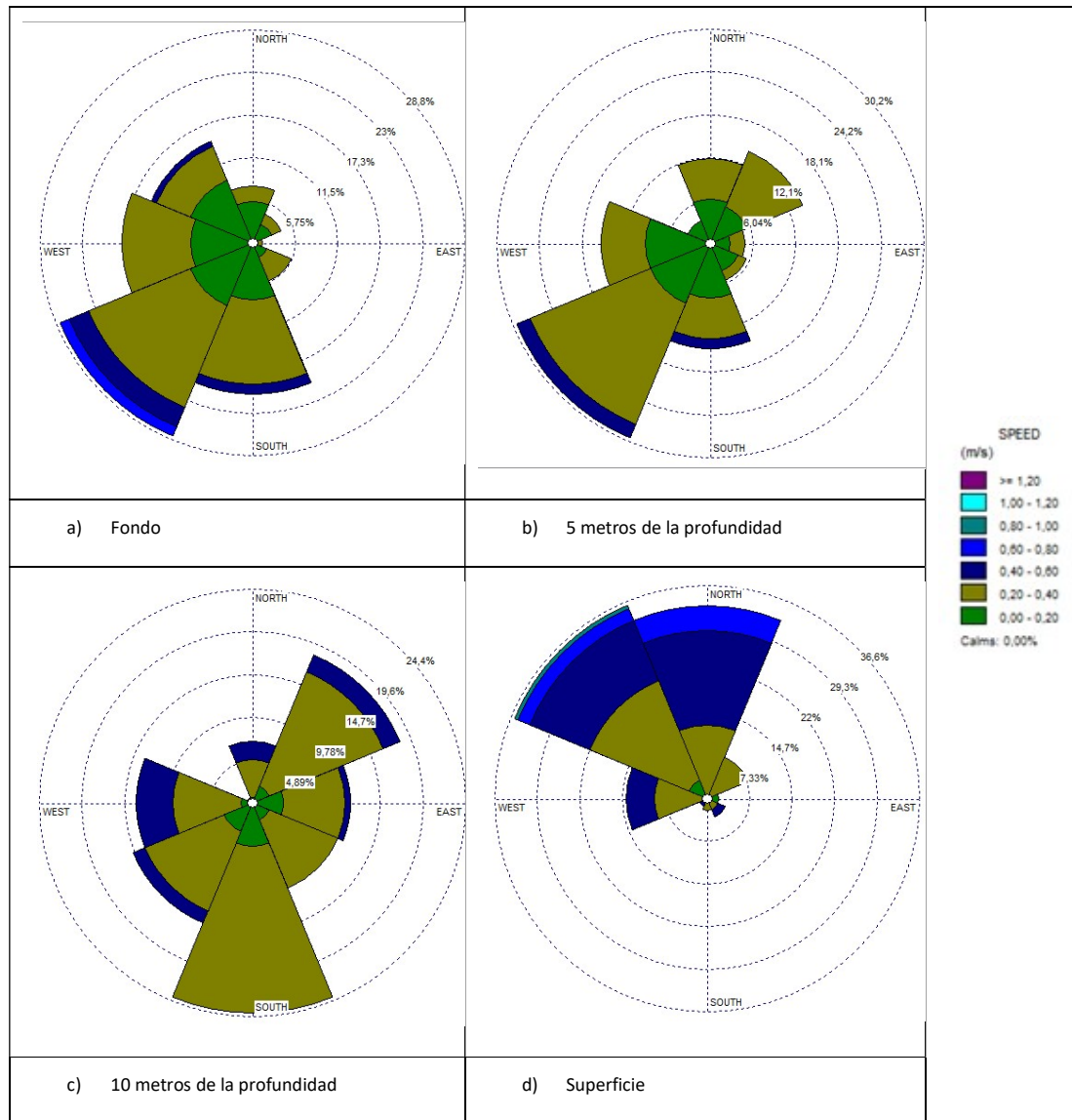


Figura 18. Velocidad y dirección de corrientes por profundidad a) fondo, b) 5 metros del fondo, c) 10 metros del fondo y d) superficie en Roca Redonda.

### Punta Albemarle

En el punto de control en Punta Albemarle se registraron valores en el fondo de 0.021 m/s (valor mínimo), llegando a registrarse un valor máximo de 0.46 m/s, la velocidad promedio fue de 0.17 m/s. En cuanto a la dirección la dirección promedio

fue de 134°, siendo dominantes las corrientes son dirección entre 0° y 27° (Figura 19).

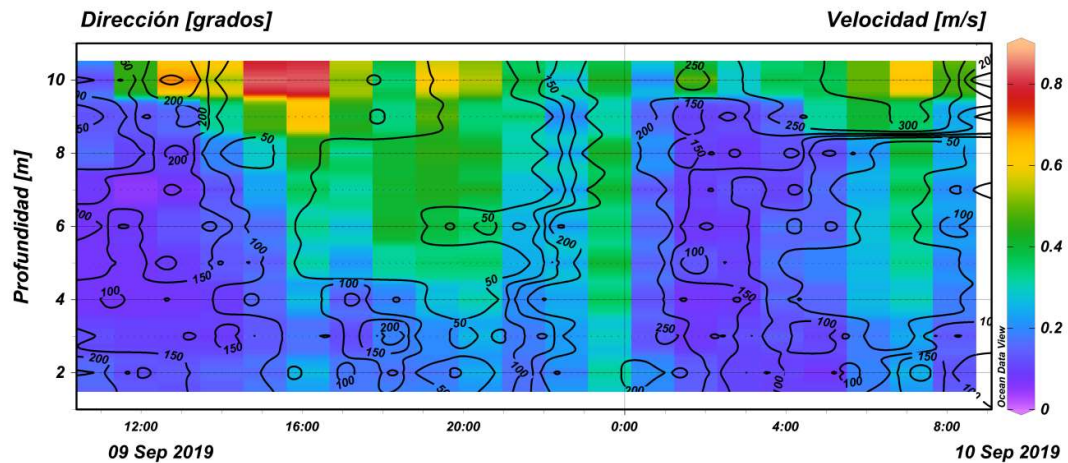


Figura 19. Valores de magnitud (m/s) y dirección en la columna de agua en el Punto de control.

Los datos en el punto de control, muestran que las distribuciones de las magnitudes de las corrientes en el fondo del sitio fueron muy variables en todo el período de muestreo, siendo el dominante la dirección entre 200° - 240° (Tabla 7).

Tabla 7. Cuenta de frecuencia de la dirección de la corriente en Punta Albemarle (grados)

| I | Directions / Current |             |             |             |             |             |             |          | Total      |
|---|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|------------|
| D | Classes (m/s)        | 0,00 - 0,20 | 0,20 - 0,40 | 0,40 - 0,60 | 0,60 - 0,80 | 0,80 - 1,00 | 1,00 - 1,20 | >= 1,20  |            |
| 1 | 337.5 - 22.5         | 17          | 21          | 1           | 0           | 0           | 0           | 0        | 39         |
| 2 | 22.5 - 67.5          | 21          | 22          | 1           | 0           | 0           | 0           | 0        | 44         |
| 3 | 67.5 - 112.5         | 8           | 3           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0        | 11         |
| 4 | 112.5 - 157.5        | 15          | 8           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0        | 23         |
| 5 | 157.5 - 202.5        | 16          | 26          | 2           | 0           | 0           | 0           | 0        | 44         |
| 6 | 202.5 - 247.5        | 16          | 25          | 9           | 2           | 0           | 0           | 0        | 52         |
| 7 | 247.5 - 292.5        | 15          | 14          | 0           | 0           | 0           | 0           | 0        | 29         |
| 8 | 292.5 - 337.5        | 20          | 11          | 1           | 0           | 0           | 0           | 0        | 32         |
|   | <b>Sub-Total</b>     | <b>128</b>  | <b>130</b>  | <b>14</b>   | <b>2</b>    | <b>0</b>    | <b>0</b>    | <b>0</b> | <b>274</b> |
|   | Calma                |             |             |             |             |             |             |          | 0          |
|   | Missing/Incomplete   |             |             |             |             |             |             |          | 0          |
|   | <b>Total</b>         |             |             |             |             |             |             |          | <b>274</b> |



En la columna de agua (Figura 20), se puede observar un aumento en la velocidad a 10 metros del fondo del sitio de control, incluso mostrando direcciones totalmente distintas a los demás estratos. De igual forma se observa superficialmente dominancia muy diferente en la dirección en comparación con el fondo, sin embargo, las magnitudes son muy similares.

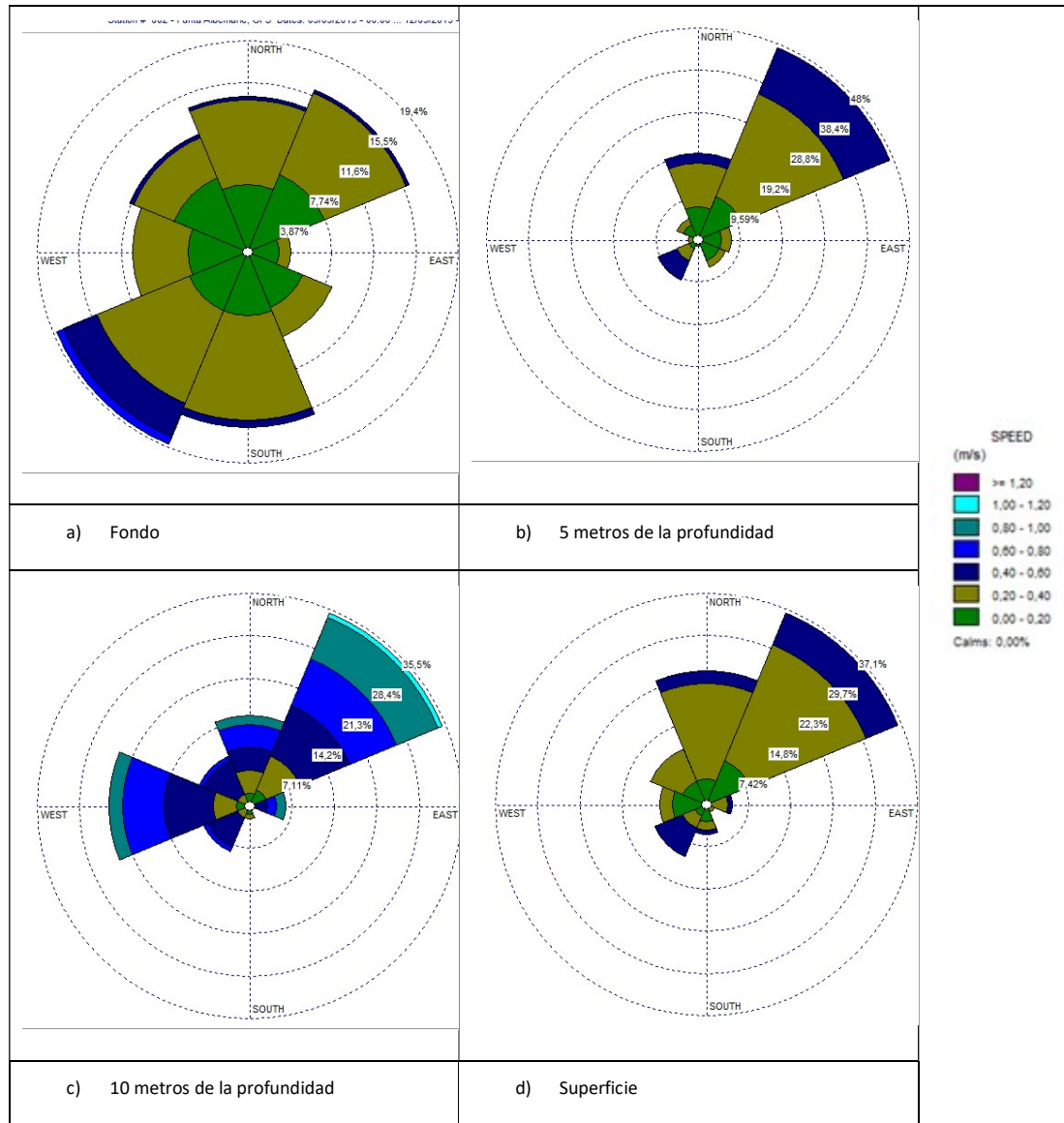


Figura 20. Velocidad y dirección de corrientes por profundidad a) fondo, b) 5 metros del fondo, c) 10 metros del fondo y d) superficie en Punta Albemarle.

En la Tabla 8, se puede observar un resumen descriptivo de los datos encontrados en el punto acidificado y así mismo en el punto de control.

**Tabla 8.** Resumen de datos de Corrientes registradas en Roca Redonda y en el punto de control.

| Lugar           | Variable      | Mín   | Q1      | Media   | Media recortada | Mediana | Varianza  | Desviación Estándar | Q3      | Máx     |
|-----------------|---------------|-------|---------|---------|-----------------|---------|-----------|---------------------|---------|---------|
| Roca Redonda    | Velocidad 0 m | 0.006 | 0.090   | 0.176   | 0.169           | 0.158   | 0.013     | 0.114               | 0.234   | 0.721   |
| Roca Redonda    | Dirección 0 m | 0.000 | 185.447 | 218.888 | 220.721         | 220.690 | 6455.590  | 80.346              | 281.350 | 353.660 |
| Punta Albemarle | Velocidad 0 m | 0.021 | 0.088   | 0.172   | 0.169           | 0.157   | 0.009     | 0.098               | 0.241   | 0.462   |
| Punta Albemarle | Dirección 0 m | 0.000 | 38.747  | 134.707 | 132.678         | 110.815 | 12590.950 | 112.209             | 211.940 | 356.590 |

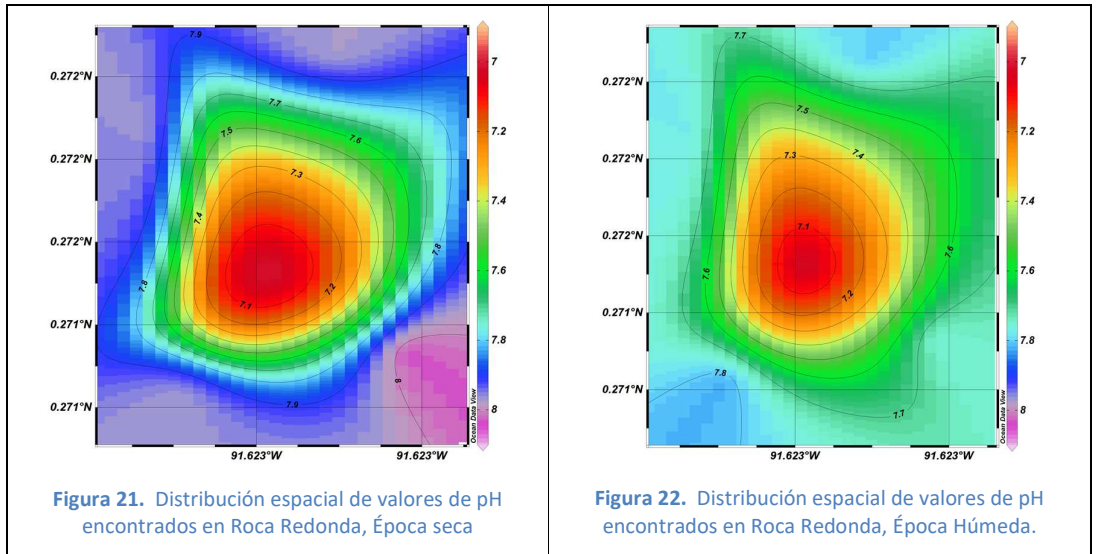
Fuente: Datos tomados en campo

### 3.3. Evaluar datos de acidificación presentes en el área de estudio y en el lugar de referencia.

#### Roca Redonda

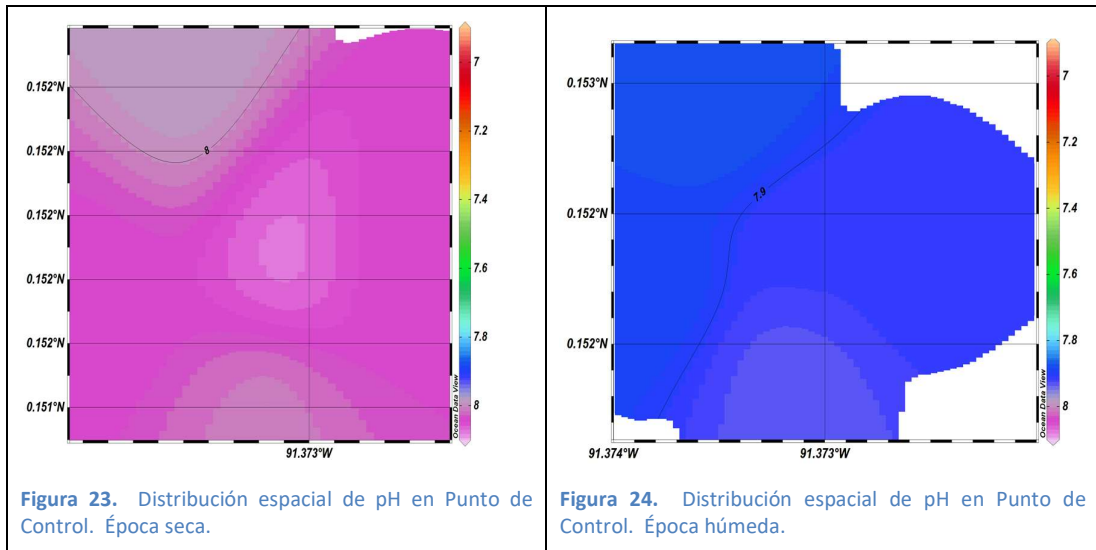
Los valores de pH en Roca Redonda son evidentemente más bajos que los valores promedios esperados en el Pacífico. Se puede observar en el centro del seep<sup>2</sup> un valor de 6.8 en época seca y 6.9 en época húmeda, mientras más se alejan del punto central los valores de pH aumentan, aproximándose a los valores promedios esperados para el océano. Los valores a 50 metros del centro registraron valores de 7.9 en la época seca, mientras que en la época húmeda fueron de 7.8 (Figura 21 y 22, Tabla 8).

<sup>2</sup> Terminología en inglés usada para definir al espacio en donde se observan las burbujas de gas que emergen del suelo para mezclarse con el agua marina del sitio.



### Punta Albemarle

En el punto de control (Punta Albemarle) como era de esperarse muestra valores promedio normales para un océano, estos valores están en valores de 7.9 – 8.0, los cuales están dentro de los valores registrados en la bibliografía y considerados normales (Figuras 23 y 24, Tabla 8)

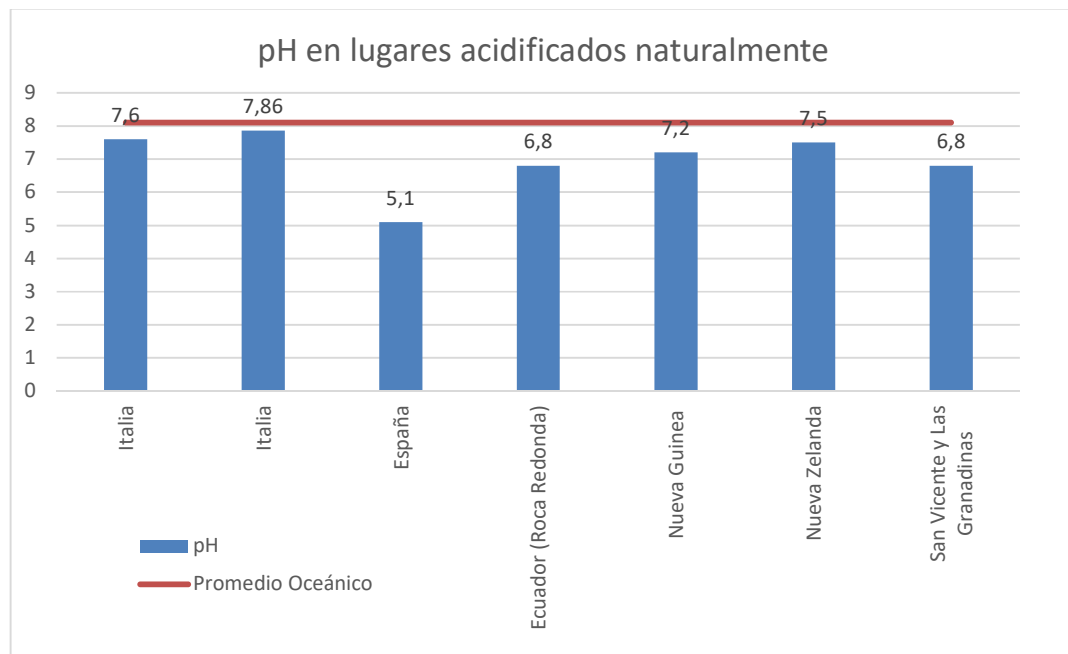


**Tabla 8.** Valores de pH registrados por estación en Roca Redonda y en el punto de Control

| Lugar        | Época del año   |                 |
|--------------|-----------------|-----------------|
|              | Seca            | Húmeda          |
| Roca Redonda | 6.866 +/- 0.002 | 6.922 +/- 0.002 |
| Control      | 7.944 +/- 0.001 | 8.076 +/- 0.001 |

\*Valores de desviación estándar calculados con las muestras que se tomaron en los puntos de monitoreo.

En una revisión bibliográfica basada en la información colectada en la Tabla 1, y para fines comparativos, se puede apreciar en la Figura 25 que en Ecuador (Roca Redonda) los valores muestran ser el segundo lugar más acidificado naturalmente de los registrados (Foo, et al. (2018); Celis-Plá, et al. (2015); Santana-Casiano, et al. (2018); Baylis, et al. (1997); Cornwall, & Eddy. (2015); Enochs, et al. (2020)).



**Figura 25.** pH registrado en lugares acidificados naturalmente alrededor del mundo. El valor de Ecuador corresponde al valor encontrado en Roca Redonda medidos en el presente estudio. (azul: valores de pH registrados; rojo: pH promedio del mar).

### 3.4. Evaluar la información colectada de análisis temporales y espaciales mediante herramientas de procesamiento y de visualización.

Como valor agregado a este trabajo, en la búsqueda de información se realizó en primera instancia la ubicación de lugares acidificados naturalmente, estos lugares no han sido mapeados aparentemente, por lo que un subproducto de la búsqueda de información actual es el mapa de los lugares acidificados naturalmente en todo el mundo.

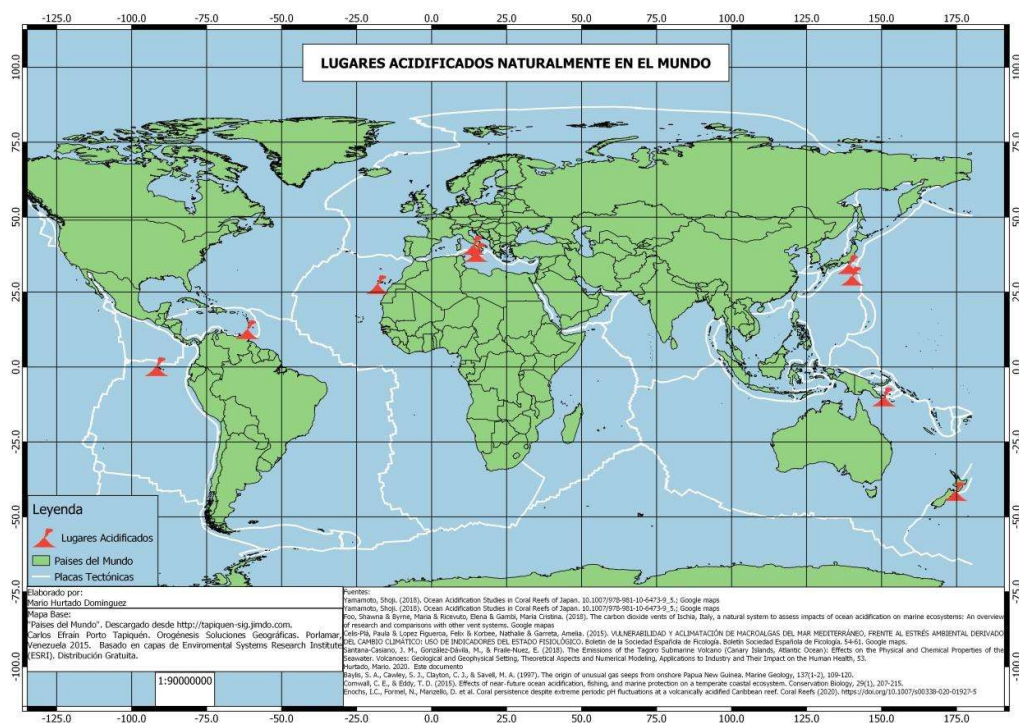
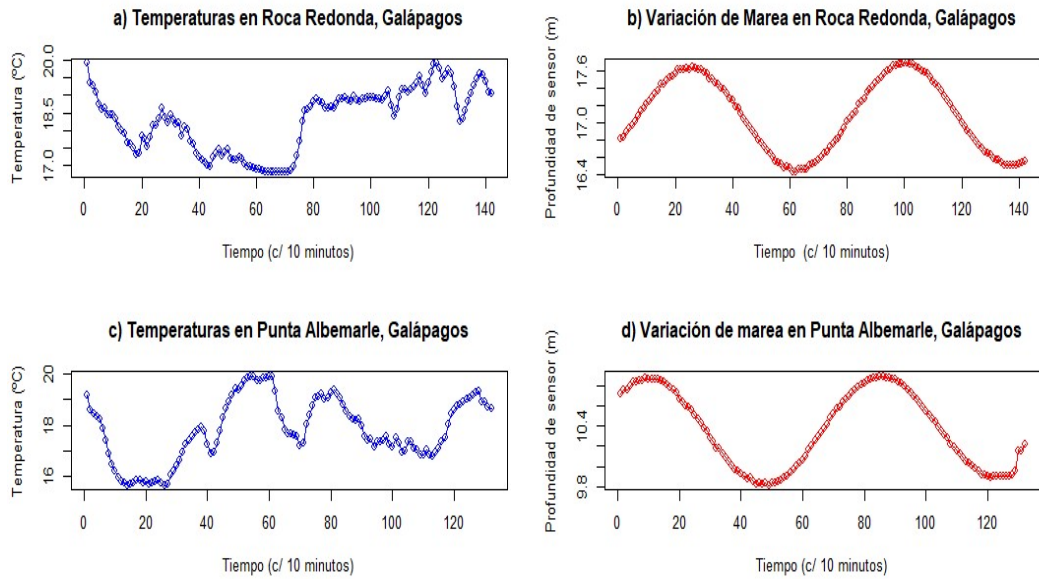


Figura 26. Lugares acidificados naturalmente alrededor del mundo

Se hizo un análisis temporal para poder revisar el comportamiento de los datos en un día entero, y observar sus variaciones. Se muestra en el gráfico, el comportamiento temporal de un día entero de registros, cada 10 minutos. La Figura 27 muestra claramente el comportamiento de la marea y así mismo el comportamiento de la temperatura durante todo el periodo de monitoreo, sin embargo, no se encontró una correlación directa entre la marea y el comportamiento de la temperatura. Se puede indicar que se registró una amplitud de 1.27 m entre la

marea alta y baja en Roca Redonda, mientras que en el punto de control se registró una amplitud de 1,08 m.



**Figura 27.** Comportamiento temporal durante 24 horas en Roca Redonda y el Punto de Control (Punta Albemarle). Izquierda se observan los valores de temperatura del mar. Derecha: Valores de marea. Los datos de Punta Albemarle fueron tomados en un día y posteriormente al día siguiente se monitoreo Roca Redonda.

Estacionalmente y espacialmente se encontró que en la época húmeda y seca las temperaturas en Roca Redonda muestran mayores valores como se puede observar en la Figura 28.

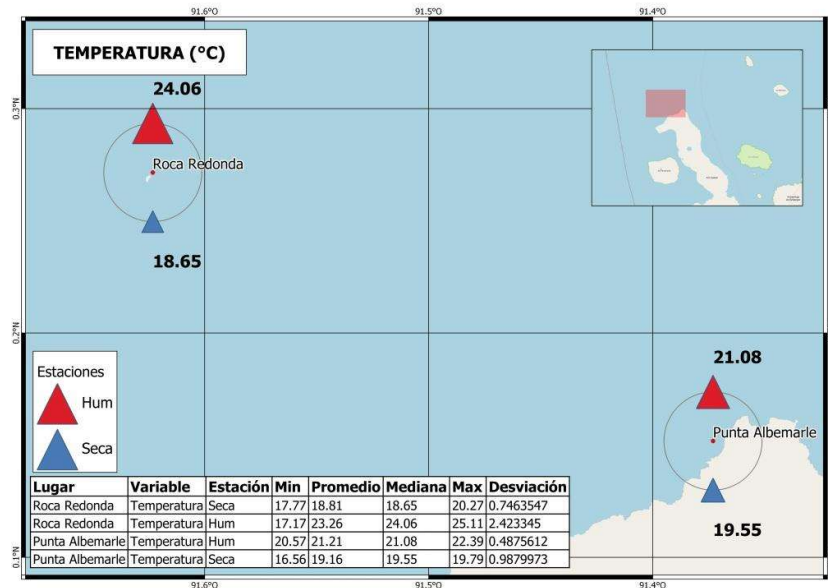


Figura 28. Comparación estacional de temperatura (°C) en el fondo del área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos).

Para el presente estudio y debido a que no se encontró mayor información actualizada del área de estudio, se procedió a sistematizar la información disponible en las boyas ARGO con la finalidad de tener un comparativo promedio. De acuerdo a las boyas ARGO (2020) las temperaturas superficialmente en todo el archipiélago son distintas en las estaciones (húmeda – seca) (Figura 29), al comparar con los datos del área de estudio, las temperaturas promedio no difieren con los datos encontrados en campo y así mismo coinciden con los datos reportados por Jiménez (2008) y Lucero & Cornejo Rodríguez (1990).

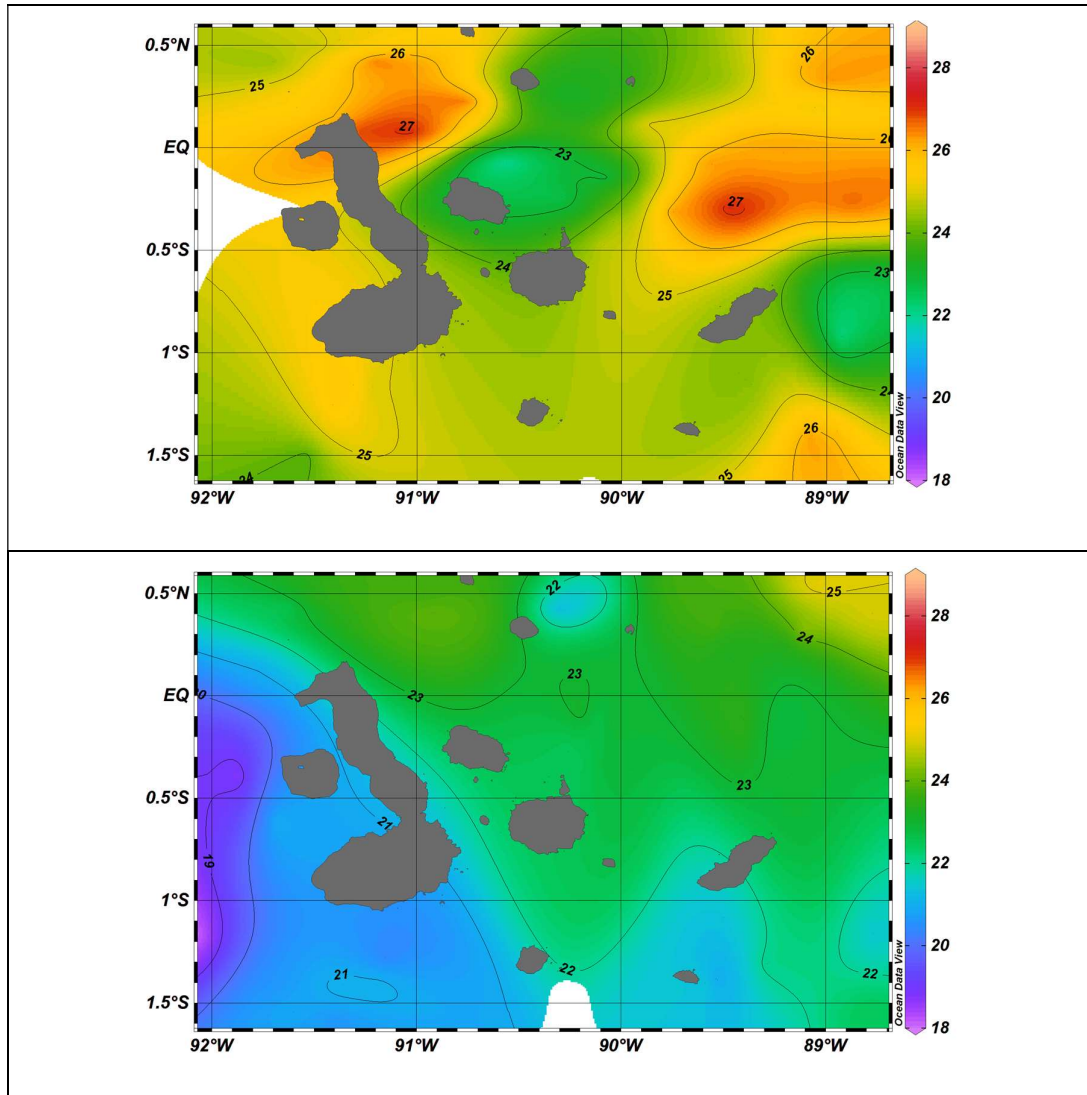


Figura 29. (Superior) Promedio de temperatura en época húmeda (2002-2018). (Inferior) Promedio de temperatura en época seca (2002-2018). Datos boyas ARGO.

La salinidad muestra valores altos en la época húmeda en los dos puntos de monitoreo (Roca Redonda y control) (Figura 30), estos valores se los puede asociar a la influencia de la influencia de Cromwell, tal como indican Jiménez (2008) y Lucero & Cornejo Rodríguez (1990) los valores de salinidad en la zona norte de Isabela son de alrededor de 35 UPS, de igual forma indican que estos valores altos de salinidad son características de Cromwell.



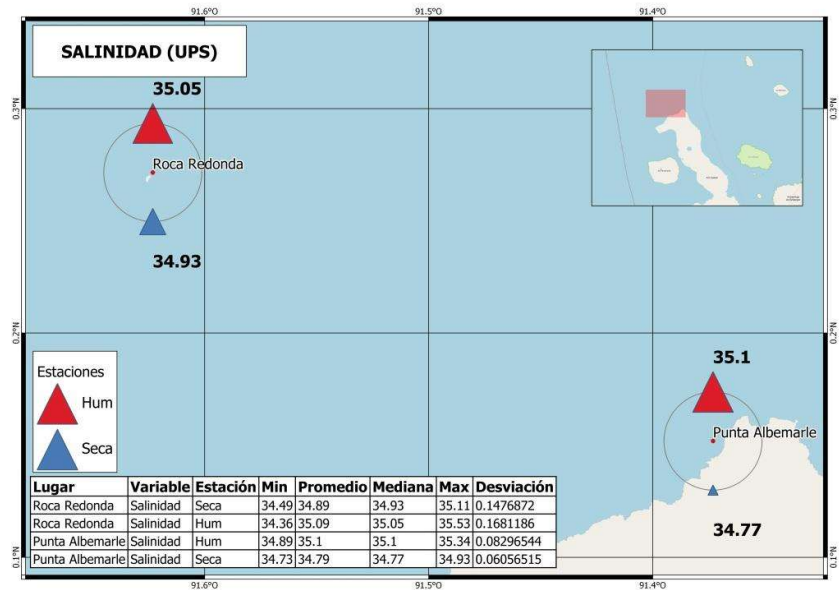
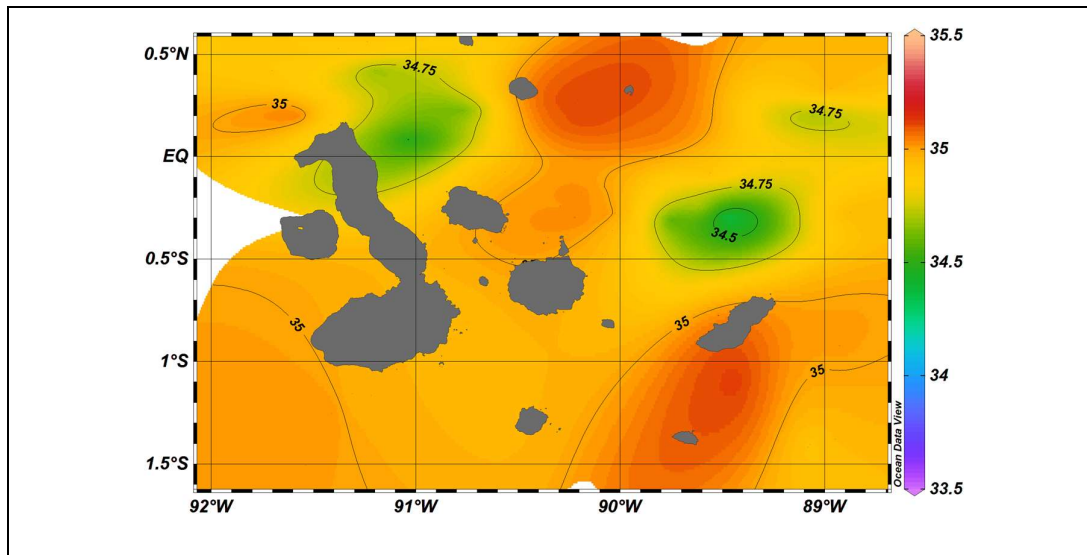


Figura 30. Comparación estacional de salinidad (UPS) en el fondo del área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos).

De acuerdo a las boyas ARGO estacionalmente en la zona de estudio también muestran valores altos en ambas estaciones (Figura 31).



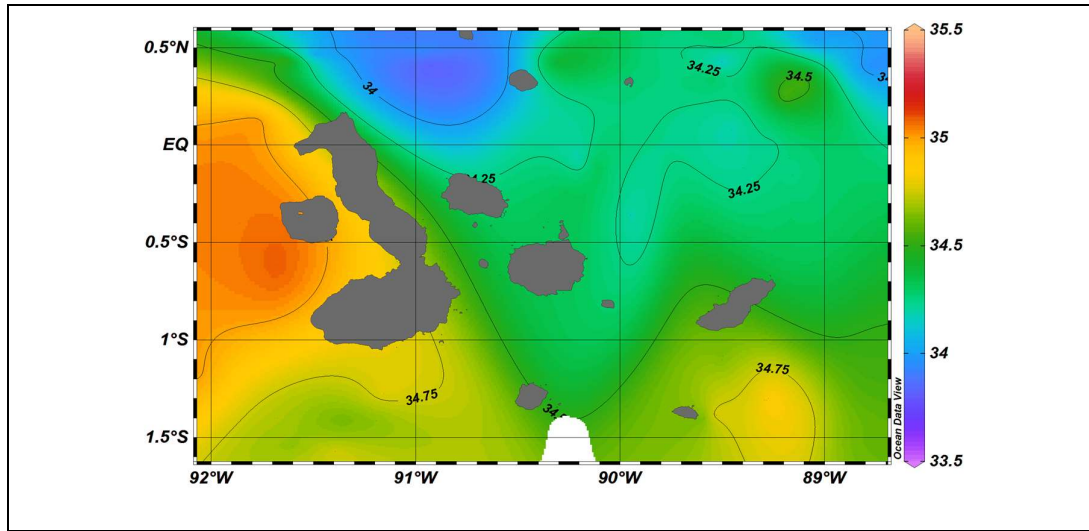


Figura 31. (Superior) Promedio de salinidad en época húmeda (2002-2018). (Inferior) Promedio de salinidad en época seca (2002-2018). Datos boyas ARGO.

La densidad mostró sus valores más altos en la estación seca en ambos puntos de monitoreo, como se puede observar en la Figura 32.

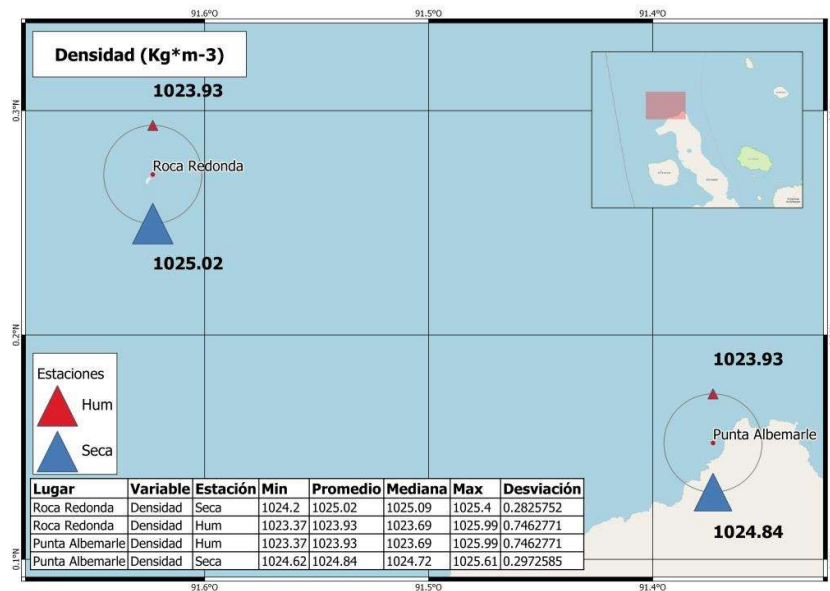
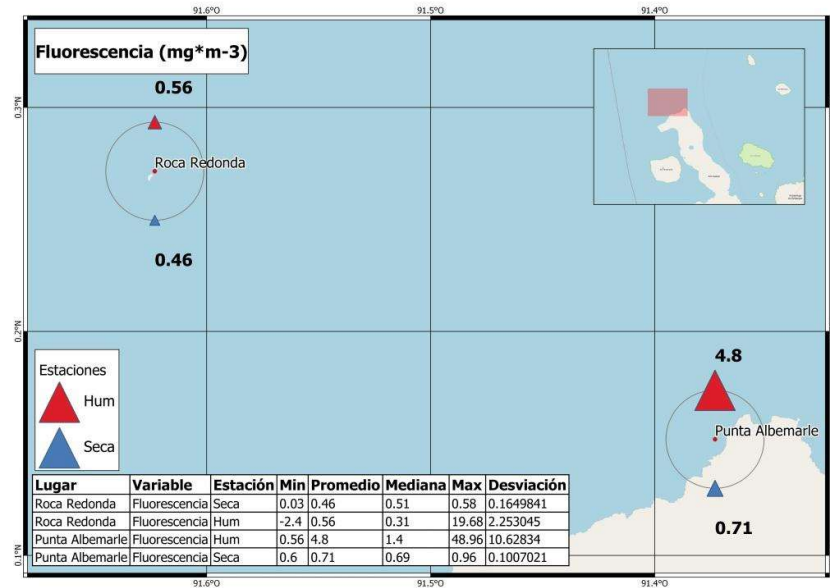


Figura 32. Comparación estacional de densidad ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) en el fondo del área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos).

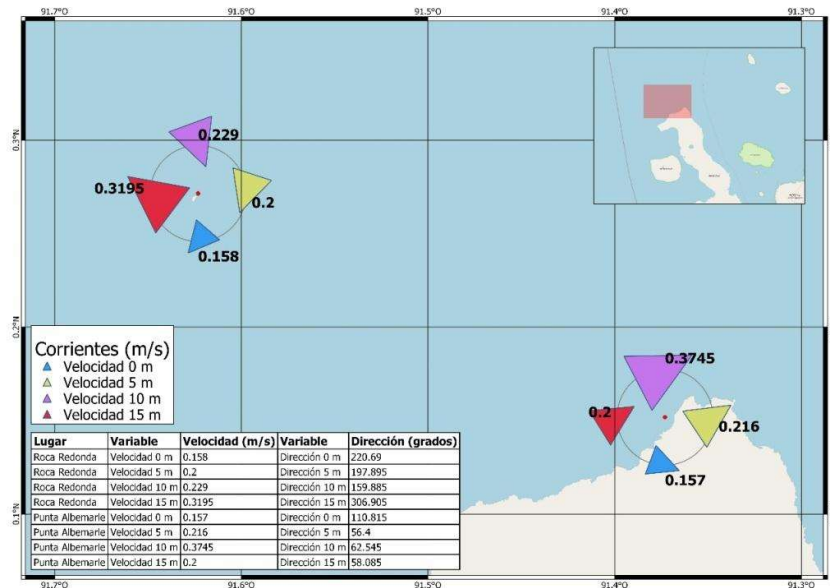
La concentración de fluorescencia mostró valores relativamente bajos en Roca Redonda para ambas estaciones, es de recalcar que en el punto de control el valor

encontrado en la época húmeda está muy por encima de todos los valores registrados, esto puede indicar la presencia puntual de alta productividad en el momento del monitoreo. La diferencia se puede observar en la Figura 33.



**Figura 33.** Comparación estacional de fluorescencia ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) en el fondo del área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos).

En la columna de agua en los dos puntos de monitoreo se puede observar la dirección y magnitud media en los diferentes estratos (0 m, 5 m, 10 m y 15 m); como se puede observar en promedio las velocidades en el punto de control son uniformes en el punto de control mientras que en Roca Redonda no se observa tal uniformidad. Adicionalmente, se puede indicar que los datos de mayor profundidad se registraron los valores más pequeños en relación a toda la columna de agua, siendo los mayores valores observados en las capas que estuvieron más cercanas a la superficie.



**Figura 34.** Comparación de magnitud y dirección de corriente registrada en el área de estudio (Roca Redonda vs control, Galápagos).

Existe conocimiento anecdótico de personas que frecuentan la zona para actividades de buceo y pesca, que indican que en Roca Redonda los valores de corriente pueden alcanzar grandes magnitudes, superiores a 1 m/s, ellos mismo han auto categorizado la zona de estudio como un lugar de condiciones difíciles de buceo, sin embargo, estos valores “altos” no fueron registrados en el monitoreo del presente estudio.

Los valores analizados para la serie temporal se encuentran resumidos en la Tabla 9 y 10 a continuación:

**Tabla 9.** Resumen descriptivos de los valores encontrados en las estaciones de muestreo en Roca Redonda y en Punta Albemarle.

| Lugar           | Variable       | Unidad | Tipo     | Mínimo | Q1      | Media   | Media recortada | Mediana | Varianza  | Desviación Estándar | Q3      | Máximo  |
|-----------------|----------------|--------|----------|--------|---------|---------|-----------------|---------|-----------|---------------------|---------|---------|
| Roca Redonda    | Presión        | Db     | Temporal | 16.420 | 16.666  | 17.083  | 17.084          | 17.108  | 0.175     | 0.418               | 17.484  | 17.690  |
| Punta Albemarle | Presión        | Db     | Temporal | 9.812  | 9.976   | 10.368  | 10.368          | 10.361  | 0.142     | 0.376               | 10.761  | 10.895  |
| Roca Redonda    | Temperatura    | °C     | Temporal | 16.810 | 17.417  | 18.295  | 18.292          | 18.510  | 0.8034    | 0.896               | 18.947  | 19.910  |
| Punta Albemarle | Temperatura    | °C     | Temporal | 15.650 | 16.967  | 17.811  | 17.813          | 17.70   | 1.509     | 1.228               | 18.895  | 19.910  |
| Roca Redonda    | Velocidad 0 m  | m/s    | Temporal | 0.006  | 0.090   | 0.176   | 0.169           | 0.158   | 0.013     | 0.114               | 0.234   | 0.721   |
| Roca Redonda    | Dirección 0 m  | grados | Temporal | 0.000  | 185.447 | 218.888 | 220.721         | 220.690 | 6455.590  | 80.346              | 281.358 | 353.660 |
| Roca Redonda    | Velocidad 5 m  | m/s    | Temporal | 0.016  | 0.132   | 0.200   | 0.199           | 0.200   | 0.008     | 0.092               | 0.258   | 0.457   |
| Roca Redonda    | Dirección 5 m  | Grados | Temporal | 15.400 | 69.375  | 166.740 | 166.293         | 197.895 | 8633.094  | 92.914              | 232.365 | 348.38  |
| Roca Redonda    | Velocidad 10 m | m/s    | Temporal | 0.026  | 0.157   | 0.232   | 0.230           | 0.229   | 0.010     | 0.102               | 0.298   | 0.567   |
| Roca Redonda    | Dirección 10 m | Grados | Temporal | 2.010  | 78.530  | 150.369 | 149.146         | 159.885 | 7030.921  | 83.850              | 217.945 | 354.790 |
| Roca Redonda    | Velocidad 15 m | m/s    | Temporal | 0.040  | 0.213   | 0.322   | 0.319           | 0.319   | 0.020     | 0.142               | 0.399   | 0.812   |
| Roca Redonda    | Dirección 15 m | Grados | Temporal | 0.000  | 211.122 | 252.567 | 255.700         | 306.905 | 14030.770 | 118.451             | 334.125 | 358.980 |
| Punta Albemarle | Velocidad 0 m  | m/s    | Temporal | 0.021  | 0.088   | 0.172   | 0.169           | 0.157   | 0.009     | 0.098               | 0.241   | 0.462   |
| Punta Albemarle | Dirección 0 m  | Grados | Temporal | 0.000  | 38.747  | 134.707 | 132.678         | 110.815 | 12590.950 | 112.209             | 211.940 | 356.590 |
| Punta Albemarle | Velocidad 5 m  | m/s    | Temporal | 0.002  | 0.109   | 0.228   | 0.226           | 0.216   | 0.018     | 0.136               | 0.337   | 0.540   |
| Punta Albemarle | Dirección 5 m  | Grados | Temporal | 1.930  | 35.400  | 108.191 | 104.793         | 56.4    | 10748.510 | 103.675             | 179.295 | 357.780 |
| Punta Albemarle | Velocidad 10 m | m/s    | Temporal | 0.018  | 0.221   | 0.368   | 0.368           | 0.374   | 0.032     | 0.180               | 0.514   | 0.709   |
| Punta Albemarle | Dirección 10 m | Grados | Temporal | 0.670  | 32.767  | 144.556 | 142.952         | 62.545  | 17065.430 | 130.634             | 301.830 | 358.710 |
| Punta Albemarle | Velocidad 15 m | m/s    | Temporal | 0.016  | 0.129   | 0.2208  | 0.217           | 0.200   | 0.0128    | 0.113               | 0.295   | 0.574   |
| Punta Albemarle | Dirección 15 m | Grados | Temporal | 0.000  | 23.677  | 127.089 | 124.787         | 58.085  | 14138.690 | 118.906             | 237.550 | 355.360 |

**Tabla 10.** Resumen descriptivos de los valores encontrados en las estaciones de muestreo en Roca Redonda y en Punta Albemarle (Continuación).

| Lugar        | Variable     | Unidad  | Tipo   | Mínimo | Q1     | Media  | Media recortada | Mediana | Varianza | Desviación Estándar | Q3     | Máximo |
|--------------|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|-----------------|---------|----------|---------------------|--------|--------|
| Roca Redonda | Temperatura  | °C      | Perfil | 17.773 | 18.146 | 18.809 | 18.809          | 18.654  | 0.557    | 0.746               | 19.207 | 20.265 |
| Roca Redonda | Salinidad    | UPS     | Perfil | 34.491 | 34.850 | 34.889 | 34.889          | 34.925  | 0.021    | 0.1476              | 34.981 | 35.112 |
| Roca Redonda | Densidad     | Sigma t | Perfil | 24.200 | 24.836 | 25.015 | 25.015          | 25.090  | 0.079    | 0.282               | 25.240 | 25.400 |
| Roca Redonda | Fluorometría | Kg*m-3  | Perfil | 0.029  | 0.491  | 0.462  | 0.462           | 0.513   | 0.027    | 0.164               | 0.554  | 0.579  |

## CAPÍTULO 4

### 4. Conclusiones y Recomendaciones

#### 4.1 Conclusiones

Existe una diferenciación estacional marcada en los parámetros físicos (temperatura, salinidad y densidad) tomados *in situ*.

Se puede indicar que la influencia de Cromwell es muy importante en la zona de estudio, lo cual aporta con características diferentes a nivel oceanográfico especialmente en salinidad.

Los valores de corrientes en el fondo del sitio de estudio y en el de control son valores bajos, que contrastan con la información inicial que se creía poder encontrar en el lugar de estudio.

En las capas superficiales se observan los mayores valores en magnitud de las corrientes en ambas estaciones (Roca Redonda y control).

El pH en la zona es notoriamente “ácido” en las dos estaciones del año (6.8 en seca y 6.9 en húmeda), se concluye que a pesar de que es una variable termo dependiente, la diferencia de temperatura entre la época seca y húmeda no influencia a las condiciones ácidas que se mantienen durante todo el año.

El aporte de carbonatos al agua en la zona de estudio es constante durante todo el año.

El sistema de corrientes presente en la zona se ve mayormente influenciado por la presencia de la corriente de Panamá y de Cromwell, así como la geomorfología del lugar.

De los datos colectados in situ, se puede concluir que en Roca Redonda la influencia de las condiciones “ácidas” no es notable luego de los 50 m del centro del punto de las “burbujas”, y tampoco son notables en la capa superficial del lugar.

Se puede concluir adicionalmente, que las condiciones “ácidas” del sitio harán diferente el ecosistema en términos de abundancia y diversidad, en comparación con el sitio de control, esto podrá ser demostrado con estudios posteriores. Roca Redonda muestra presencia de organismos que tal vez ya estén adaptados a las condiciones del lugar.

Finalmente, se concluye que el lugar es especial debido a sus condiciones “ácidas” naturales, que de acuerdo a la información colectada se muestra como el segundo lugar más acidificado a nivel mundial.

#### **4.2 Recomendaciones**

A pesar de que la situación COVID ha cortado múltiples actividades, es necesario reactivar de forma segura los muestreos en el área de estudio.

Es posible cristalizar cooperación interinstitucional para la creación de laboratorios en las islas que permitan analizar nutrientes, oxígeno, los primeros eslabones de la cadena trófica.

Los equipos permiten visualizar el ciclo de marea, sin embargo el tiempo de observación de la marea es insuficiente para determinar un grado de afectación entre ésta y las variables de acidificación. El componente más importante (semidiurno) requiere de al menos un mes de fondeo, por ello, se recomienda así mismo en campañas futuras explorar la posibilidad de fondear el equipo durante un mes.



## CAPITULO 5

### 5. BIBLIOGRAFÍA

Baylis, S. A., Cawley, S. J., Clayton, C. J., & Savell, M. A. (1997). The origin of unusual gas seeps from onshore Papua New Guinea. *Marine Geology*, 137(1-2), 109-120.

Berkenbosch, H. (2006). Roca Redonda Island formation due to development of an extensional transform zone, northern Galápagos Archipelago.

Castillo-Briceño, P., & Navarrete-Mierb, F. (2015). Potenciales Impactos de la Acidificación de los Océanos para las Pesquerías y Acuicultura Marina en Ecuador. [https://www.researchgate.net/publication/298786853\\_Potenciales\\_Impactos\\_de\\_la\\_Acidificacion\\_de\\_los\\_Oceanos\\_para\\_las\\_Pesquerias\\_y\\_Acuicultura\\_Marina\\_en\\_Ecuador/stats](https://www.researchgate.net/publication/298786853_Potenciales_Impactos_de_la_Acidificacion_de_los_Oceanos_para_las_Pesquerias_y_Acuicultura_Marina_en_Ecuador/stats).

Cazar Cadena, S. I. (2015). Vulnerabilidad ante el cambio climático de los ecosistemas y especies icónicas de Galápagos (Bachelor's thesis, PUCE).

Celis-Plá, Paula & Lopez Figueroa, Felix & Korbee, Nathalie & Garreta, Amelia. (2015). Vulnerabilidad y aclimatación de macroalgas del mar mediterráneo, frente al estrés ambiental derivado del cambio climático: uso de indicadores del estado fisiológico. *Boletín de la Sociedad Española de Ficología*. *Boletín Sociedad Española de Ficología*. 54-61.

CEPAL, N. (2018). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe.

Collins, C., Mascarenhas, A., & Martinez, R. (2013). Structure of ocean circulation between the Galápagos Islands and Ecuador. *Adv. Geosci*, 33, 3-12.

Collins, M., An, S. I., Cai, W., Ganachaud, A., Guilyardi, E., Jin, F. F., ... & Vecchi, G. (2010). The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience*, 3(6), 391-397.

Cornwall, C. E., & Eddy, T. D. (2015). Effects of near-future ocean acidification, fishing, and marine protection on a temperate coastal ecosystem. *Conservation Biology*, 29(1), 207-215.

CPPS. 2015. Protocolo del Uso del CTD Sea-Bird y Procesamiento de Datos. Comisión Permanente del Pacífico Sur - CPPS. Guayaquil, Ecuador. 23 p.

Crespo Muñoz, D. (2014). Estudio experimental de la estructura vertical del campo de corrientes observadas en el entorno del Puerto de Bilbao (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Dickson, A. G., & Goyet, C. (1994). Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water. Version 2 (No. ORNL/CDIAC-74). Oak Ridge National Lab., TN (United States).

Dirección de Hidrografía y Navegación (2013). Manual de Procedimientos para la Medición de Corrientes. Normas Técnicas Hidrográficas No. 9. Oceanografía. HIDRONAV – 5138. 1ra. Edición 2013. Marina de Guerra de Perú.

Dirección del Parque Nacional Galápagos. (2014). Plan de Manejo de las Áreas Protegidas de Galápagos para el Buen Vivir. 2014. Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador

Doney, Scott C. (2006). "The dangers of ocean acidification". *Scientific American* 294(3): 38-45. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/47284>

Doo, S.S., Edmunds, P.J., Carpenter, R.C. Ocean acidification effects on in situ coral reef metabolism. (2019). *Scientific Reports*, 9 (1), art. no. 12067. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070807679&doi=10.1038%2fs41598-019-48407-7&partnerID=40&md5=54aac8217fadd721001a3a20985ddb96>

Eden, C. y Timmermann, A. (2004). La influencia de las Islas Galápagos en las temperaturas tropicales, las corrientes y la generación de olas de inestabilidad tropical. *Cartas de investigación geofísica*, 31 (15).

Emery, W.J; Thompson, R.E (1997): *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. 2a ed. Elsevier Science Ltd., 2001. ISBN 9780444507570.

Enochs, I.C., Formel, N., Manzello, D. et al. (2020). Coral persistence despite extreme periodic pH fluctuations at a volcanically acidified Caribbean reef. *Coral Reefs* <https://doi.org/10.1007/s00338-020-01927-5>

Foo, Shawna & Byrne, Maria & Ricevuto, Elena & Gambi, Maria Cristina. (2018). The carbon dioxide vents of Ischia, Italy, a natural system to assess impacts of ocean acidification on marine ecosystems: An overview of research and comparisons with other vent systems.

Gallardo, V. A., & Espinoza, C. (2007). New communities of large filamentous sulfur bacteria in the eastern South Pacific. *International Microbiology*, 10(2), 97.

Gil, C. G. (2018). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): una revisión crítica. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*,(140), 107-118.

Glass, J. B., Fornari, D. J., Hall, H. F., Cougan, A. A., Berkenbosch, H. A., Holmes, M. L., ... & De La Torre, G. (2007). Submarine volcanic morphology of the western Galápagos based on EM300 bathymetry and MR1 side-scan sonar. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(3).

Haymon, R. M., Baker, E. T., Resing, J. A., White, S. M., Macdonald, K. C., & GalAPAGoS TEAM. (2007). Hunting for Hydrothermal Vents Along the Galápagos Spreading Center: Along the Galápagos Spreading Center. *Oceanography*, 20(4), 100-107.

Hernández-Ayón, J. M., Zirino, A., Marinone, S. G., Canino-Herrera, R., & Galindo-Bect, M. S. (2003). Relación pH-densidad en el agua de mar. *Ciencias marinas*, 29(4), 497-508.

Humphreys, A. F., x, J. H., Ingle, J. C., Manzello, D., Raymond, C. E., Westphal, H., & Riegl, B. (2018). Effect of seawater temperature, pH, and nutrients on the

distribution and character of low abundance shallow water benthic foraminifera in the galápagos. PLoS One, 13(9) doi: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0202746>.

IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

IPCC. 2007a. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). IPCC, Geneva.

IPCC-Grupo de Trabajo, I. (2013). Cambio Climático 2013.

Jimenez, R. (1981), Composition and distribution of phytoplankton in the upwelling system of the Galapagos Islands, in Coastal Upwelling, Coastal Estuarine Stud., vol. 1, edited by F. A. Richards, pp. 327– 338, AGU, Washington, D. C.

Knauss, John A. (1997): Introduction to physical oceanography. 2a ed. Illinoise: Waveland Press, Inc., 2005. ISBN 1577664299.

León Rojas, D. F., Ortiz Martínez, R. V., Álvarez Sánchez, W. A., González Martínez, M. H., García Guerrero, J. G., Gutiérrez García, F. A., ... & Santafé Alfonso, O. G. (2019). Manual de Referencia en Mejores Prácticas de Gestión de Datos Oceánicos, Número 4/2019.

León, V., Paulmier, A., Ledesma Rivera, J., Croot, P., Graco, M., Flores Gonzáles, G., ... & Tenorio, J. (2011). pH como un Trazador de la Variabilidad Biogeoquímica en el Sistema de Humboldt.

Lucero, M. I. R. I. A. M., & Cornejo Rodriguez, M. D. P. (1990). Evidencia de la corriente de Cromwell entre 92° W y 84° W, observada en periodos normales y durante El Niño 82–83. Acta Oceanográfica del Pacífico, 6, 18-27.

McCosker, J. E., & Humann, P. H. (1996). New records of Galápagos fishes. Noticias de Galápagos, 56, 18-22.

Newman, M., Compo, G.P. & Alexander, M.A. 2003. ENSO forced variability of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate* 16: 3853–3857.

PNUD (25 junio 2020). Objetivos Desarrollo Sostenible. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-14-life-below-water.html>

Restrepo, J. C., & Pierini, J. O. (2012). Medición de la concentración de sedimentos en suspensión mediante dispositivos ópticos y acústicos: aplicación en sistemas tropicales (Delta del río Mira, Colombia). *Latin american journal of aquatic research*, 40(1), 153-168.

Riegl, B., Johnston, M., Glynn, PW, Keith, I., Rivera, F., Vera-Zambrano, M., Banks, S., Feingold, J., Glynn, PJ. Algunos determinantes ambientales y biológicos de la riqueza del coral, la resiliencia y la construcción de arrecifes en Galápagos (Ecuador). (2019) *Informes científicos*, 9 (1), art. No. 10322. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85069465676&doi=10.1038%2fs41598-019-46607-9&partnerID=40&md5=fb011eb5cec9bec89ecfa99ad890e0f8>

Ruperti, H., Carroll, D., & Breaker, L. (2015). Tendencias en la variabilidad de la temperatura superficial del mar en la costa de Ecuador. *La Técnica: Revista de las Agrocencias*. ISSN 2477-8982, (15), 100-113.

Sachs, J. P., & Ladd, S. N. (2010). *Climate and oceanography of the galapagos in the 21st century: Expected changes and research needs*. Oostende: The International Association of Aquatic and Marine Science Libraries and Information Centers. Retrieved from [https://search.proquest.com/docview/1911380699?accountid=171402;](https://search.proquest.com/docview/1911380699?accountid=171402) <http://aquaticcommons.org/21476/>

Santana-Casiano, J. M., González-Dávila, M., & Fraile-Nuez, E. (2018). The Emissions of the Tagoro Submarine Volcano (Canary Islands, Atlantic Ocean): Effects on the Physical and Chemical Properties of the Seawater. *Volcanoes: Geological and Geophysical Setting, Theoretical Aspects and Numerical Modeling, Applications to Industry and Their Impact on the Human Health*, 53.

Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014). An Updated Synthesis of the Impacts of Ocean Acidification on Marine Biodiversity (Eds: S. Hennige, J.M. Roberts & P. Williamson). Montreal, Technical Series No. 75, 99 pages

Silva, B. J., Gaspar, F. L., Tyaquiçã, P., Lefèvre, N., & Montes, M. J. F. (2019). Carbon chemistry variability around a tropical archipelago. *Marine and Freshwater Research*, 70(6), 767-780.

Spalding, MD, Fox, HE, Allen, GR, Davidson, N., Ferdaña, ZA, Finlayson, MAX, y Martin, KD (2007). Ecorregiones marinas del mundo: una biorregionalización de las zonas costeras y de plataforma. *BioScience* , 57 (7), 573-583.

Standish, J., Geist, D., Harpp, K., & Kurz, M. D. (1998). The emergence of a Galápagos shield volcano, Roca Redonda. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133(1-2), 136-148.

Sweet, W. V., Morrison, J. M., Liu, Y., Kamykowski, D., Schaeffer, B. A., Xie, L., & Banks, S. (2009). Tropical instability wave interactions within the Galápagos Archipelago. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(8), 1217-1229.

windows2universe (2020). Instrumento CTD. Asociación Nacional de Maestros de Ciencias de la Tierra. Última modificación el 13 de diciembre de 2001 por Jennifer Bergman. Recuperado de <https://www.windows2universe.org/earth/Water/CTD.html&edu=high&lang=sp>

Wolff, M. 2010. Galapagos does not show recent warming but increased seasonality. *Galapagos Research* 67: 38–44.

Wong, A., Keeley, R., & Carval, T. (2020). Argo quality control manual for CTD and trajectory data.

Woods Hole Oceanographic Institution (2007): Conductivity, Temperature, Depth (CTD) Sensors. [en línea]. [Consulta: 19/04/2013]. Disponible en: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=8415&tid=3622&cid=1003>

Yamamoto, Shoji. (2018). Ocean Acidification Studies in Coral Reefs of Japan. 10.1007/978-981-10-6473-9\_5.

6. ANEXOS

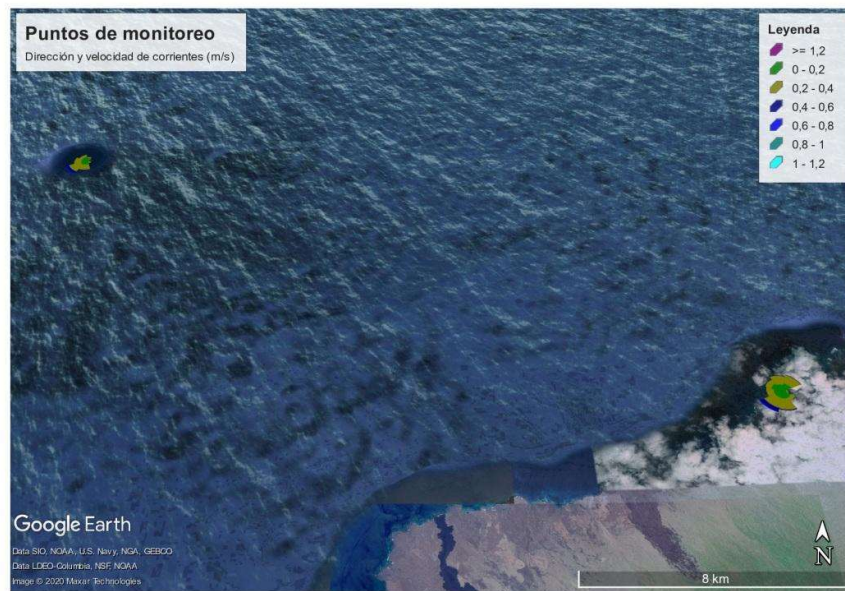


Figura 35. Vista general de los puntos de medición de corrientes en el área de estudio.

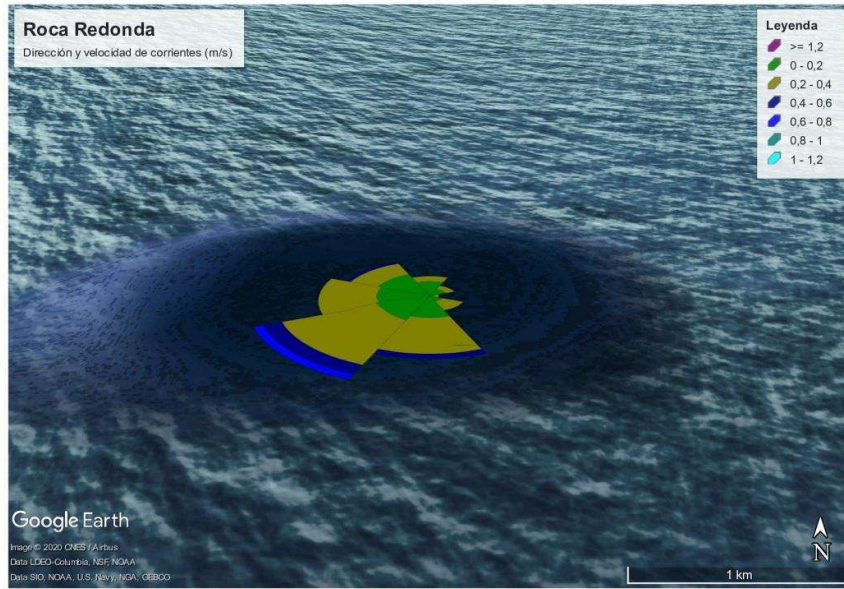


Figura 36. Corrientes registradas en el fondo del punto acidificado. Roca Redonda.

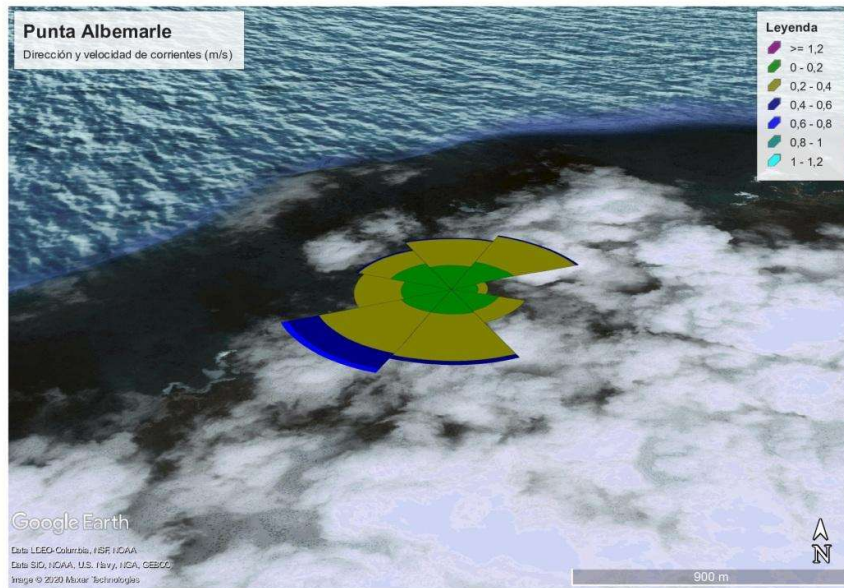
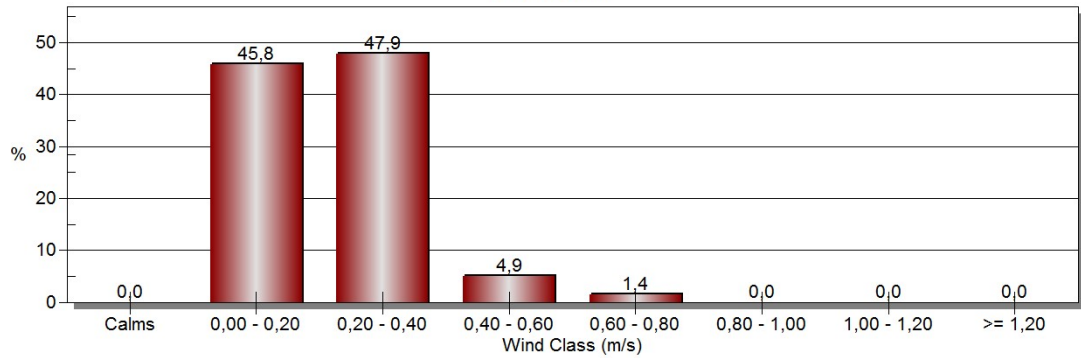


Figura 37. Corrientes registradas en el fondo del punto de control. Punta Albemarle.



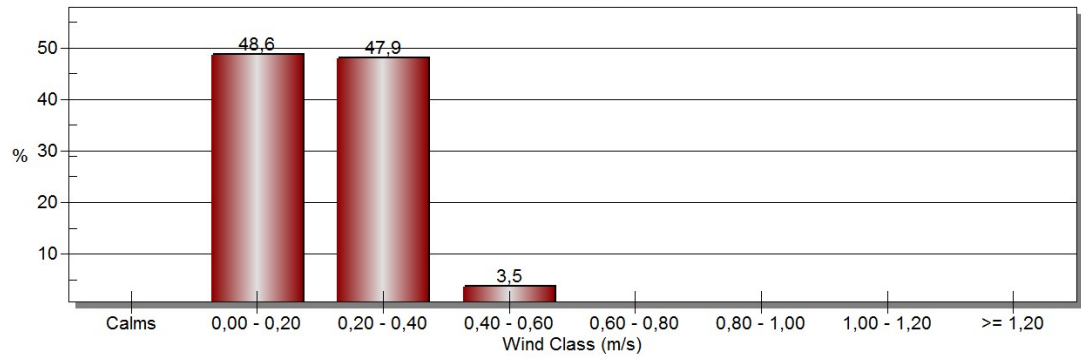
Distribución de corrientes por clase

Roca Redonda



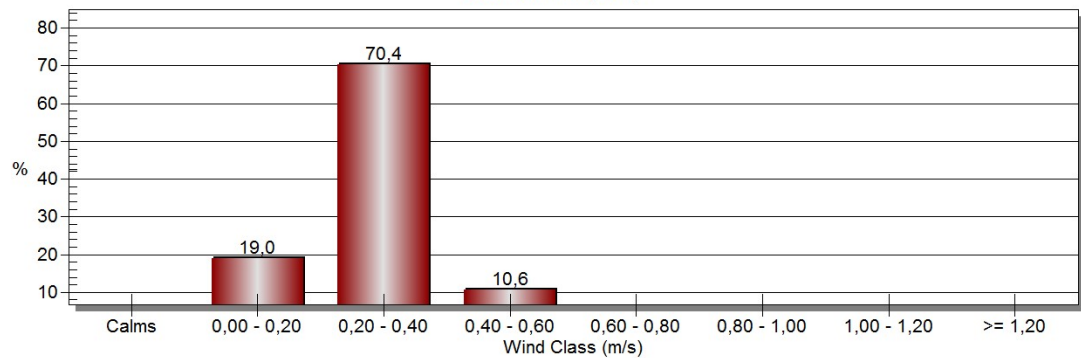
Distribución de corriente por clase

Roca Redonda (5 m)



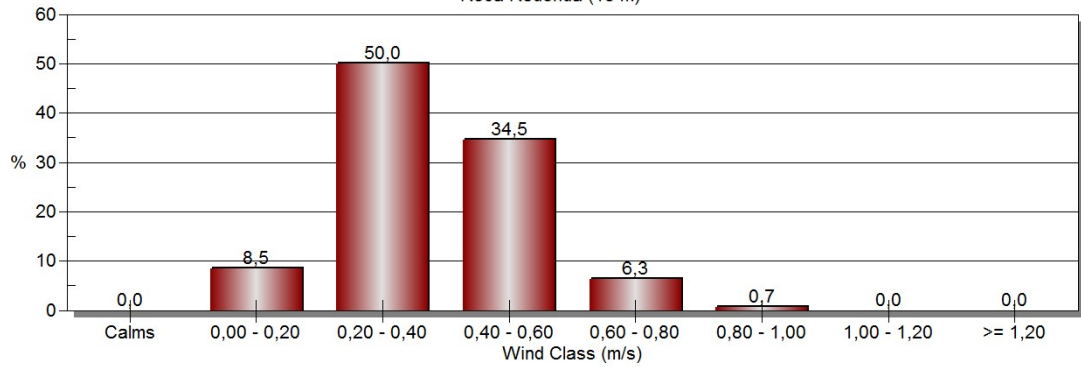
Distribución de corrientes por clase

Roca Redonda (10 m)



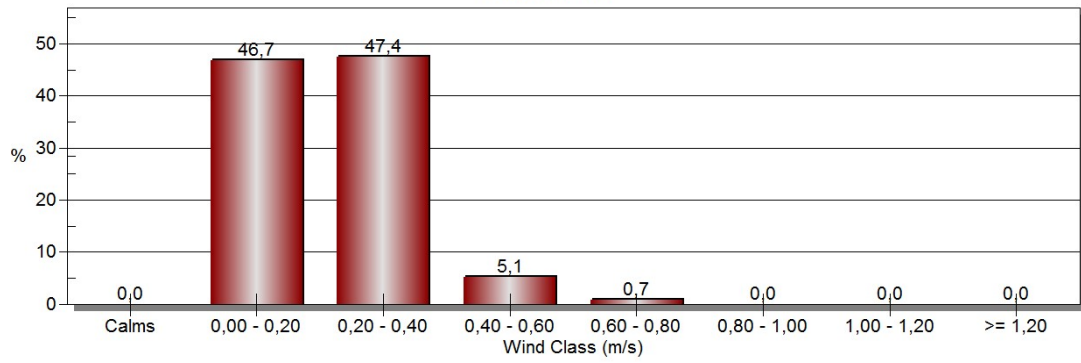
### Distribución de corrientes por clase

Roca Redonda (15 m)



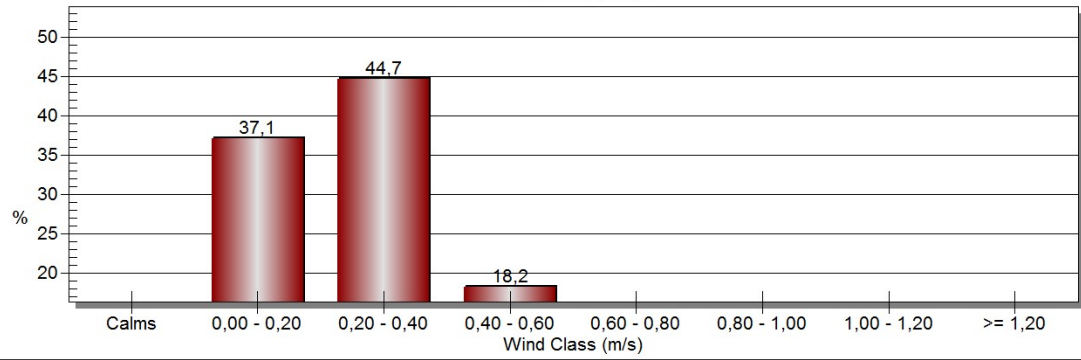
### Distribución de corrientes por clase

Punta Albemarle



### Distribución de corrientes por clase

Punta Albemarle (5 m)



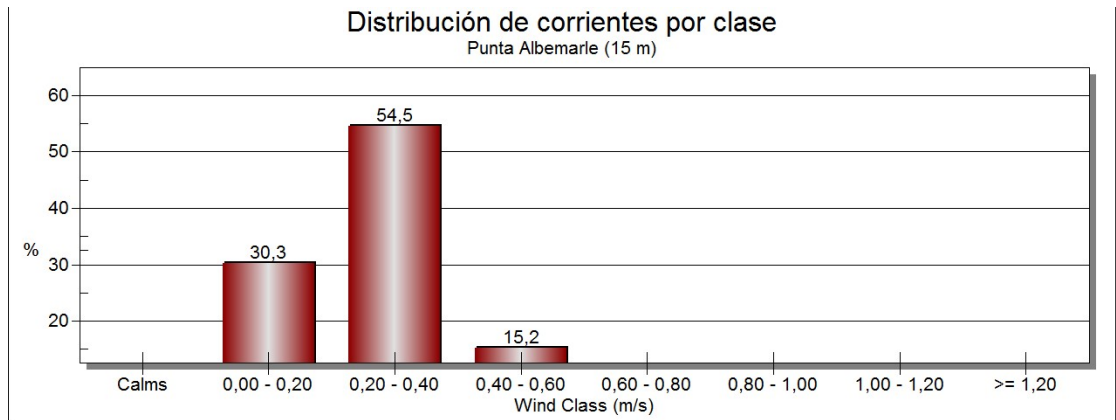
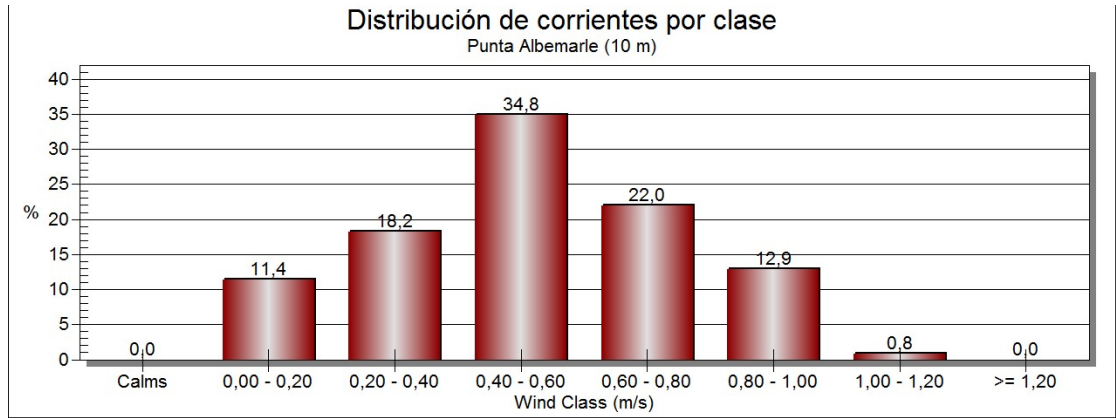




Figura 38. Equipos de medición instalados en el fondo del sitio de muestreo

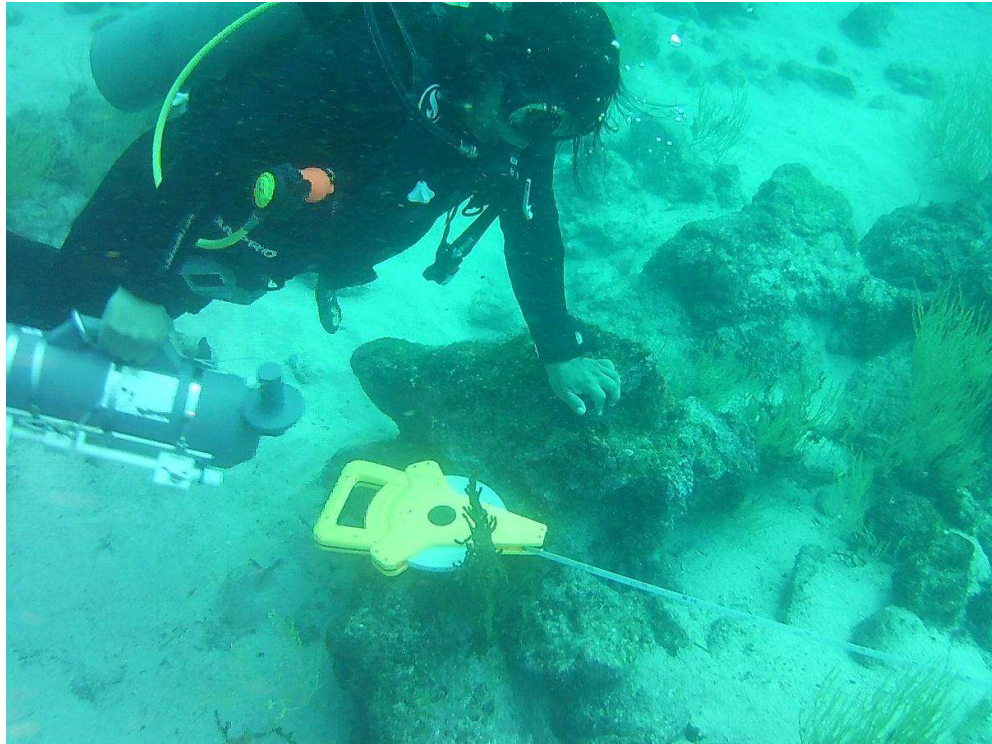


Figura 39. Toma de muestra de agua para medición de pH y otros parámetros químicos en el lugar de estudio.