

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Validación de un modelo de habitabilidad quimiosintética

Autor: Elizabeth Cepero Rodríguez

Tutor: Dr. C. Rolando Pedro Cárdenas Ortiz

Cotutor: Mr. C. Noel Pérez Díaz

Consultante: Lic. Jorge D. Hernández Llanes

Santa Clara 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Dedicatoria

En especial a mis padres, por tanto sacrificio y dedicación en todos estos años.

A mis abuelos que siempre me han apoyado y confiado ciegamente en mi.

A mi esposo, que más que apoyarme me ayudó en todo momento y siempre estuvo cuando lo necesité.

A mi abuela, donde sea que esté, se que está feliz de verme aquí.

A mi hermano, que le sirva de experiencia para su vida.

En general a toda mi familia y amigos.....

Agradecimientos

Quisiera agradecer a toda mi familia de forma general, especialmente a mis padres, por su dedicación incansable en la tarea de llevarme por el camino del bien y la superación personal, por todos los sacrificios durante todo este tiempo, solo ellos conocen de las penas vividas. A mis abuelos que siempre se han estado para apoyarme en todos los sentidos y nunca han dudado de mis capacidades. A mi esposo, mi mejor amigo, mi compañero de estudio durante estos cinco años, por estar ahí y ayudarme incondicionalmente, por brindarme su apoyo y sus consejos ante los buenos y los malos momentos, por amarme cada día. A mis tíos que de una forma jocosa siempre me han apoyado.

Gracias a mis tutores por acogerme en su grupo cuando parecía sin salida y hacerme sentir como una más, por su disposición a atenderme en cualquier momento y ante cualquier duda.

Agradezco a muchos profesores, entre ellos al profe Jorge David que desde primer año me ha ayudado mucho, al profe Ribalta que siempre me ha alentado a darlo todo de mi, a nuestra decana que en los momentos más difíciles que he pasado siempre mostró su comprensión y solidaridad, a la profe Nany que también estuvo durante las dificultades para mostrar su brazo amigo. En general a todos los que han estado presente, no solo en los momentos finales, sino durante estos cinco años recorriendo junto a todos el camino hasta convertirnos en Licenciados en Química.

A mis amigos, esos que nunca me abandonaron, a pesar de muchas dificultades que se han presentado.

A mis compañeros de aula, por compartir este tiempo juntos de alegrías y penurias, que solo los estudiantes vivimos, por enseñarme muchas cosas entre ellas la competitividad.

Resumen

En el presente trabajo se avanza en la validación de un modelo matemático, con el cual se puede calcular un Índice de Habitabilidad Quimiosintético. Para ello se trabajó con un modelo generado en trabajos anteriores y con datos reportados en la Unión Triple de Rodríguez. Primeramente se obtuvo valores reales del parámetro q (eficiencia quimiosintética), luego se procedió a validar el modelo, mediante un análisis de sensibilidad, de los residuos y métodos paramétricos. Con la realización de este proyecto se pretende proponer el uso del modelo con un 95% de confianza para predecir el potencial de albergar vida quimiosintética en ecosistemas del planeta Tierra o fuera de este.

Abstract

In the present work we advance in the validation of a mathematical model, with which a Quimiosynthetic Habitability Index can be calculated. For this, we worked with a model generated in previous works and with data reported in the Union Triple de Rodríguez. First real values of the parameter were obtained (chemosynthetic efficiency), then the model was validated, through a sensitivity analysis, of the residuals and parametric methods. With the realization of this project it is intended to propose the use of the model with 95% confidence to predict the potential of harboring chemosynthetic life in ecosystems of the planet Earth or outside of it.

Tabla de Contenidos

<i>INTRODUCCIÓN</i>	8
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	13
1.1 Fases de la Quimiosíntesis.....	13
1.1.1 Fase generadora de ATP y poder reductor.....	14
1.1.2 Fijación de CO ₂	14
1.2 Los Respiraderos Hidrotermales.....	14
1.3 Reacciones de Relevancia.....	16
1.3.1 Reacciones del Azufre.....	16
1.3.2 Reacciones del Nitrógeno.....	17
1.3.3 Reacciones del Hierro.....	19
1.3.4 Reacciones del Hidrógeno.....	20
1.3.5 Otras Reacciones.....	21
1.4 Cuantificación de la Habitabilidad.....	21
1.4.1 Habitabilidad Primaria: el Rol de la Luz.....	22
1.4.2 La Función de la Luz.....	23
1.4.3 La Función de la Temperatura.....	23
1.4.4 Habitabilidad Primaria Acuática: el Rol de los Nutrientes.....	23
1.5 Modelos Matemáticos.....	24
.....	26
.....	26
<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	26
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
2.1 Teoría Cuantitativa de la Habitabilidad.....	27
2.2 Diseño de la Función Química $f(Q)$	28
2.3 Función de la Temperatura.....	29
2.4 Función de los Nutrientes.....	30
2.5 Métodos de validación.....	30
2.5.1 Métodos paramétricos de análisis.....	31
2.6 Unión Triple de Rodríguez.....	31
.....	33
<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	33
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
3.1 Determinación experimental del Índice de Habitabilidad y la eficiencia quimiosintética.....	34
3.2 Análisis de sensibilidad.....	35
3.3 Validación del modelo.....	37
3.3.1 Determinación del coeficiente de correlación y análisis de regresión.....	37
3.3.2 Análisis de ANOVA.....	38
3.4 Comparación de resultados.....	39
3.5 Recomendación de pautas a seguir para aplicar el modelo.....	41
.....	43
CONCLUSIONES.....	43
CONCLUSIONES.....	44
RECOMENDACIONES.....	45
.....	46
.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
ANEXOS.....	50

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Desde el surgimiento del hombre, este ha intentado darle explicación a los fenómenos que ocurren a su alrededor. Unos de los misterios aún sin resolver es el origen de la vida en el planeta Tierra, muchas son las teorías que intentan explicarlo, pero falta mucho camino por recorrer para hallar una respuesta certera.

Un nuevo estudio de investigadores del Laboratorio de Propulsión a Chorro y el Instituto de Astrobiología de la NASA apoya la Teoría del "Mundo de Agua" para el Origen de la Vida y describe como la energía eléctrica producida de forma natural en el fondo del mar pudo haber dado origen a la vida en la Tierra hace 4.000 millones de años. Aunque los científicos ya habían propuesto esta hipótesis llamada "aparición de vida hidrotermal alcalina submarina" el nuevo estudio reúne décadas de trabajo de campo, de laboratorio e investigación teórica en una gran imagen unificada.

"La teoría de Michael Russell se originó hace 25 años y, desde ese momento, las misiones espaciales, han encontrado una fuerte evidencia de océanos de agua líquida y fondos rocosos en Europa y Encelado". "Hemos aprendido mucho sobre la historia del agua en Marte, y pronto podemos encontrar planetas similares a la Tierra alrededor de estrellas lejanas. Al probar esta hipótesis del origen de la vida, podemos explicar cómo la vida podría haber surgido en otros lugares de nuestro Sistema Solar o más allá, y también tener una idea de cómo buscarla".

Hasta hace unas pocas décadas se pensaba que la vida basada en la fotosíntesis era mucho más común que la basada en la quimiosíntesis, debido a que los organismos fotosintéticos son los abundantes en los entornos de fácil acceso, mientras que los organismos quimiosintéticos se encuentran en las profundidades oceánicas. Sin embargo, a partir de los años 1980 se han logrado grandes avances en la tecnología que han permitido acceder a estos entornos tan recónditos y hasta el presente se ha evidenciado que los microorganismos quimiotróficos (autótrofos y heterótrofos) permean los kilómetros

superiores de la corteza continental y las profundidades oceánicas, e incluso juegan un rol decisivo en el control de la química del agua en la hidrosfera (Bethke, 2008).

De tales descubrimientos ha nacido un nuevo modelo de biosfera en la Tierra, la cual cuenta con una biosfera superficial (eubiosfera) que depende fundamentalmente de la fotosíntesis y con estado redox oxidante, una bacteriosfera en la corteza profunda en la que solo habitan bacterias procariotas que realizan quimiosíntesis a partir de compuestos que provienen del manto terrestre (sobre todo compuestos de azufre) y con estado redox reductor, y una deuterobiosfera intermedia en la interfase oxidante-reductora del planeta que depende de ambos mecanismos de producción primaria, aunque probablemente en mayor medida de la quimiosíntesis (Schulze-Makuch and Irwin, 2008).

En la actualidad luego de analizar todos estos avances algunos autores han llegado a plantear que la vida en el planeta Tierra pudo haber surgido en las profundidades oceánicas donde la luz prácticamente no llega con tan intensidad como para que los organismos utilicen su energía para vivir y sí existe y existía fuentes hidrotermales donde ocurren las reacciones químicas necesarias para la vida de algunos organismos, también se ha planteado que la biomasa total de vida subterránea en las profundidades oceánicas sea superior a la superficial.

Por todo esto, se puede afirmar que en el momento de estimar cuantitativamente la habitabilidad de un ecosistema o un cuerpo planetario tiene igual importancia la quimiosíntesis y la fotosíntesis, a pesar que la fotosíntesis es la más estudiada hasta el momento.

Luego de un estudio exhaustivo de los entornos quimiosintéticos en la Fumarola TY del Pacífico Este, se obtuvo en trabajos anteriores un modelo matemático, con el cual se puede obtener el Índice de Habitabilidad para estos ambientes, pero dicho modelo no cuenta con los análisis estadísticos de relevancia para utilizarlo con un nivel de confianza determinado que asegure buenos resultados.

Problema Científico:

Teniendo en cuenta que no existen muchos trabajos, ni datos de este tema, la importancia que tiene hoy en día un mejor entendimiento de la vida en la Tierra, y continuar en la búsqueda de nuevos planetas habitables por cualquier tipo de vida, es necesario validar el modelo matemático que calcula un Índice de Habitabilidad para organismos quimiosintéticos con un buen nivel de confianza que permita su utilización en la predicción de habitabilidad.

Hipótesis

¿Es posible mediante la utilización del coeficiente de correlación y los análisis de regresión y ANOVA, validar el modelo que predice un Índice de Habitabilidad para organismos quimiosintéticos?

Objetivo General:

Validar el modelo matemático que se utiliza para calcular un Índice de Habitabilidad Quimiosintético.

Objetivos Específicos:

- Obtener experimentalmente los valores de (q) (eficiencia quimiosintética).
- Realizar las pruebas de determinación del coeficiente de correlación, regresión y ANOVA para la validación del modelo.
- Proponer las pautas a seguir para aplicar el modelo.

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

La quimiosíntesis consiste en la síntesis de ATP a partir de la energía que se libera en reacciones de compuestos inorgánicos reducidos. Los organismos que realizan quimiosíntesis se denominan quimoautótrofos, quimiolitótrofos o quimiosintéticos; todos ellos son bacterias que usan como fuente de carbono el dióxido de carbono en un proceso similar al ciclo de Calvin de las plantas. Esta depende de la existencia de potenciales químicos importantes, los que acompañan a mezclas no estables de sustancias, las cuales aparecen sólo localmente, allí donde los procesos geológicos las han generado. Así, cadenas alimentarias completas basan su existencia en la producción quimiosintética en torno a las emanaciones hidrotermales que se encuentran en las dorsales oceánicas, así como en sedimentos profundos. La quimiosíntesis fue predicha en 1890 por el microbiólogo, ecólogo y edafólogo ruso-ucraniano Sergei Nikolaievich Vinogradsky. Su predicción fue corroborada en 1977 cuando el submarino Alvin, el primer sumergible de océano profundo, detectó ecosistemas basados en la quimiosíntesis en la falla de las Islas Galápagos, punto caliente volcánico del Pacífico Este. A partir de ese momento se han sucedido descubrimientos de tales ecosistemas en muchas partes del planeta (Nodarse, 2017). Desde el punto de vista teórico, se ha planteado que en cualquier proceso químico de oxidación – reducción en donde se genere como mínimo una energía libre de 10kJ/mol podrá sostener vida microbiana (Pohlman, 2011). En la práctica, varios estudios demuestran la existencia de un gran número de reacciones químicas que son de gran importancia para la quimiosíntesis, así como de un grupo de bacterias quimiosintéticas que son capaces de utilizar estas.

1.1 Fases de la Quimiosíntesis

La quimiosíntesis tiene ciertos paralelismos con la fotosíntesis; en ambas hay dos fases bien definidas, una en la que se genera ATP y poder reductor y otra en la que se fija el dióxido de carbono.

1.1.1 Fase generadora de ATP y poder reductor

En esta fase se oxidan moléculas inorgánicas reducidas presentes en el medio; las principales son el hidrógeno (H_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el azufre elemental (S), el tiosulfato ($S_2O_3^-$), el amoníaco (NH_3), los nitritos (NO_2^-) y el hierro ferroso (Fe^{2+}). Los electrones arrancados a estos sustratos ingresan en una cadena transportadora de electrones, análoga a la de la respiración mitocondrial; como en ella, el aceptor final de los electrones es el oxígeno, y se produce la fosforilación oxidativa, que genera ATP.

Para generar poder reductor, en forma de coenzimas reducidos (sobre todo NADH), una parte del ATP producido se utiliza para provocar un transporte inverso de electrones en la misma cadena transportadora.

Esta fase es análoga a la fase luminosa de la fotosíntesis, aunque completamente diferente, ya que no utiliza la luz para generar el flujo de electrones.

1.1.2 Fijación de CO_2

Los organismos quimiolitótrofos son autótrofos para el carbono, es decir, pueden incorporarlo a partir de carbono inorgánico en forma de (CO_2). La fijación del dióxido de carbono a la materia orgánica se realiza mediante el ciclo de Calvin, de una manera similar a la fase oscura de la fotosíntesis.

1.2 Los Respiraderos Hidrotermales

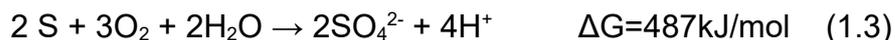
Una fuente hidrotermal, también conocida como respiradero hidrotermal, fumarero o fumarola hidrotermal, se origina por una fisura en la corteza del planeta. Fueron los primeros ecosistemas en que se documentó la quimiosíntesis como mecanismo de producción primaria.

Los respiraderos hidrotermales se encuentran comúnmente en lugares que son volcánicamente activos, donde el magma está relativamente cerca de la superficie del planeta. En los alrededores de estas fuentes hidrotermales a menudo se hospedan comunidades complejas de organismos que se alimentan de los compuestos químicos

disueltos en los fluidos que emiten (Nodarse, 2017).

Durante años la vida ha sido vista dependiente de la energía proveniente del Sol, pero aquellos organismos de aguas profundas no tienen acceso a la luz solar, por lo que, dependen de los nutrientes que se encuentran en los depósitos de polvo y productos químicos de los fluidos hidrotermales en el que viven. Hasta la primera mitad del siglo pasado, se pensaba que la vida submarina dependía de la vida fotosintética existente cerca de la superficie, donde reciben luz solar. Estudios realizados desde los años 80 del siglo pasado muestran que si este fuera el único mecanismo por el cual se obtienen los nutrientes y la energía necesaria para mantener la vida, hubiese muy poca diversidad en las profundidades del mar. Sin embargo, se ha demostrado que en el fondo del mar en las zonas de respiraderos hidrotermales hay una gran población de microorganismos. Allí la vida se puede sostener gracias a un conjunto de bacterias quimiosintéticas que aprovechan los compuestos minerales disueltos que provienen de los respiraderos hidrotermales. Estas bacterias quimiosintéticas son capaces de utilizar los compuestos de azufre, en particular sulfuro de hidrógeno, compuesto químico altamente tóxico para la gran mayoría de los organismos, para producir materia orgánica mediante el proceso de quimiosíntesis. Estas son la fuentes básicas de alimentación para el resto de los organismos del fondo oceánico.

Estos respiraderos surgen cerca de las dorsales oceánicas, donde se crea y se expande la nueva corteza terrestre y el magma fluye cerca de la superficie. El agua del mar se cuele por dentro de las fisuras del suelo y se calienta al entrar en contacto con la roca caliente del manto con temperaturas de hasta 1200 °C (Bethke, 2008).



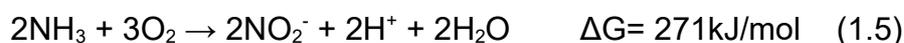
Existe todo un grupo de bacterias quimiosintéticas que son capaces de tomar compuestos tóxicos de azufre como el sulfuro de hidrógeno para producir materia orgánica, estas son conocidas como bacterias incoloras del azufre y son bacterias aerobias obligadas, ya que necesitan oxígeno para la oxidación. El término incoloras es empleado para diferenciar dicho grupo de las bacterias fotosintéticas pigmentadas (bacterias fotosintéticas verdes y púrpuras). Es conveniente señalar que, en las reacciones de oxidación de azufre descritas anteriormente, uno de los productos generados es H^+ . Por lo tanto, una de los resultados de la oxidación de compuestos de azufre, por bacterias de azufre incoloras, es la acidificación del medio. El ácido que generan estas bacterias es ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Nodarse, 2017)

Esta reacción del azufre tiene gran importancia no solo para las bacterias quimiosintéticas, sino también para los ciclos biogeoquímicos, posibilitando así la vida en el planeta, ya que esta reacción es la que cierra el ciclo del azufre. Estos compuestos reducidos que utilizan las bacterias proceden de la descomposición de la materia orgánica, al oxidarlas, se transforma en sustancias minerales, SO_4^{2-} , que pueden ser absorbidas por las plantas.

1.3.2 Reacciones del Nitrógeno

Dentro del conjunto de reacciones que tienen lugar con el nitrógeno hay tres de gran importancia, ellas son:

1) Reacción nitrosificante



Como ejemplo de bacterias quimiosintéticas que son capaces de realizar este tipo de reacción están las *Nitrosomonas* también conocidas como bacterias nitrosificantes (Kartal *et al.*, 2013).

2) Reacción nitrificante

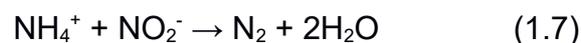


Entre las bacterias que realizan este tipo de reacción están las *Nitrobacter* conocidas también como bacterias nitrificantes (Kartal *et al.*, 2013).

Estas bacterias están ampliamente difundidas en el suelo y son las responsables de oxidar amoníaco (NH_3), generalmente procedente de la descomposición de la materia orgánica (cadáveres, excreción), y transformarlo en nitratos (NO_3^-) asimilables por las plantas; cerrando así el ciclo del nitrógeno (Kartal *et al.*, 2013).

3) Oxidación Anaeróbica del Amonio

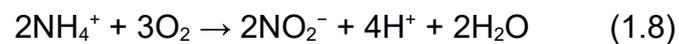
La oxidación anaeróbica del amonio (Anammox, por sus siglas en inglés) es un proceso microbiano globalmente importante del ciclo del nitrógeno (Reimann, Jetten and Keltjens, 2015). Las bacterias mediadoras de este proceso fueron identificadas en 1999, y en ese momento fueron una gran sorpresa para la comunidad científica. La reacción química se muestra:



Este proceso es responsable del 30-50% del N_2 gaseoso que se produce en los océanos. Las bacterias que realizan el proceso anammox pertenecen al filo bacteriano *Planctomycetes*. En la actualidad, se han descubierto cinco géneros de anammox: *Brocadia*, *Kuenenia*, *Anammoxoglobus*, *Jettenia* (todas las especies de agua dulce) y *Scalindua* (especies marinas). Las bacterias *anammox* se caracterizan por varias propiedades sorprendentes: todas poseen un anammoxosoma, un compartimento unido a la membrana dentro del citoplasma en donde se realiza esta reacción química (Reimann, Jetten and Keltjens, 2015). El proceso de anammox que se encontró originalmente, se

encontraba a temperaturas de 20 °C a 43 °C, pero recientemente, se ha encontrado procesos de este tipo alrededor de 36°C a 52°C en aguas termales y 60 °C a 85 °C en los respiraderos hidrotermales situados a lo largo de la cordillera del Atlántico Medio (Li *et al.*, 2010).

La aplicación del proceso de anammox se encuentra en la eliminación de amonio en el tratamiento de aguas residuales y consiste en dos procesos separados. El primer paso es la nitrificación parcial (nitritación) de la mitad del amonio a nitrito por las bacterias oxidantes del amoníaco:



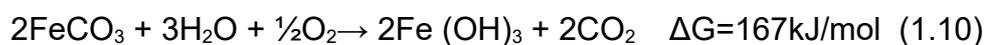
El amonio y el nitrito resultantes se convierten en el proceso anammox a gas dinitrógeno y alrededor del 15% de nitrato (no mostrado) por las bacterias anammox:



Ambos procesos pueden tener lugar en un reactor donde dos gremios de bacterias forman gránulos compactos. (Shelton, 2013)

1.3.3 Reacciones del Hierro

1) Reacción de oxidación del Hierro



En los océanos profundos, las bacterias oxidantes del hierro derivan sus necesidades energéticas oxidando el hierro (II) en hierro (III). El electrón extra obtenido de esta reacción alimenta las células, reemplazando o aumentando el fototrofismo tradicional. El hierro ferroso se oxida espontáneamente a pH neutro, pero no a pH ácido, por lo que estas bacterias del hierro deben vivir en ambientes ácidos para su supervivencia; las *Acidithiobacillus ferrooxidans* son un ejemplo de estas. En general, las bacterias oxidantes del hierro sólo pueden existir en áreas con altas concentraciones de hierro, como nuevos

lechos de lava o áreas de actividad hidrotérmica (donde hay Fe disuelto). La mayor parte del océano carece de hierro, debido tanto al efecto oxidativo del oxígeno disuelto en el agua como a la tendencia de los procariontes a tomar el hierro. Las camas de lava proveen a las bacterias con hierro directamente del manto de la Tierra, pero sólo las rocas ígneas recién formadas tienen niveles suficientemente altos de hierro no oxidado. Lo que aún se desconoce es cómo las bacterias del hierro extraen el hierro de la roca. Los respiraderos hidrotermales también liberan grandes cantidades de hierro disuelto en el océano profundo, permitiendo que las bacterias sobrevivan (Nodarse, 2017).

2) Reacción de formación de la bornita y la pirita



Estas reacciones ocurren a partir de la calcopirita y cuando el Fe no está suelto en el agua oceánica. Estos minerales que se forman, representan un gran por ciento de los que se expulsan por las chimeneas de las fumarolas negras (Halbach, Blum and Münch, 1998).

1.3.4 Reacciones del Hidrógeno



Las bacterias del hidrógeno (son aquellas que son capaces de realizar este tipo de reacción), son quimioautótrofas facultativas capaces de utilizar hidrógeno molecular como fuente de energía (Nodarse, 2017).

Todas estas bacterias se pueden encontrar en hábitats como los sedimentos profundos o alrededor de relieves submarinos o dorsales oceánicas donde la corteza terrestre es delgada y existen respiraderos hidrotermales. Estas bacterias transforman los productos químicos que se emiten de estos respiraderos hidrotermales, en su mayoría tóxicos para

muchos seres vivos, en alimento y energía, desempeñando el papel de organismos productores en el ecosistema. A partir de estas bacterias pueden surgir pequeñas cadenas tróficas basadas en la quimiosíntesis, en vez de la fotosíntesis. En la industria también son muy apreciadas por contener enzimas que pueden soportar condiciones de elevada temperatura y presión. Algunas de ellas pueden convertir compuestos químicos peligrosos en otras formas menos nocivas para la vida y por ello son ideales para la limpieza de zonas con derrame de petróleo y, de forma general, en el tratamiento de residuos tóxicos (Nodarse, 2017)

1.3.5 Otras Reacciones

Se han reportado otras reacciones, detectadas en menor medida, y en general se considera que el inventario de procesos redox de utilidad para la quimiosíntesis no está cerrado. Un ejemplo es la oxidación de Mn^{2+} a Mn^{4+} por parte de las bacterias oxidantes del manganeso en rocas ígneas de lava. El manganeso es mucho más raro que el hierro en la corteza oceánica, pero es mucho más fácil para las bacterias extraerlo del vidrio ígneo.

1.4 Cuantificación de la Habitabilidad

La habitabilidad es una medida de cualquier entorno de sustentar vida, desde un cuerpo cósmico hasta un ecosistema. En este contexto se desarrolla la Teoría Cuantitativa de la Habitabilidad (Aguila and Aguila, 2014) cuyo objetivo es estudiar la distribución, abundancia y productividad de la vida. La misma puede ser aplicada a cualquier forma de vida, desde organismos procariotas (organismos cuyas células no poseen núcleo definido, como las bacterias), hasta eucariotas (organismos cuyas células tienen un núcleo definido separado del citoplasma, como las plantas).

De especial interés es la emergente e interdisciplinaria Teoría Cuantitativa de la Habitabilidad (TCH), que traza un puente entre la Ecología y la Astrobiología, y cuyo objetivo es explicar la distribución, abundancia y productividad de la vida (Cárdenas and

Martín, 2017). Es escalable en espacio y tiempo, de manera que puede ser aplicada tanto a escala de planeta como de ecosistema, a cualquier tipo de vida y en cualquier etapa de la evolución del Universo (Cardenas *et al.*, 2014). Su principal postulado plantea que, en principio, un índice de habitabilidad puede ser escrito como un producto de funciones f_i de conjuntos de variables ambientales que influyen sobre la vida

$$IH = \prod_{i=1}^n f_i \{X_i\} . \quad (1.14)$$

Un aspecto importante de los índices de habitabilidad es que a través de estos se puede hacer una estimación de la productividad primaria neta PPN .

$$PPN = IH \cdot PPN_{\max} , \quad (1.15)$$

donde PPN_{\max} es la productividad primaria neta máxima que el entorno natural en estudio puede sostener indefinidamente; es la máxima velocidad a la que se puede formar materia viva, e IH es el índice de habitabilidad para cualquier ecosistema, el cual es adimensional y su valor se encuentra entre cero y uno, donde cero representa que el entorno no puede albergar vida y uno que tiene gran potencial para la vida.

1.4.1 Habitabilidad Primaria: el Rol de la Luz

En los ecosistemas acuáticos basados en la fotosíntesis las variables ambientales que más influyen en la habitabilidad están relacionadas con la luz y la temperatura (aspecto energético), los nutrientes y la salinidad (aspecto mineral). La selección de las variables para construir un índice de habitabilidad depende de dónde se aplicará éste. En la actualidad, la luz es el factor natural limitante más importante, lo cual es más acentuado para todos los ecosistemas cuando es de noche (Cardenas *et al.*, 2014).

Teniendo en cuenta lo expuesto en este epígrafe, se propone el Índice Habitabilidad Primaria Acuática (HPA) considerando el aspecto energético de la vida (Aguila and Aguila, 2014)

$$HPA = f_e = f(L) \cdot f(T) , \quad (1.16)$$

donde $f(L)$ y $f(T)$ son funciones de la luz y la temperatura, respectivamente.

1.4.2 La Función de la Luz

En este caso se utilizó el modelo E de fotosíntesis (Cárdenas and Martín, 2017)(Cardenas *et al.*, 2014)

$$\frac{P(z)}{P_s} = 1 - \frac{e^{-\frac{E_{PAR}z}{E_s}}}{E_{UV}(z) + 1}, \quad (1.17)$$

donde $P(z)$ y P_s son la tasa de fotosíntesis a la profundidad z y la tasa máxima posible, respectivamente, $E_{PAR}(z)$ es la irradiancia de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), por sus siglas en inglés a la profundidad z , $E_{UV}(z)$ es la irradiancia de la radiación ultravioleta a la profundidad z , convolucionada con un espectro de acción biológica $\varepsilon(\lambda)$, el cual pondera las longitudes de onda ultravioletas de acuerdo a su potencial para inhibir la fotosíntesis (Cardenas *et al.*, 2014).

$$E_{PAR} = \sum_{\lambda} E(\lambda, z) \Delta \lambda, \quad (1.18)$$

$$E_{UV}z = \sum_{\lambda} E(\lambda) E(\lambda, z) \Delta \lambda \quad (1.19)$$

donde las irradiancias espectrales $E(\lambda, z)$ son calculadas mediante la ley de Lambert-Beer.

1.4.3 La Función de la Temperatura

Se ha utilizado

$$f(T) = 1 - \left(\frac{T_{Opt} - T}{T_{Opt} - 273} \right)^2. \quad (1.20)$$

Esta ecuación es simétrica respecto a T_{Opt} , que es la temperatura óptima para la vida para la mayoría de los productores primarios acuáticos (alrededor de 298 K)(Volk, 1987).

1.4.4 Habitabilidad Primaria Acuática: el Rol de los Nutrientes

No solo se debe tener en cuenta la luz sino que se debe considerar también el papel que juegan los nutrientes, pues la mayoría de las especies conocidas necesitan alrededor 20 elementos químicos para sobrevivir. Para el diseño del índice de habitabilidad no es

necesario considerarlos todos, sino solamente el limitante (Cárdenas and Martín, 2017), (Schulze-Makuch and Irwin, 2008) en los ecosistemas acuáticos suelen ser el nitrógeno, el fósforo o el hierro.

Teniendo en cuenta lo mencionado se define el Índice de Habitabilidad primaria Acuática (*AHI*) como

$$AHI = f(N)f(L)f(T), \quad (1.21)$$

en donde $f(N)$ es la función de los nutrientes, la función de los nutrientes fue obtenida a partir de la cinética de Michaelis-Menten (Schulze-Makuch and Irwin, 2008) normalizada respecto al máximo valor posible

$$f(N) = \left\langle \frac{V_{\max}[NL]}{K_M + [NL]} \right\rangle / f_{\max}[NL], \quad (1.22)$$

donde V_{\max} es la velocidad máxima de asimilación del nutriente limitante, K_M es la constante de semisaturación conocida como constante de Michaelis – Menten y $[NL]$ es la concentración de nutriente limitante.

1.5 Modelos Matemáticos

Un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables de las operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.(Cordova, 2010)

Los modelos matemáticos pueden clasificarse:

Según la información de entrada:

- Modelos heurísticos: están basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado.
- Modelos empíricos: utilizan las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado.

Según el tipo de representación:

- Modelos cualitativos o conceptuales: se contentan con predecir si el estado del sistema irá en determinada dirección o si aumentará o disminuirá alguna magnitud, sin importar exactamente la magnitud concreta de la mayoría de aspectos.
- Modelos cuantitativos o numéricos: usan números para representar aspectos del sistema modelado, y generalmente incluyen fórmulas y algoritmos matemáticos más o menos complejos que relacionan los valores numéricos.

Según la aleatoriedad:

- Determinista: se conoce de manera puntual la forma del resultado ya que no hay incertidumbre. Además, los datos utilizados para alimentar el modelo son completamente conocidos y determinados.
- Estocástico. Probabilístico: que no se conoce el resultado esperado, sino su probabilidad y existe por tanto incertidumbre.

Clasificación según su aplicación u objetivo:

- Modelo de simulación o descriptivo de situaciones medibles de manera precisa o aleatoria.
- Modelo de optimización.
- Modelo de control.

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Teoría Cuantitativa de la Habitabilidad

En este capítulo se describe el procedimiento realizado para determinar el Índice de Habitabilidad Quimiosintético en los respiraderos hidrotermales. La Teoría Cuantitativa de la Habitabilidad explica la distribución, abundancia y productividad de la vida. Está integrada por elementos de Modelos de Idoneidad de Hábitat, Teoría Metabólica de la Ecología (TME), Dinámica de Poblaciones, Macroecología, Biogeografía y Ecofisiología, y puede ser aplicada a cualquier forma de vida. Los siguientes postulados (Aguila and Aguila, 2014) son la base de esta teoría:

Postulado I: *La habitabilidad de un ambiente para una especie está definida como la tasa metabólica normalizada de las especies como función de estado ambiental.* Este postulado es la definición de la habitabilidad cuantitativa. Es similar al Índice de Idoneidad de Hábitat (IIH) en la ecología, pero con algunas diferencias importantes. Es un número directamente relacionado con la tasa metabólica, entre -1 y +1, que da peso al efecto de las variables ambientales físicas, químicas o biológicas. Los valores positivos están interpretados como ambientes habitables (potencial para la actividad y crecimiento), mientras que valores negativos se entienden como ambientes inhabitables (potencial para descomposición y muerte). La habitabilidad cero se interpreta como un ambiente marginal para la vida (supervivencia sin actividad o sin crecimiento).

Postulado II: *Las complejas funciones de habitabilidad de diversas variables ambientales pueden ser construidas como el producto de otras más simples.* Este producto establece un método para construir funciones de habitabilidad complejas a partir de otras simples. Esto no siempre puede ser el caso para todas las variables, pero sirve como un punto de partida para otros desarrollos complejos. Se han usado construcciones combinadas similares para estudiar los efectos simultáneos de temperatura, pH y actividad del agua con crecimiento microbiano, productividad primaria de plantas y fitoplancton.

Postulado III: *Las tasas de crecimiento máximo tienen lugar durante una actividad metabólica máxima.* Por consiguiente, mediciones de tasas de crecimiento pueden ser usadas para estimar la habitabilidad. Pero en la práctica, pueden ser difíciles las mediciones directas o indirectas de las tasas metabólicas. Los cambios en las biomasa o productividad relacionados con el crecimiento, pueden ser usados para calcular la habitabilidad.

Postulado IV: *La ocupación de un ambiente dado por una especie, está definida como la biodensidad normalizada de las especies.* Este postulado es la definición de ocupación cuantitativa. Es un valor entre cero y uno, que puede ser interpretado como la fracción de población o biomasa, comparada con el máximo potencial (capacidad de carga).

Postulado V: *La ocupación puede ser estimada de la habitabilidad de un ambiente a partir de una ecuación de crecimiento y una ocupación inicial.* Este postulado establece una relación entre la habitabilidad y la *ocupación*. Puede ser usada para modelar los efectos de los ambientes en la distribución, abundancia y productividad de una o múltiples especies incluyendo interacciones entre poblaciones.

2.2 Diseño de la Función Química $f(Q)$

Se consideró para modelar el potencial quimiosintético en los respiraderos hidrotermales, que la geometría del chorro de agua caliente que emana es laminar (Cárdenas and Martín, 2017), la reacción química que más contribuye a la quimiosíntesis es:



Esta reacción libera una energía libre $\Delta G = 794 \text{ kJ/mol}$, siendo una gran reserva de energía para los organismos quimiosintéticos. En esta reacción la sustancia limitante será el oxígeno (Pentyliuk and Student, 2014), especialmente en las cercanías del chorro caliente. Existen indicios de que desde el punto de vista macroscópico la dinámica de la quimiosíntesis se asemeja a la de la fotosíntesis, por lo que por analogía con el modelo E de fotosíntesis se planteó el siguiente modelo macroscópico para la quimiosíntesis:

$$\frac{Q}{Q_s} = 1 - e^{-\frac{I}{q}} \quad (2.2)$$

donde Q es la tasa de quimiosíntesis, Q_s es su tasa máxima posible, I es la intensidad de energía libre liberada por la reacción redox representada por la ecuación (2.2) en determinado plano paralelo a la lámina emisora de oxígeno, q es una medida de la eficiencia con que el organismo utiliza esta intensidad de la energía liberada.

En una primera aproximación se considerará que el movimiento del oxígeno es solo por difusión (Johnson et al., 1981) y el flujo entonces se puede calcular mediante la ley de Fick

$$\varphi = -D \frac{\partial [O_2]}{\partial x} \quad (2.3)$$

donde $[O_2]$ es la concentración de dioxígeno, x es la distancia perpendicular a la lámina emisora de este, el flujo φ es la cantidad de dioxígeno (moles) que llega a determinado plano paralelo a la lámina emisora, por unidad de área (m^2) y de tiempo (s). Al multiplicarlo por la energía libre liberada por cada mol de oxígeno consumido en la reacción (2.1) se obtiene la intensidad I y se puede utilizar el modelo dado por la ecuación (2.2) para estimar el potencial para la quimiosíntesis.

2.3 Función de la Temperatura

En este caso se utilizó la misma ecuación que en el caso de la fotosíntesis (ecuación 1.20) asumiendo una temperatura óptima para la vida de los productores primarios en los respiraderos hidrotermales de 298 K (Volk, 1987) y se varió la temperatura en un rango de 273 K – 323 K.

A pesar de que la mayoría de los microorganismos que viven alrededor de estas fuentes hidrotermales son extremófilos, es decir, que pueden vivir a temperaturas superiores a 110 °C (Johnson et al., 1981) y de que en los respiraderos hidrotermales se alcanzan temperaturas de hasta 400 °C en las cercanías del fluido hidrotermal, se eligió este rango

de temperatura debido a que la mayor población de bacterias quimiosintéticas no viven en el mismo centro del fluido caliente, sino que dichas bacterias se encuentran a cierta distancia de este. La temperatura va disminuyendo al alejarse del chorro de agua caliente porque esta se mezcla con el agua de mar que está a su alrededor, la cual tiene una temperatura alrededor de los 5 °C.

2.4 Función de los Nutrientes

Como se mencionó en el capítulo anterior, se debe considerar el papel que juegan los nutrientes, pues la mayoría de las especies conocidas necesitan alrededor de 20 elementos químicos para sobrevivir. Para el diseño de este Índice de Habitabilidad no es necesario considerarlos todos, sino solamente el limitante (Schulze-Makuch and Irwin, 2008; Cárdenas and Martín, 2017).

2.5 Métodos de validación

En las investigaciones que se refieren a entornos de muy difícil acceso, ya sea ecosistemas en nuestro propio planeta o fuera de él, donde acceder a estos para la toma de muestras es muy trabajoso y costoso, se utiliza un método de estudio y trabajo diferente a lo conocido en Química. Ello consiste en encontrar hábitats semejantes a los que se aplica el estudio y donde estén reportados datos de interés para el investigador.

En el trabajo que nos concierne es necesario la utilización de este método, ya que, el modelo matemático que se creó para calcular Índices de Habitabilidad Quimiosintética se hizo sobre la Fumarola TY del Pacífico Este y de este punto fue imposible encontrar nuevos datos que permitieran realizar los análisis correspondientes.

El punto seleccionado para nuestro análisis fue la Unión Triple de Rodríguez, el cual se encuentra en el Océano Índico y es la unión de tres placas tectónicas (Georgen and Lin, 2002). Este ecosistema es muy semejante al empleado anteriormente ya que la temperatura de las fuentes oscila entre 298K-373K, la concentración del Nitrógeno (nutriente limitante) oscila entre 10 μ mol-100 μ mol, y existe una estrecha igualdad entre los

organismos que la habitan (Van Dover et al., 2001).

2.5.1 Métodos paramétricos de análisis

Existen diversas pruebas paramétricas, pero las más utilizadas son:

- Coeficiente de correlación de Pearson y regresión lineal.
- Prueba *t*.
- Análisis de varianza unidireccional (AVOVA ONE WAY).
- Análisis de covarianza (ANCOVA).

Coeficiente de correlación: Se utiliza para analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por intervalos de razón. Este coeficiente denominado *r* puede ir de uno a menos uno, donde el signo indica la dirección de la correlación y el valor numérico la magnitud de la correlación (Hernández, Fernández and Baptista, 2014).(Tobergte and Curtis, 2013)

Regresión: Modelo estadístico para estimar el efecto de una variable sobre otra, entre mayor sea la correlación entre las variables, mayor capacidad de predicción (Hernández, Fernández and Baptista, 2014).

Prueba *t*: Se utiliza para evaluar si dos grupo difieren entre sí de manera significativa respecto a sus medias en una variable (Hernández, Fernández and Baptista, 2014).

Análisis de varianza unidireccional (ANOVA): Se utiliza para analizar si más de dos grupos difieren significativamente en cuanto a sus medias y varianza (Hernández, Fernández and Baptista, 2014).

2.6 Unión Triple de Rodríguez

La Unión Triple de Rodríguez (RTY) de la India Central es una triple unión geológica en el sur del Océano Índico donde se juntan tres placas tectónicas: la Placa Africana, la Placa Indo-Australiana, y la Placa de la Antártica. El cruce triple lleva el nombre de la isla de Rodríguez que se encuentra a 1000 km al noroeste de la misma (Herzig- and Plugger, 1988),(Gamo *et al.*, 2001).

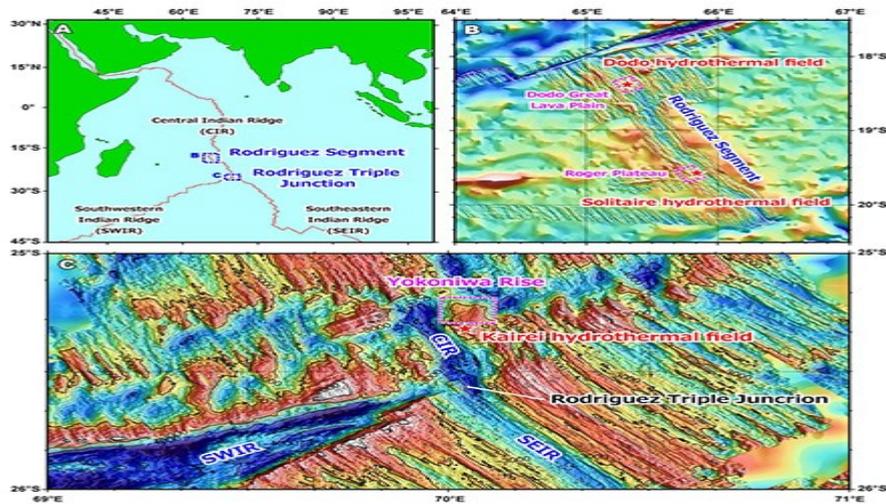


Figura 2.1: Unión Triple de Rodríguez

La cordillera central de esta Unión Triple fue estudiada con el propósito de localizar sitios de actividad hidrotermal por los años 80 del pasado siglo. En respuesta al reconocimiento fueron detectados datos de flujo de calor, sedimentos, crestas segmentales y productividad primaria (Gamo et al., 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para validar este modelo lo primero que se hizo fue buscar un ecosistema semejante a la fumarola TY del Pacífico Este en profundidad, temperatura, y concentración de nutrientes, ya que de este ecosistema no existen muchos datos experimentales que permitan realizar las técnicas propuestas para la validación del modelo. También era importante contar con datos experimentales de productividad primaria, para darle valores reales al parámetro (q) (eficiencia quimiosintética) ya que, estos solo se han tomado análogos a la fotosíntesis y era una de las principales deficiencias del modelo.

El ecosistema escogido fue el Unión Triple de Rodríguez, se puede decir que es reciente su descubrimiento y desde la fecha se encuentra bajo constante estudio. Aquí se unen tres placas tectónicas y este se localiza en el océano Índico (25°35'S,70°00'E) (Das *et al.*, 2017). Posee respiraderos hidrotermales en varias regiones de la falla, específicamente los datos recopilados se refieren a la fumarola que se encuentra en la misma unión triple. Se utilizó el software IBM-SPSS para el análisis estadístico y el *Mathematica* para los análisis de sensibilidad y el cálculo de los valores experimentales que fueron necesarios.

3.1 Determinación experimental del Índice de Habitabilidad y la eficiencia quimiosintética

Se encontraron datos de productividad primaria expresados como cantidad de células en gramos de sedimento seco (cell/g^{-1}), de estos se tomaron 50 valores aleatorios para el cálculo, y se tomó el mayor valor encontrado como la productividad neta máxima (los datos se muestran en la tabla 1 de los Anexos). Con ellos se procedió a calcular el Índice de Habitabilidad mediante la ecuación

$$\text{PPN} = \text{IH} \cdot \text{PPN}_{\text{max}} \quad (3.1)$$

Se obtuvieron 50 valores de IH los cuales se reportan en la tabla 1 de los Anexos, los valores son adimensionales y oscilan entre cero y uno, indicando que ese ecosistema

tiene puntos de mucho potencial para albergar vida quimiosintética y regiones donde es más difícil el desarrollo de este tipo de vida. Con dichos resultados se calcularon 50 valores de eficiencia quimiosintética (q) (W/m^2), para conocer realmente entre que rango de valores oscila este parámetro y obtener un modelo más cercano a la realidad. Para ello se hizo uso de la siguiente ecuación

$$q = \frac{-\varphi \Delta G}{\ln\left(1 - \frac{IHQ}{f(N)f(T)}\right)} \quad (3.2)$$

Los valores se encuentran en la tabla 1 de los Anexos y se observa que estos oscilan entre 0 y 0,10 W/m^2 , lo cual indica que las analogías realizadas en un primer momento de creación del modelo fueron correctas, debido a que no contamos con datos de referencia para comparar resultados, solo se puede decir que los valores obtenidos no se salen de los límites establecidos para el parámetro, es decir, que este se encuentra entre 0 y 100 W/m^2 , indicando así que las aproximaciones realizadas fueron correctas.

3.2 Análisis de sensibilidad

Cualquier modelo de una situación es una simplificación de la situación real. Por lo tanto, existe cierta incertidumbre en la determinación de los valores de todos los parámetros involucrados. Debido a ello, es importante estudiar la variabilidad de la solución del problema planteado de acuerdo a eventuales modificaciones de los valores de los parámetros, o bien, debido a la incorporación de nuevos elementos a la situación.

Para realizar el análisis de sensibilidad, se evalúa cómo varía la función química con respecto a la variación de la eficiencia quimiosintética (q), es decir, que tan sensible es la función química que se diseñó con respecto a los cambios de q .

Con estos fines se procedió calculando según se muestra:

$$\frac{\partial f(Q)}{\partial q} \Delta q \quad (3.3)$$

Se calcula la derivada parcial de la función química $f(Q)$ con respecto al parámetro q y se multiplica por la variación de q ,

$$\frac{\partial(1 - \exp(-\varphi\Delta G/q))}{\partial q} \Delta q \quad (3.4)$$

Donde q oscila entre valores de 0- 0,10 W/m².

Para obtener la gráfica de sensibilidad de la función química se procedió a calcular la derivada de la función entre la función misma y se multiplica por 100, con el objetivo de reportar los valores en por ciento (%), estos valores se ubican en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisas se ubicó la variación de q desde 0 – 0,10 W/m². Se muestra la ecuación

$$\frac{f'(Q)}{f(Q)} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

La gráfica con los resultados se muestra:

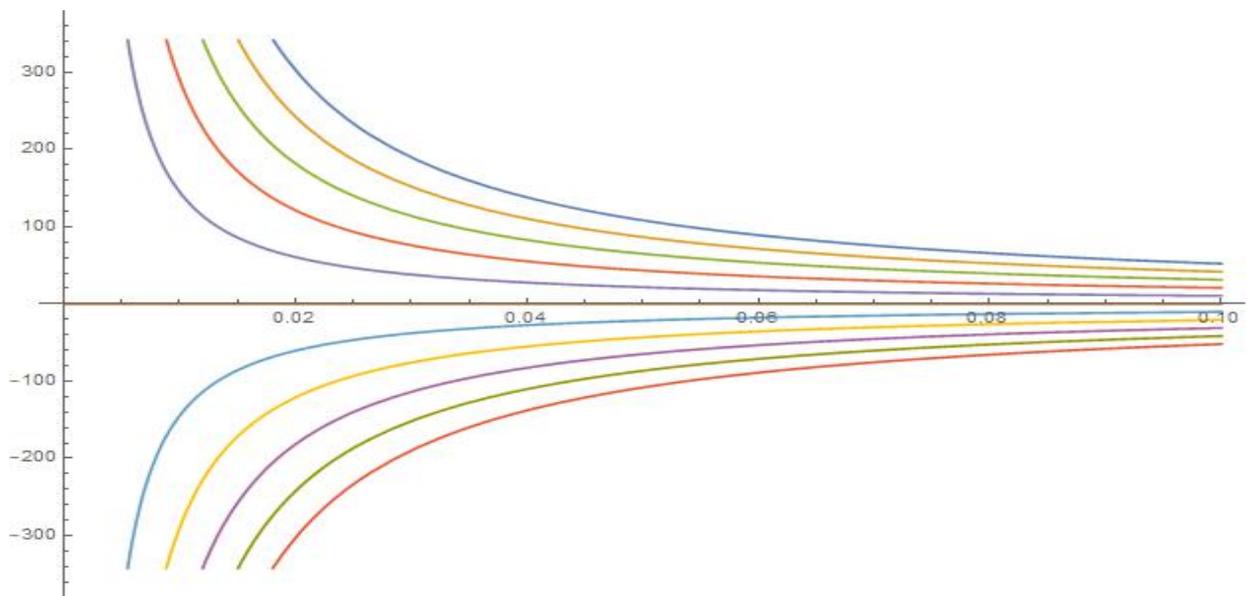


Figura 3.1: Análisis de sensibilidad

De esta gráfica se pueden realizar varias observaciones:

1. A medida que los valores de q se van haciendo más pequeños la función se hace más sensible a la variación de este parámetro .
2. Por encima de 0,04 W/m² la sensibilidad de la función a la variación de este parámetro se vuelve prácticamente constante, es decir la función química depende

en menor medida de los valores de la eficiencia quimiosintética para reflejar con buenos resultados el comportamiento de los organismos que realizan la quimiosíntesis.

3. Los cálculos realizados con valores de q de 5, 10, 20, 25 W/m² respectivamente, en el trabajo anterior no tuvieron mucho peso a la hora de obtener un resultado que refleje en gran medida la realidad, debido a la poca sensibilidad que muestra la función química a los cambios en los valores de la eficiencia quimiosintética por encima de 0,04 W/m².

3.3 Validación del modelo

Para la validación del modelo se realizaron análisis de determinación del coeficiente de correlación, regresión y ANOVA.

Se escogieron estos procedimientos en particular porque con los datos que se cuentan son los más asequibles, además es de vital importancia realizar pruebas que demuestren que el modelo tiene una elevada capacidad de predicción lo que se logra con la determinación del coeficiente de correlación y la regresión.

El análisis ANOVA se utiliza para observar cómo se comportan los residuos en las datas obtenidas.

3.3.1 Determinación del coeficiente de correlación y análisis de regresión

Para la determinación del coeficiente de correlación y análisis de regresión se plotearon las datas obtenidas de IHQ y q . El ajuste realizado es logarítmico debido al tipo de relación que existe entre la función química y el IH , en un primer momento se había realizado un ajuste lineal, pero este no reflejaba realmente el comportamiento de los datos que se observó claramente es logarítmico. La gráfica se muestra a continuación:

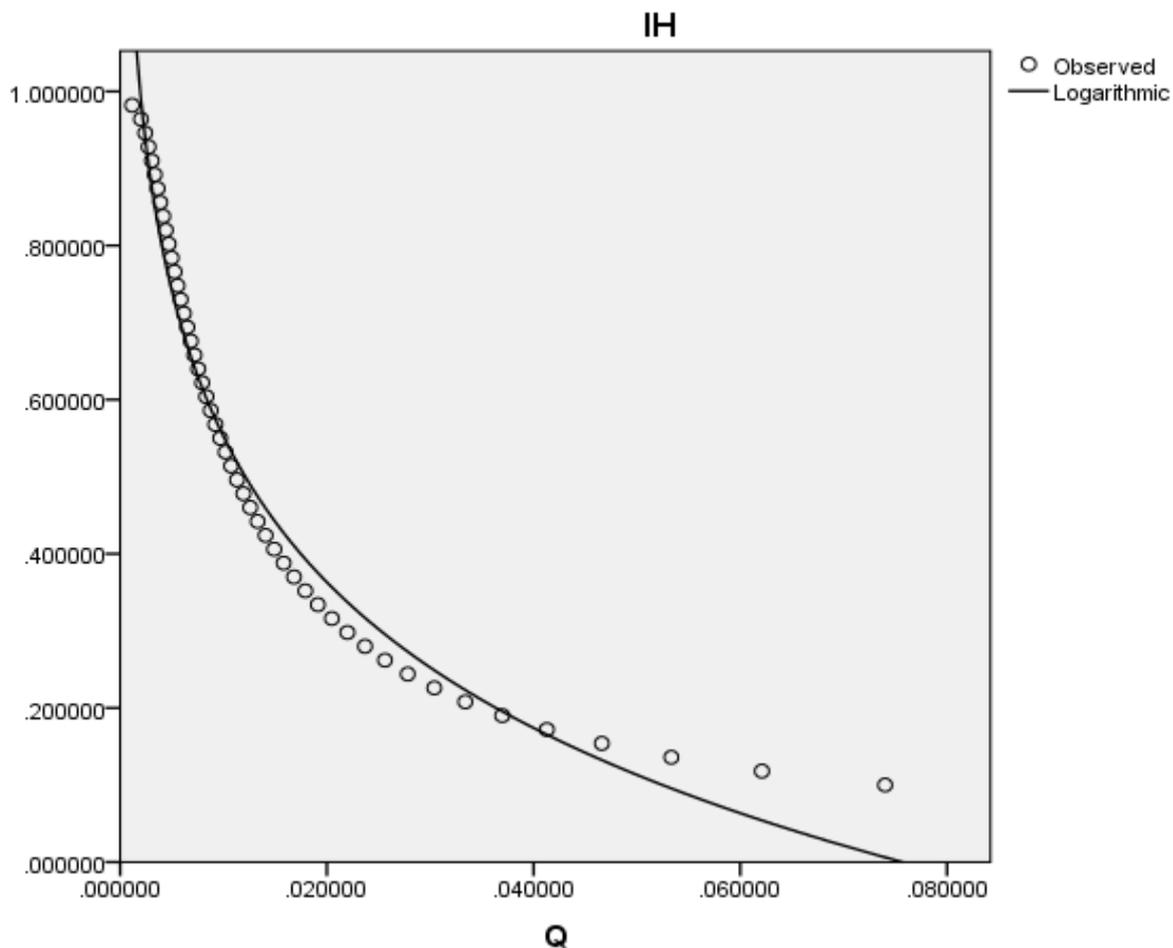


Figura 3.1: Gráfica de regresión

Donde:

$$r^2 = 0,976$$

$$F = 1914,185$$

$$\text{Sig.} = 0,00$$

Se observa que el r^2 es bastante elevado lo que indica que los datos tienen una gran correlación por lo que el modelo tiene un poder de predicción acertado, y el modelo va a calcular valores de IHQ con un 95% de confianza de obtener resultados cercanos a la realidad.

3.3.2 Análisis de ANOVA

Este procedimiento se utilizó para analizar principalmente los residuos y observar cuál es el comportamiento de estos. Debido a que un comportamiento no simétrico indica que el modelo tiene un buen ajuste confirmando así el resultado de la regresión.

Con este fin se formuló la hipótesis de investigación y la hipótesis nula y se escogió un $\alpha = 0,05$. Donde

H_i = la diferencia de las medias no es significativa

H_o = la diferencia de las medias es significativa

Es necesario realizar el análisis de las medias debido a que los datos están relacionados entre sí, y es importante conocer que en el momento de calcular y predecir resultados la relación entre ellos es no es significativa.

Los resultados se muestran:

residuos =0,04

diferencias de medias = 0,09

F= 122,88

De estos valores se puede realizar las siguientes observaciones:

1. El valor tan pequeño del residuo indica que existe buena correlación entre los datos y que el modelo tiene buen carácter predictivo, que en el caso que nos ocupa es vital que el modelo prediga con un nivel de confianza elevado.
2. La diferencia de las medias es mayor que α por lo que se acepta la hipótesis de investigación y se rechaza H_o , indicando que la diferencia de las medias no es estadísticamente significativa.

3.4 Comparación de resultados

Para un análisis más completo de la situación se calcularon los valores de IHQ aplicando los resultados obtenidos en la Unión Triple de Rodríguez a la Fumarola TY del Pacífico Este. Se tomaron los valores de temperatura y concentración de nutrientes tal como se había seleccionado en primer momento para el cálculo, donde $f(N) = 0,983$ y $f(T) = 1$. En un primer instante se calcularon los valores de IHQ para la Fumarola TY

con los datos de eficiencia quimiosintética obtenidos en la Unión Triple de Rodríguez, y estos se compararon estadísticamente con los obtenidos en la Fumarola TY, pero con los datos de Q que se habían tomado análogos a la fotosíntesis, con el fin de comparar qué tan diferentes son los resultados, y qué tan bien predice el modelo resultados cercanos a la realidad.

Los datos obtenidos de IHQ se muestran a continuación.

$IHQ1$ (F-TY)	$IHQ2$ (F-TY)
0,00156 (50 W/m ²)	0,33557
0,00098 (45 W/m ²)	0,29940
0,00060 (40 W/m ²)	0,17065
0,00049 (35 W/m ²)	0,13699
0,00041 (30 W/m ²)	0,18182
0,00037 (25 W/m ²)	0,12469
0,00031 (20 W/m ²)	0,10776
0,00028 (15 W/m ²)	0,10183
0,00025 (10 W/m ²)	0,13369
0,00023 (5 W/m ²)	0,15625

Tabla 1: IHQ de la Fumarola TY

Donde $IHQ1$ son los datos calculados sin las correcciones de la eficiencia quimiosintética y $IHQ2$ son los datos que se obtienen al aplicar los valores de Q al entorno de la Fumarola TY.

Con estos valores se realizó la prueba estadística de comparación de medias para así determinar si existe o no, diferencias significativas en las medias estadísticas. Los resultados se muestran:

Residuos	0,008
Dif. De medias	0,174317
t	6,946
r^2	0,929

Tabla 2: Datos de ANOVA

De los resultados anteriores se pueden realizar las siguientes observaciones:

1. Lo más importante a señalar en este análisis es que, a pesar de las diferencias entre las datas las medias no difieren estadísticamente y esto puede ser debido a que los modelos matemáticos se les impone las condiciones y los parámetros y este factor puede enmascarar un resultado más cercano a la realidad. Por lo que sería más conveniente en otros trabajos profundizar en estas determinaciones. A pesar de esto vamos a tomar el resultado obtenido en consideración.
2. El valor de los residuos tan pequeño indica que el comportamiento de los datos no es simétrico a un valor determinado.
3. La diferencia de las medias indica que no hay diferencias significativas en los dos grupos de datos, aspecto importante este ya que demuestra que el modelo puede aplicarse con un nivel de confianza del 95% y se obtendrán valores lo más semejante a la realidad, también este resultado indica una vez más que la función química es muy poco sensible a los valores de la eficiencia quimiosintética que estén por encima de $0,04 \text{ W/m}^2$.
4. Como t es mayor que α la varianza de los datos no difiere y se puede afirmar que no hay diferencias significativas entre los conjuntos de valores.
5. El modelo es válido para los datos que se obtuvieron de la Fumarola TY y para otros entornos donde el mecanismo de producción primaria sea la quimiosíntesis.

3.5 Recomendación de pautas a seguir para aplicar el modelo

Para aplicar el modelo matemático que calcula un Índice de Habitabilidad Quimiosintético es necesario :

1. Realizar un estudio detallado de las condiciones naturales del entorno en cuestión.
2. Definir cuáles son las reacciones químicas de mayor importancia en el medio y, cuál de ellas es la que contribuye en mayor medida en la quimiosíntesis.
3. Calcular la variación de energía libre que libera la reacción previamente escogida.

4. Realizar un estudio detallado de la temperatura del medio y buscar en qué rango pueden vivir los organismos que habiten el ecosistema en estudio.
5. Encontrar de acuerdo a los organismos que estén presentes, cuál de los nutrientes esenciales es el limitante.
6. Definir la geometría del flujo de sustancias que emana de los respiraderos.
7. Aplicar el modelo, donde debe esperarse que el resultado se encuentre entre cero y uno.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- Se calcularon los valores experimentales del parámetro q , el cuál solo se había trabajado otorgándole valores en semejanza a los proceso fotosintéticos. Los valores obtenidos muestran que las acotaciones realizadas en un primer momento de creación del modelo fueron correctas.
- Se realizó la validación del modelo aplicándolo a otro ecosistema donde sí se contaban con datas experimentales que permitieron la realización del trabajo, donde se obtuvieron resultados positivos, mostrando que dicho modelo puede aplicarse a entornos donde el mecanismo de producción primaria es la quimiosíntesis con un nivel de confianza del 95% y se obtendrán resultados muy cercanos a la realidad.
- Se compararon los resultados obtenidos en trabajos anteriores con los obtenidos ahora y se demostró que no existen diferencias significativas entre los valores lo que confirma la validez del modelo.
- Se proponen los pasos a seguir para un correcto estudio de los entornos donde predomine la quimiosíntesis sobre la fotosíntesis como mecanismo de producción primaria.

RECOMENDACIONES

- Combinar el enfoque microscópico (basado en la Cinética Química) con el macroscópico para avanzar en la validación de los modelos de Habitabilidad Quimiosintética.
- Continuar en la búsqueda de entornos análogos de vida quimiosintética que aporten nuevos datos de interés para la culminación del estudio.
- Buscar otras pruebas estadísticas que permitan un mejor entendimiento de la situación que se plantea.

***REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS***

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguila, M. L. and Aguila, M. L. (2014) 'Aplicaciones de la Teoría Cuantitativa de la Habitabilidad a Entornos Acuáticos Aplicaciones de la Teoría Cuantitativa de la Habitabilidad a Entornos Acuáticos'.

Amemiya, T. *et al.* (2007) 'Stability and dynamical behavior in a lake-model and implications for regime shifts in real lakes', 6, pp. 54–61. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.03.019.

Bethke, C. M. (2008) *Geochemical and Biogeochemical Reaction Modeling*. Second Edi. Cambridge University Press.

Cardenas, R. *et al.* (2014) 'On the Habitability of Aquaplanets', *Challenges*, 5, pp. 284–293. doi: 10.3390/challe5020284.

Cárdenas, R. P. and Martín, O. (2017) 'Cuantificación de la habitabilidad de los entornos naturales', 7(1), pp. 1–4.

Cordova, U. de (2010) 'Análisis de datos mediante procedimientos informáticos', pp. 1–21. Available at: <http://www.uco.es/dptos/educacion/invadiv/images/stories/documentos/METODOS/RECURSOS/SPSS.pdf>.

Das, A. *et al.* (2017) 'Astrobiological implications of dim light phototrophy in deep-sea red clays', *Life Sciences in Space Research*. Elsevier Ltd, 12, pp. 39–50. doi: 10.1016/j.lssr.2017.01.002.

Van Dover, C. L. *et al.* (2001) 'Biogeography and ecological setting of Indian Ocean hydrothermal vents', *Science*, 294(5543), pp. 818–823. doi: 10.1126/science.1064574.

Gamo, T. *et al.* (2001) 'Chemical characteristics of newly discovered black smoker fluids and associated hydrothermal plumes at the Rodriguez Triple Junction, Central Indian

Ridge', *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3–4), pp. 371–379. doi: 10.1016/S0012-821X(01)00511-8.

Georgen, J. E. and Lin, J. (2002) 'Three-dimensional passive flow and temperature structure beneath oceanic ridge-ridge-ridge triple junctions', *Earth and Planetary Science Letters*, 204(1–2), pp. 115–132. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00953-6.

Halbach, P., Blum, N. and Münch, U. (1998) 'Formation and decay of a modern massive sulfide deposit in the Indian Ocean', *Mineralium ...*, pp. 302–309. doi: 10.1007/s001260050149.

Hernández, R., Fernández, C. and Baptista, P. (2014) *Metodología de la investigación, Journal of Chemical Information and Modeling*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Herzig-, P. M. and Pluger, W. L. (1988) 'FOR HYDROTHERMAL TRIPI . E JUNCTION , INDIAN OCEAN', pp. 721–736.

Johnson, K. S. *et al.* (1981) 'In Situ Measurements of Chemical Distributions in a Deep-Sea Hydrothermal Vent Field'.

Kartal, B. *et al.* (2013) 'How to make a living from anaerobic ammonium oxidation', *FEMS Microbiology Reviews*, 37(3), pp. 428–461. doi: 10.1111/1574-6976.12014.

Li, M. *et al.* (2010) 'Spatial distribution and abundances of ammonia-oxidizing archaea (AOA) and ammonia-oxidizing bacteria (AOB) in mangrove sediments', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89(4), pp. 1243–1254. doi: 10.1007/s00253-010-2929-0.

Nodarse, R. (2017) *Diseño de un índice de Habitabilidad Quimiosintética*. Available at: <http://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnh60s164e.pdf>.

Pentyliuk, N. and Student, U. (2014) 'Variations in oxygen level in relation to temperature in the hydrothermal vents of the Juan de Fuca Ridge', (1), pp. 51–58.

Pohlman, J. W. (2011) 'The biogeochemistry of anchialine caves: progress and

possibilities', pp. 33–51. doi: 10.1007/s10750-011-0624-5.

Reimann, J., Jetten, M. S. M. and Keltjens, J. T. (2015) *Sustaining Life on Planet Earth: Metalloenzymes Mastering Dioxygen and Other Chewy Gases*. doi: 10.1007/978-3-319-12415-5.

Schulze-Makuch, D. and Irwin, L. N. (2008) *Life in the Universe Advances in Astrobiology and Biogeophysics*. Second Edi.

Shelton, J. (2013) 'In the Graduate College'.

Tobergte, D. R. and Curtis, S. (2013) *Procesamiento de Datos y Análisis Estadístico usando SPSS, Journal of Chemical Information and Modeling*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Volk, T. (1987) 'Feedbacks between weathering and atmospheric CO₂ over the last 100 million yearsQ', *American Journal of Science*, pp. 763–779. doi: 10.2475/ajs.287.8.763.

Zierenberg, R. A., Adams, M. W. W. and Arp, A. J. (2000) 'From the Academy Life in extreme environments : Hydrothermal vents', 97(24), pp. 12961–12962.

ANEXOS

Producción primaria (cell/g ⁻¹)	Índice de Habitabilidad	Eficiencia (W/m ²)	Quimiosintética
1*10 ¹¹	0,1	0,0740092	
9,64*10 ¹⁰	0,101833	0,0726029	
9,82*10 ¹⁰	0,103734	0,0711966	
9,46*10 ¹⁰	0,105708	0,0697902	
9,28*10 ¹⁰	0,107759	0,0683838	
9,1*10 ¹⁰	0,10989	0,0669773	
8,92*10 ¹⁰	0,112108	0,0655707	
8,74*10 ¹⁰	0,114416	0,064164	
8,56*10 ¹⁰	0,116822	0,0627573	
8,38*10 ¹⁰	0,119332	0,0613505	
8,2*10 ¹⁰	0,121951	0,0599435	
8,02*10 ¹⁰	0,124688	0,0585365	
7,84*10 ¹⁰	0,127551	0,0571294	
7,66*10 ¹⁰	0,130548	0,0557222	
7,48*10 ¹⁰	0,13369	0,0543149	
7,3*10 ¹⁰	0,136986	0,0529074	
7,12*10 ¹⁰	0,140449	0,0514998	
6,94*10 ¹⁰	0,144092	0,050092	
6,76*10 ¹⁰	0,147929	0,0486841	
6,58*10 ¹⁰	0,151976	0,047276	
6,4*10 ¹⁰	0,15625	0,0458676	
6,22*10 ¹⁰	0,160772	0,0444591	
6,04*10 ¹⁰	0,165563	0,0430504	
5,86*10 ¹⁰	0,170648	0,0416413	
5,68*10 ¹⁰	0,176056	0,040232	
5,5*10 ¹⁰	0,181818	0,0388224	
5,32*10 ¹⁰	0,18797	0,0374124	
5,14*10 ¹⁰	0,194553	0,036002	
4,96*10 ¹⁰	0,201613	0,0345912	
4,78*10 ¹⁰	0,209205	0,0331798	
4,6*10 ¹⁰	0,217391	0,0317679	
4,42*10 ¹⁰	0,226244	0,0303553	
4,24*10 ¹⁰	0,235849	0,028942	
4,06*10 ¹⁰	0,246305	0,0275278	

$3,88 \cdot 10^{10}$	0,257732	0,0261126
$3,7 \cdot 10^{10}$	0,27027	0,0246962
$3,52 \cdot 10^{10}$	0,284091	0,0232784
$3,34 \cdot 10^{10}$	0,299401	0,021859
$3,16 \cdot 10^{10}$	0,316456	0,0204374
$2,98 \cdot 10^{10}$	0,33557	0,0190134
$2,8 \cdot 10^{10}$	0,357143	0,0175863
$2,62 \cdot 10^{10}$	0,381679	0,0161553
$2,44 \cdot 10^{10}$	0,409836	0,014719
$2,26 \cdot 10^{10}$	0,442478	0,013276
$2,08 \cdot 10^{10}$	0,480769	0,0118234
$1,9 \cdot 10^{10}$	0,526316	0,0103572
$1,72 \cdot 10^{10}$	0,581395	0,00887011
$1,54 \cdot 10^{10}$	0,649351	0,00734832
$1,36 \cdot 10^{10}$	0,735294	0,00576044
$1,18 \cdot 10^{10}$	0,847458	0,00400742
$1 \cdot 10^{10}$	1	0,00400523

Tabla 1: Datas experimentales obtenidas de la Unión Triple de Rodríguez.