

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE ECONOMÍA

**MAESTRÍA EN ECONOMÍA DEL MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES**

ARTÍCULO PUBLICABLE

**Los Arrecifes De Coral Como Un Recurso Renovable Y No Renovable:
Modelo Bioeconómico De La Isla De San Andrés (Caribe Colombiano)**

Camilo Torres Sanabria

Asesor: Jorge Higinio Maldonado, Ph.D.

Agosto 2006
Bogotá, D.C.

Tabla de Contenido

Introducción	6
I. Revisión de literatura	8
1.1 Biodiversidad, biología y ecología del arrecife de coral	8
1.2 La isla de San Andrés y sus arrecifes de coral	11
1.3 Economía de los arrecifes de coral	13
II. Objetivo general	19
2.1 Objetivos específicos	19
III. Modelos bioeconómicos	20
3.1 Modelo teórico de recurso natural renovable	20
3.2 Modelo teórico de recurso natural no renovable	23
IV. Datos necesarios	24
4.1 Base de datos	25
4.1.1 Metodología de muestreo	26
4.1.2 Estadísticas descriptivas	28
4.1.3 Aspectos demográficos de la población coralina	30
4.2 Estimaciones	32
V. Modelo empírico	38
5.1 Modelos estimados y equilibrios óptimos	39
5.2 Análisis de pos-óptimalidad y simulación	42
VI. Conclusiones	45
VII. Recomendaciones	46
Referencias bibliográficas	47
Anexos	51
1. Descripción de estructura coralina en las estaciones muestreadas	51
2. Figuras descriptivas de la metodología en la compilación de datos biológicos	52
3. Análisis econométrico de las funciones biológicas de crecimiento	54

Siglas e iniciales utilizadas:

Aad – Área arrecífal deteriorada (km^2).

Ac – Área coralina (cm^2).

CaCO₃ – Carbonato de Calcio.

Cr – Ubicación con respecto a la contracorriente oceánica (1: Antes de corriente; 0: Lo contrario).

Ct – Costo Total de extracción de recursos coralinos en pesos.

Dp – Densidad poblacional, número de colonias coralinas en unidad de área (col/m^2).

Gr – Tasa de crecimiento ($\text{cm}^2/\text{año}$).

Id – Índice de desarrollo (1 – Bajo, 2 – Medio, 3 – Alto).

Ipc – Ingreso Per cápita (US\$).

k – Capacidad de carga poblacional.

Kg – Kilogramo.

Km – Kilómetro.

p – Precio del mercado por unidad de recurso extraído ($\$1,108 \approx 1,000\text{gramos}$).

P1 – Población que vive con menos de 1US\$ día (Porcentaje).

P2 – Población que vive bajo línea de pobreza nacional (Porcentaje).

Pf – Profundidad, ubicación batimétrica de la colonia coralina (pies).

Pgg – Precio de un galón de gasolina en pesos.

Pmp – Porcentaje de mortalidad parcial de la colonia coralina, tejido muerto.

Pr1 – Precio de un kilogramo de recursos arrecífales pesqueros que son extraídos como actividad principal pesquera, en pesos.

Pr2 – Precio de un kilogramo de *CaCO₃* extraído, en pesos.

Pt – Población total del país (millones).

Pva – Personas que viven directamente de los arrecifes.

Pwd – Porcentaje de blanqueamiento, área de tejido enfermo de la colonia.

r – Tasa intrínseca de crecimiento.

s – Cantidad de *Stock* de *CaCO₃*.

Sml – Salario mínimo legal diario en pesos.

TAS – Terraza arrecífal de sotavento.

US\$ - Dólar estadounidense.

Vi – Variedad intra-especifica poblacional (1: Variedad mostaza; 0: Lo contrario).

Índice de tablas:

Tabla 1. Países del Caribe beneficiados por el uso directo de los arrecifes de coral. Pp. 17

Tabla 2. Estadística descriptiva de las variables de carácter socioeconómico de la población humana que se beneficia de los bienes y servicios del arrecife de coral en el mundo. 32 observaciones. Pp 18

Tabla 3. Indicativos económicos asociados a la extracción de recursos arrecifales en la isla de San Andrés expresados en pesos colombianos constantes (Año base 2004, con el índice agregado simple de precios). Observación promedio anual de un periodo de seis años (1999-2004). Pp. 26

Tabla 4. Estadística descriptiva de las variables de carácter biológico y ecológico de la población coralina. 875 observaciones. Pp. 28

Tabla 5. Estadística descriptiva de las variables de carácter económico de la extracción de recursos arrecifales en la isla de San Andrés. Observación promedio anual de un periodo de seis años (1999-2004). Pesos constantes del año 2004. Pp. 29

Tabla 6. Resultados de la regresión lineal para obtener la función de crecimiento poblacional del recurso. Sea: Gr – Tasa de crecimiento ($\text{cm}^2/\text{año}$); Const: Constante; Ac – Área coralina (cm^2); Pmp – Porcentaje de mortalidad parcial; Pwd – Porcentaje de blanqueamiento; Dp – Densidad poblacional (col/m^2); Vi – Variedad intra-específica poblacional (1: Variedad mostaza; 0: Lo contrario); Cr – Ubicación con respecto a la contracorriente oceánica (1: Antes de corriente; 0: Lo contrario); Pf – Profundidad (pies); Fc – Prueba f calculada; R2 – Coeficiente de ajuste; p-Valor – Valor probabilístico. Pp. 32

Tabla 7. Resultados de la regresión lineal por el método de mínimos cuadrados ordinarios, para obtener la función de costo total de extracción de recursos arrecifales en la isla de San Andrés. Sea: LCt – Logaritmo del costo total; LPgg – Logaritmo del precio de un galón de gasolina; LSml – Logaritmo del salario mínimo legal diario; Const: Constante; Fc – Prueba f calculada; R2 – Coeficiente de ajuste; p-Valor – Valor probabilístico. Observaciones promedio anuales del periodo comprendido entre el año 1999 a 2004. Pp. 35

Tabla 8. Indicadores de la extracción de CaCO_3 en la isla de San Andrés. Pp. 36

Tabla 9. Estaciones de muestreo en la Terraza Arrecifal de Sotavento (TAS) ubicadas en el occidente de la isla de San Andrés. Pp. 51

Índice de figuras:

Figura 1. Isla de San Andrés y caracterización de la Terraza Arrecifal de Sotavento (TAS). Ubicación de las estaciones de muestreo en el costado occidental de la isla (Modificado de Diaz, 2000). Pp. 12

Figura 2: Diagrama de flujo de los valores económicos evidenciados en los arrecifes de coral de la isla de San Andrés (Modificada para el caso de San Andrés de Cesar y Chong, 2000). Pp. 15

Figura 3. Parcelas de muestreo de 10 metros de largo por 1 metro de ancho. Pp. 27

Figura 4. Perfil de la TAS que muestra la segmentación de las dos terrazas sumergidas: somera desde un metro hasta 6 metros de profundidad, y profunda desde los 6 metros hasta los 18 metros (Modificado de Díaz et al., 1996). Pp. 30

Figura 5. Función de crecimiento poblacional coralina de la isla de San Andrés. Pp. 33

Figura 6. Extracción proporcional del recurso coralino en miles de toneladas de CaCO_3 . Pp. 39

Figura 7. Función de valor óptimo en el enfoque de recurso natural renovable, generado a partir de la ecuación de valor de Bellman. Pp. 40

Figura 8. Función de valor óptimo en el enfoque de recurso natural no renovable, generado a partir de la ecuación de valor de Bellman. Pp. 41

Figura 9. Comportamiento del precio sombra ó valor marginal de una unidad adicional del recurso extraído a medida que aumenta el Stock disponible. Pp. 41

Figura 10. Simulación de la senda de extracción del recurso coralino si es realizada de manera proporcional. Pp. 42

Figura 11. Simulación de la función de transición óptima para la política hipotética de extracción proporcional. Pp. 43

Figura 12. Simulación de la senda de extracción del recurso coralino al largo plazo. Pp. 44

Figura 13. Simulación de la senda de Stock disponible del recurso coralino si es iguala cero la extracción en el largo plazo. Pp. 45

Figura 14. Parcela de muestreo de 10m x 1m. Nótese la cuerda que delimita la parcela (Foto: Autor. Terraza arrecifal de sotavento, San Andrés). Pp.52

Figura 15. Ubicación de la parcela de muestreo de 10m x 1m. Se puede observar la cuerda y la utilización del equipo Scuba (Foto: Autor. Terraza arrecifal de sotavento, San Andrés). Pp.52

Figura 16. Cuadrante de madera utilizado para el muestreo de 30 centímetros de largo por 30 centímetros de ancho, con divisiones cada 2 centímetros a lo largo y a lo ancho con un área total de 900 cm^2 . Herramienta de medida exacta para determinar el tamaño de las colonias (cm^2), la mortalidad parcial (cm^2) y las enfermedades blancas (cm^2). Pp.53

Figura 17. Cuadrante de madera utilizado para el muestreo de 30 centímetros de largo por 30 centímetros de ancho, con divisiones cada 2 centímetros a lo largo y a lo ancho con un área total de 900 cm^2 (Foto: Autor. Terraza arrecifal de sotavento, San Andrés). Pp.53

Figura 18. Relación entre la tasa de crecimiento y la profundidad de asentamiento de las colonias coralinas en la zona muestreada de la isla de San Andrés. Pp.54

Introducción

Los arrecifes de coral son un sistema natural único, el más rico en biodiversidad de todo los ecosistemas de la biosfera, el cual mantiene altas productividades en aguas poco profundas (Connell, 1978, Cesar 2002), basándose en la secreción esquelética de *Carbonato de Calcio* ($CaCO_3$) propia de los corales hermatípicos (Corales escleractineos formadores de arrecife), que a través de todas las sucesiones ecológicas permiten la consolidación y construcción de estas estructuras tridimensionales que modelan las costas y playas.

Los arrecifes de coral son las más grandes construcciones realizadas por organismos vivos, mediante un específico producto de la relación simbiótica entre plantas y animales. A su vez, los arrecifes de coral constituyen un ecosistema de alta fragilidad ambiental, expuesto a constante presión por la extracción y uso de los recursos que allí se albergan y producen, por parte de los agentes económicos costeros quienes basan sus actividades socioeconómicas de manera significativa en torno a este sistema natural.

El arrecife soporta la estructura social y económica de muchas islas del mundo, ya que provee bienes y servicios únicos para el andamiaje de los recursos básicos humanos, incluyendo el sustento al atractivo turístico de las islas, especialmente en el Caribe; como es el caso de la isla de San Andrés, cuyo origen geológico es oceánico-coralino, y se ubica en la plataforma centroamericana perteneciente al Caribe Colombiano, con una alta densidad poblacional humana, la cual permite evidenciar la fuerte tensión ambiental ejercida hacia los ecosistemas marinos. Actividades económicas como el turismo, los deportes acuáticos, el vertimiento indiscriminado de desechos y la extracción poco planificada de los recursos, generan un importante impacto sobre los arrecifes de coral.

Por todo lo anterior, es necesario plantear mecanismos para el uso y extracción de los recursos arrecifales que garanticen un desarrollo sostenible económico, evitando el colapso ambiental. Una alternativa es la alianza metodológica entre las variables socioeconómicas y variables biológicas, que permitan a través de investigaciones teóricas

y empíricas enfocadas en la estructura coralina (la cual alberga toda la complejidad biótica y abiótica de este y otros ecosistemas marinos vecinos), modelar las interacciones más importantes a nivel ecosistémico y combinarlas con las decisiones de uso del recurso.

El presente trabajo se estructura en cinco grandes partes temáticas, las cuales integran la formulación de modelos teóricos con información que hace posible la validación empírica, para analizar el uso del recurso coralino arrecifal, que para el presente caso es enfocado en el caso de estudio de la isla de San Andrés.

En la primera sección se revisa la importancia de los bienes y servicios ambientales prestados por el arrecife de coral, enfocado en el caso específico de la isla de San Andrés, tomando en cuenta las características sociales, económicas y ambientales de la misma, consecuente con los siguientes puntos: (1) Economía del arrecife en términos de valor de uso (turismo / pesca y extracción de recursos/ actividades acuáticas recreativas). (2) Servicios ambientales (Erosión costera / fijación de carbono / transparencia de aguas / formación de playas / flujos bióticos y abióticos con otros ecosistemas / amenidad estética). (3) Derechos de existencia y legado para Colombia, el Caribe y el mundo.

En la segunda sección se propone un modelo bioeconómico mediante el cual se trata el recurso como renovable, considerando las condiciones reproductivas que presenta, tanto sexual como asexual.

En la tercera sección se presenta un modelo bioeconómico donde el arrecife coralino es tratado como un recurso natural no renovable, el cual tiene en cuenta las condiciones de fragilidad y baja resiliencia o recuperación de los arrecifes coralinos, considerados como un recurso que se renueva y recupera en tasas no apreciables por el ser humano.

La cuarta sección compara de manera teórica los dos modelos propuestos en términos de fortalezas y debilidades enfocadas para el recurso, considerando las respectivas

implicaciones biológicas, ecológicas y económicas de extracción y uso, frente a un conjunto de posibles políticas propuestas.

Para finalizar, en la quinta sección se realiza una aplicación empírica, caso de estudio en la isla de San Andrés, según la construcción y levantamiento de datos de carácter biológico, ecológico (Provenientes de una población coralina de la especie *Porites astreoides*), económico y social (mediante reportes de las entidades oficiales de la isla, entrevistas y vivencias directas en los mercados informales asociados). Esta sección muestra ejercicios de modelación, ajuste y evaluación de los dos enfoques, donde se simulan escenarios hipotéticos que generan resultados, análisis y recomendaciones propias del caso empírico.

I. Revisión de Literatura

Los arrecifes de coral prestan beneficios sociales, económicos, ambientales, biológicos y ecológicos; por lo tanto, un análisis normativo integraría un concepto multidisciplinario de las anteriores áreas científicas, teniendo en cuenta la interrelación del sistema natural con el entorno social. El caso de estudio representa la situación específica, considerando la composición del arrecife en la isla de San Andrés.

1.1 Biodiversidad, biología y ecología del arrecife de coral

Los corales pertenecen al reino Animal, el *Phylum* Coelenterata y el orden Scleractinia, el cual es considerado el orden de los corales hermatípicos o constructores de arrecife. Los corales son básicamente animales que secretan un esqueleto. Algunos son solitarios extendiendo sus tentáculos y otros son de vida colonial¹. Los corales son organismos primitivos pero complejos, constituidos por un esqueleto polipal llamado coralite, el cual es un microtubo conformado de manera horizontal que contiene el cuerpo vivo del pólipo. Los órganos superiores o tentáculos están constituidos por un tejido muscular elástico el cual permite la captura de pequeños organismos que son llevados a la boca del pólipo, en estos tejidos se incorporan las microalgas simbióticas o zooxanthelas que

¹ Agrupación de individuos de la misma especie que no han perdido su individualidad, constituyendo una sola unidad vital caracterizada por la división y especialización de las funciones en sus procesos esenciales biológicos (Hughes, 1989).

aportan energía a los pólipos por medio de procesos fotosintéticos. La unión en conjuntos especializados de los corales forman colonias en un proceso de construcción, donde el pólipo parental se divide en dos o mas pólipos hijos (división intra-tentacular) y así mismo se dividen en más, dividiendo sus cuerpos y coralites (división extra-tentacular) formando líneas de crecimiento en su cuerpo calcáreo (Veron, 2000). La característica de crecimiento coralino más común en un arrecife es de forma masiva, el cual conforma estructuras tridimensionales sólidas incrustadas en el sustrato modificando las costas y las playas vecinas.

Muchos de los invertebrados marinos, incluyendo los corales, tienen un mínimo control en la dispersión genética, pero pueden regular sus mecanismos de reproducción de acuerdo con las corrientes y mareas oceánicas, tratando de sincronizar la liberación de gametos y fragmentos reproductivos al entorno marino. La reproducción sexual se presenta en la liberación de espermatozoides y huevos que son fecundados al exterior de los organismos, formando larvas o planulas que conformarán un nuevo organismo coralino; por otro lado, algunas especies fertilizan los gametos al interior de sus cavidades corporales expulsando posteriormente una larva ya constituida. La sincronía sexual de liberación gamética está determinada por la temperatura anual de las aguas y por los ciclos lunares. La reproducción asexual afecta la distribución y abundancia de muchas especies coralinas, porque sucede mediante mecanismos de fisión y fragmentación de una colonia ya estructurada, donde partes del coral son dispersadas por las fuerzas oceánicas y asentadas en nuevos y libres hábitats (Veron, 2000).

Diferentes estructuras son formadas por los arrecifes de coral y se pueden distinguir de la siguiente forma: (i) arrecifes franjeantes; (ii) parches arrecifales; (iii) arrecifes de barrera; y (iv) atolones. Dentro de cada una de estas divisiones hay formaciones específicas y únicas de cada región oceánica. Los *arrecifes franjeantes* son las formaciones arrecifales más comunes, las cuales se desarrollan en geo-formas rocosas costeras levantando playas a través de aguas poco profundas. Los *parches arrecifales* son construcciones coralinas fragmentadas y separadas de forma discontinua formando tapetes a lo largo de la costa marina poco profunda. Las *barreras arrecifales* se desarrollan como líneas costeras de

acumulaciones de *carbonato de calcio* ($CaCO_3$) por parte de corales hermatípicos a consideración de largo plazo en las eras geológicas. Las barreras protegen las costas de la fuerza oceánica que provoca inundaciones, erosiones y fragmentaciones costeras. Por ultimo, los *atolones* son formaciones arrecifales con forma circular que crece de las plataformas marinas profundas, emergiendo de formaciones volcánicas que por procesos geológicos se hundieron en el mar dejando únicamente el borde o boca en zonas poco profundas, las cuales son colonizadas por corales (Cesar, 1996, 2000; Veron, 2000).

Los arrecifes de coral representan los ecosistemas marinos más biodiversos, los cuales albergan innumerable número de especies, 27 *phylum* de los 32 que conforman el reino animal, estableciendo la complejidad única de los nichos ecosistémicos arrecifales (Cesar, 2002). Los arrecifes conforman el hogar de plancton, hongos, moluscos, anélidos, poliquétos, crustáceos, equinodermos, peces, reptiles y algunos mamíferos marinos; que suministran materia y energía a las poblaciones humanas costeras y a los ecosistemas vecinos marinos. En muchos de los países tropicales, los arrecifes de coral proveen a las poblaciones humanas costeras, innumerables bienes y servicios que están asociados a la misma diversidad marina (Cesar, 1996; Cesar y Chong, 2000).

Algunos estudios de corales han tomado una nueva dimensión del mundo arrecifal y su declive ecosistémico, algunos de forma gradual, pero otros de manera vertiginosa. El cambio climático global, que causa el calentamiento de los océanos (La temperatura del mar ha incrementado alrededor de uno a 2 C° los últimos 100 años), el aumento de las poblaciones dañinas a los corales como lo es la estrella de mar *Acanthaster planci*, la excesiva nitrificación de las aguas provenientes de las tierras costeras, la sobre pesca y las técnicas destructivas de pesca que laceran al ecosistema. Por lo anterior, los corales enfrentan una fuerte situación de amenaza, debido a su misma fragilidad celular, orgánica y ambiental (Cesar y Chong, 2000); otra situación adversa es el blanqueamiento, el cual es el fenómeno donde los corales expulsan sus algas simbióticas causando la muerte progresiva de las colonias, por otro lado se presenta la mortalidad parcial y total que se manifiesta en el desprendimiento de tejido vivo y sano, por procesos físicos de contacto natural o artificial (Cesar, 2002; Veron 2000)

1.2 La isla de San Andrés y sus arrecifes de coral

la Isla de San Andrés está situada en la parte occidental del mar Caribe, fuera de la plataforma continental centroamericana (Geister, 1973; Geister, 1977); a los 12°32'N y 81°43'W, a 800 km. de la costa de Colombia, país al cual pertenece políticamente. Es la mayor isla del archipiélago Colombiano (*Figura 1*), la cual tiene una longitud de 13 km, una anchura máxima de 3.5 km. y una superficie de 26.6 km² (Díaz *et al.*, 1995; Geister y Díaz, 1997). San Andrés está rodeado por una terraza submarina de 200 a 500 m. de ancho, que en el occidente inicia en la misma costa y en el nororiente a partir de un arrecife de barrera (Geister, 1977; Díaz *et al.*, 1996; Geister y Díaz, 1997; Díaz *et al.*, 2000; Díaz, Barrios y Garzón, 2001). La distribución actual de los tipos de los arrecifes y biotopos en la isla guarda estrecha relación con la intensidad de las corrientes y la dinámica del oleaje y sus patrones de refracción-dispersión (Díaz *et al.*, 1996; Geister y Díaz, 1997).

San Andrés es de clima cálido, con una temperatura promedio de 24.7°C; los vientos soplan con mayor intensidad de noviembre a abril, fluctuando su intensidad de acuerdo a las tormentas tropicales esporádicas. Las lluvias de San Andrés definen dos periodos marcados, una época seca de febrero a abril y una época lluviosa de julio a diciembre; ocasionalmente la isla es afectada por el paso de huracanes del Caribe (Geister, 1977; Díaz *et al.*, 1996; Geister y Díaz, 1997; Zea *et al.*, 1998).

En la isla de San Andrés se encuentran 49 especies de escleractíneos y gran variedad de hidrocorales y octocorales; este número afirma la gran diversidad específica de la fauna coralina en esta zona del mar Caribe. La fauna coralina e hidrocoralina está distribuida uniformemente en la plataforma submarina de Sotavento, correspondiente a la parte occidental de la isla, siendo éste el lugar escogido para la realización del presente trabajo, denominado la *Terraza Arrecifal de Sotavento* (TAS en la *figura 1* y posteriormente en todo el documento, según Torres y Ramírez, 2005), como una unidad ecológica o de paisaje de corales mixtos que se extiende por aproximadamente 14 kilómetros de largo (de norte a sur), formando la estructura geológica marina en esta parte de la isla (Díaz,

2000). Por el contrario, los arrecifes de Barlovento exhiben un número limitado de especies hermatípicas aunque con mayor biomasa animal (Geister, 1973; Geister, 1977), constituyendo 3,000 m. de barrera coralina que en conjunto conforman tres unidades geomorfológicas en un mismo complejo arrecifal (Díaz *et al.*, 1996; Geister y Díaz, 1997).

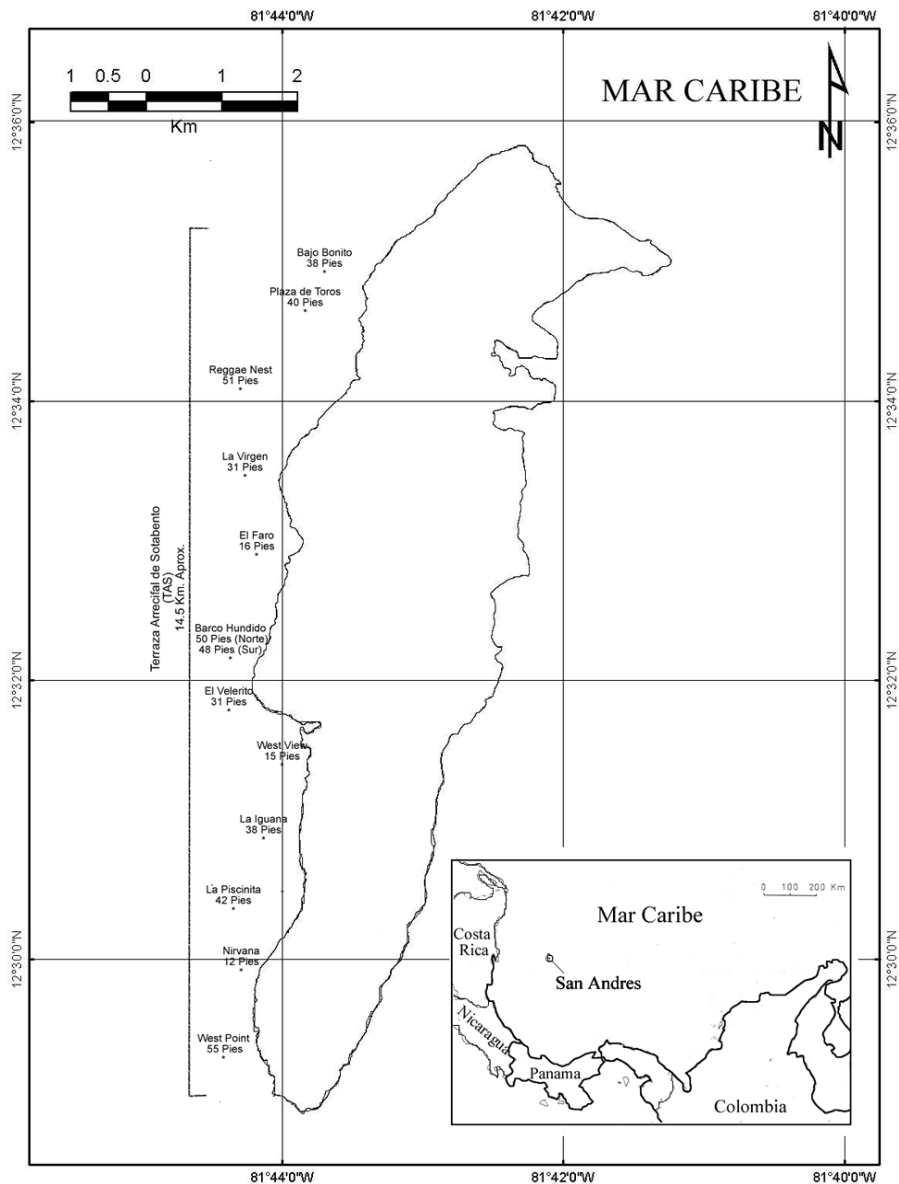


Figura 1. Isla de San Andrés y caracterización de la Terraza Arrecifal de Sotavento (TAS). Ubicación de las estaciones de muestreo en el costado occidental de la isla (Modificado de Díaz, 2000).

Las especies más dominantes en la estructura de comunidad arrecifal de la isla son las pertenecientes a las estructuras hermatípicas masivas, como es el caso del complejo de especies *Montastrea*, el complejo *Diploria*, *Agaricia* y la población de *Porites astreoides* (Díaz *et al.*, 1996; Díaz, Barrios y Garzón, 2001). Esta última población biológica es muy abundante y altamente densa en todas las unidades geomorfológicas coralinas de la isla y hace parte del análisis empírico del presente estudio, que realizó la colección de datos en la parte occidental de la isla denominada TAS (*Figura 1*).

La TAS está constituida principalmente por una compleja estructura arrecifal hermatípica de corales de crecimiento masivo e incrustante, que forma la estructura biótica costera pero no determina la geo-forma de la misma (Geister, 1997; Torres y Ramírez, 2005). Este complejo arrecife, registra la mayor diversidad de especies de todas las zonas arrecifales de la isla (Díaz *et al.*, 1996; Zea *et al.*, 1998).

1.3 Economía de los arrecifes de coral

Los beneficios de las actividades económicas marinas son resultado de la calidad ambiental de los arrecifes de coral; estas actividades han incrementado directamente con el desarrollo turístico costero, el cual crea oportunidades de empleo a un considerable número de personas en muchas partes del mundo. Esto está relacionado con la variedad en el impacto ambiental sufrido por el arrecife, como es el caso del desprendimiento de tejidos, mortalidad en los pólipos y blanqueamiento coralino o *white diseases*, dado el efecto de agentes o tensores patógenos, biológicos o fisicoquímicos, ajenos al ecosistema. Este impacto ambiental negativo, que resulta en el blanqueamiento de los pólipos, no es el único que genera esta enfermedad coralina que al igual está relacionada con el calentamiento climático global, cambios aleatorios oceanográficos de corrientes, reordenamientos intrínsecos de las poblaciones de coral, entre otros (Ngazy, Jiddawi y Cesar, 2003).

Por otro lado, los beneficios económicos generados por el flujo de bienes y servicios prestados por el arrecife de coral, se ven afectados por la contaminación marina, la

sedimentación, las técnicas de pesca destructiva y la extracción no controlada de recursos mineros o de construcción (Spurgeon, 2001; Fabres, 2002).

Las decisiones ecológicas y económicas en el manejo integrado de estos ecosistemas se soportan mediante modelos donde interactúan variables enfocadas en análisis de costo-efectividad, intervenciones de manejo y creación de políticas de desarrollo y decisión (Gustavson y Huber, 2001). Lo anterior plantea a la ecología económica como la relación entre el entorno ambiental y la economía en términos de las leyes termodinámicas de la materia, donde la producción de bienes y servicios requiere el consumo de energía y materia proveniente de los sistemas ambientales; por otro lado, estos sistemas reciben, albergan y transforman subproductos resultantes de las actividades económicas costeras (Rees, 2003).

Al considerar las decisiones más eficientes en el manejo de los recursos coralinos, se debe tener en cuenta planes de restauración y conservación de estos ecosistemas marinos, considerar la aplicación potencial del análisis de costo-beneficio (ACB), el cual se ve reflejado en los bienes y servicios prestados por este ecosistema, permitiendo el correcto desarrollo social y económico de las costas, donde se revelan las preferencias sociales de los individuos (Spurgeon, 1992; Hooten y Hatziolos, 1995). Además, es relevante tener en cuenta que en islas de tamaño pequeño, el manejo de los arrecifes se hace más complicado, debido a los conflictos de objetivos e intereses personales que dificulta la evaluación de los beneficios intangibles de los bienes y servicios prestados por el arrecife (Fernández, *et al.*, 1999). En estudios descritos para islas del Pacífico central, con características muy similares a San Andrés, se estimó una pérdida neta de US\$676,000 a US\$903,000 promedio anual, para la sociedad, como resultado de la extracción no planificada de los recursos coralinos, en especial en la extracción de *carbonato de calcio* ($CaCO_3$), sin tener en cuenta los costos a futuro, ocasionados por la degradación ecosistémica (Cesar, *et al.*, 1997).

Se distinguen bienes económicos suministrados por el arrecife de coral de carácter renovable (peces, frutos marinos, entre otros) y de recursos no renovables (tierra, coral,

minería en general, entre otros). Principalmente los servicios ambientales prestados por los arrecifes son categorizados en: (1) estructuras físicas, como la protección costera; (2) servicios bióticos, para este ecosistema en términos de manejo sostenible del hábitat, y entre ecosistemas conformando enlaces biológicos y ecológicos; (3) servicios biogeoquímicos por medio de la fijación de carbono, nitrógeno y fósforo; (4) servicios de información por medio del recuento climático geológico; (5) servicios sociales y culturales, conformando valores estéticos, recreación, existencia y legado (Spurgeon, 1992; Hooten y Hatzios, 1995; Cesar, 1996, 2000; Ngazy, Jiddawi y Cesar; 2003). Los bienes y servicios identificados en el caso de San Andrés son comparables con el estudio de Cesar (2002), ya que dicho estudio es realizado para los ecosistemas arrecifales en general, aplicado para un caso de estudio ubicado en una isla de Indonesia, con características sociales, económicas y ambientales, comparables a San Andrés (Figura 2).

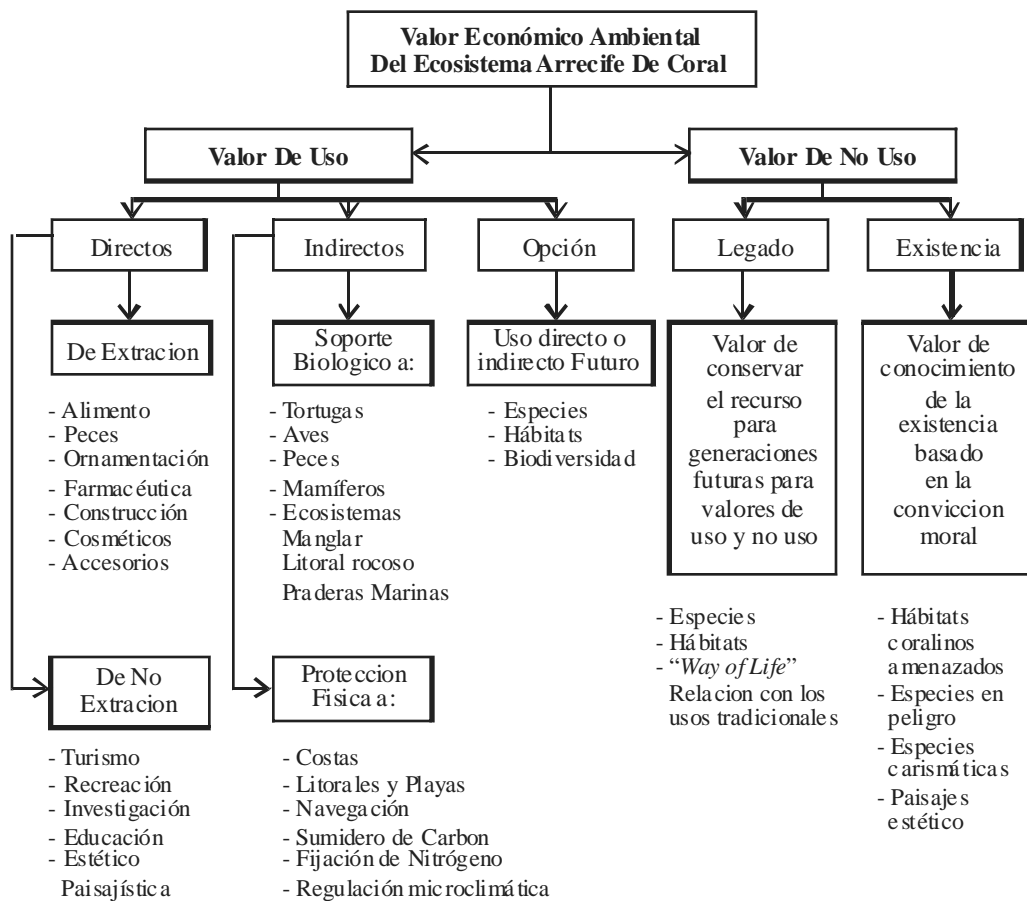


Figura 2: Diagrama de flujo de los valores económicos evidenciados en los arrecifes de coral de la isla de San Andrés (Modificada para el caso de San Andrés de Cesar y Chong, 2000).

El anterior diagrama (*figura 2*), muestra los diferentes tipos de valores económicos ambientales que son asignados y descritos por los actores de la isla de San Andrés, los cuales desarrollan su ciclo de vida económico en función al ecosistema arrecífal coralino.

La *figura 2* describe el valor económico ambiental total del ecosistema arrecífal en la isla de San Andrés, fraccionándolo en dos tipos de valores; los Valores de Uso y los Valores de No Uso. Los primeros muestran los valores directos de uso, como por ejemplo, el suministro alimenticio costero, la ornamentación, entre otros, los cuales tiene un mercado establecido.

Los valores indirectos de uso los cuales muestran el soporte biológico, ecológico, geológico y costero del ecosistema arrecífal y vecinos. El concepto del valor de opción se puede considerar como el valor de aplicaciones directas e indirectas futuras potenciales del ecosistema coralino; como por ejemplo el potencial de derivar una curación para enfermedades humanas terminales de las sustancias biológicas encontradas en los arrecifes como bioprospección, derivando beneficios económicos de este valor de opción.

En los Valores de No Uso se consigna el valor de legado, el cual se relaciona con preservación de la herencia natural para las generaciones futuras. Por otro lado, se encuentra el valor de existencia, el cual refleja la idea de valor de un ecosistema a los seres humanos independientes de si está utilizado o no.

Los arrecifes de coral bordean una extensa línea costera de los países más pobres del mundo, los cuales son consumidores de los recursos marinos para subsistir. La siguiente tabla (*Tabla 1*) muestra la relación existente entre la pobreza y los arrecifes coralinos del Caribe:

Tabla 1. Países del Caribe beneficiados por el uso directo de los arrecifes de coral.

País	Área Arrecifal (Km ²)	Población Total (Millones)	Índice de Desarrollo	Población que vive con menos de 1US\$ día (%)	Población que vive bajo línea de pobreza nacional (%)	Ingreso Per cápita (US\$)	Personas que viven directamente de los arrecifes
Cuba	3,020	11.2	Medio	-	-	-	11,865
México	1,780	97.4	Medio	12.2	10.1	8,297	262,401
Costa Rica	970	3.9	Alto	6.9	-	8,860	6,510
Nicaragua	710	4.9	Medio	-	50.3	2,279	14,502
Venezuela	480	23.7	Medio	18.7	31.3	5,495	44,302
Haití	450	8	Bajo	62.4	75.8	1,464	4,706
Colombia	940	42.4	Medio	11	17.7	5,749	129,410
San Andrés	44.7	0.056	Medio	22.3	25.5	3,935	15,320

Fuente: Modificada de Whittingham, Campell y Townsley, 2003.

La actividad económica de extracción más dañina para el arrecife de coral, en términos ambientales sostenibles, es la minería coralina para la producción de cal usada en la construcción, como fuente de renta y de subsistencia en muchas islas o países costeros en vías de desarrollo. El daño asociado al arrecife es significativo, de manera física y monetaria; puesto que las ganancias económicas obtenidas a partir de la destrucción del arrecife se utilizan a menudo para justificar la continuación de esta amenaza.

La cuantificación de los costos asociados a la degradación del arrecife coralino es importante, al hacer un estudio equilibrado de las ventajas y de los costos de dichas amenazas. Para hacer esto, se recurre a un análisis costo beneficio, ACB, el cual refleja los beneficios netos de la extracción minera coralina, confrontando los costos sociales netos de la aplicación real al eliminar el tejido coralino extraído en una localización geográfica y temporal específica. La descripción del flujo de beneficios requiere un estudio de valoración económica ambiental dada la metodología que se adecúe al caso estudiado.

Tabla 2. Estadística descriptiva de las variables de carácter socioeconómico de la población humana que se beneficia de los bienes y servicios del arrecife de coral en el mundo. 32 observaciones.

<i>Variables</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>Área Arrecifal (Km²)</i>	5,891.25	12,659.21	50	51,020
<i>Área Arrecifal deteriorada (Km²)</i>	1,472.81	3,164.80	12.5	12,755
<i>Población Total (Millones)</i>	102.92	275.80	0.035	1,264.81
<i>Índice de Desarrollo* Población que vive con menos de 1US\$ día (%)</i>	2	0.515	1	3
<i>Población que vive bajo línea de pobreza nacional (%)</i>	18.57	14.80	1	62.4
<i>Ingreso Per cápita (US\$)</i>	27.77	15.45	4.6	75.8
<i>Personas que viven directamente de los arrecifes</i>	5,668.09	5,551.42	1027	24,574
	899,685.2	2'474,896	364	1.22x10 ⁷

Fuente: Modificado de Whittingham, Campbell y Townsley (2003).

* 1=Bajo, 2=Medio, 3=Alto.

La explotación de recursos arrecifales está muy relacionada con las condiciones socio-económicas de los países; mediante el análisis estadístico de 32 países que extraen recursos arrecifales (con diferentes situaciones económicas), el promedio de área arrecifal disponible es de 5,892 km² aproximadamente, donde el área promedio de arrecifes destruidos o deteriorados es de 1,473 km² aproximadamente. El índice de desarrollo que asignan las organizaciones internacionales (Alto – 3; Medio – 2; Bajo – 1), muestra que en promedio los países que cuentan con recursos arrecifales están en un nivel medio de desarrollo. El índice per-capita promedio es de US\$5,668, mientras que el 18.57 por ciento de personas de estos países viven con menos de un dolar al día y el 27.77 por ciento viven bajo la línea de pobreza nacional; así mismo en estos países, 899,685

personas viven de la extracción directa de recursos arrecifales en promedio (Whittingham, Campbell y Townsley, 2003).

Por otro lado, se puede realizar un estudio de óptimalidad económica en la extracción de los recursos arrecifales, en especial de la extracción de *carbonato de calcio* ($CaCO_3$), el cual permite describir la senda óptima de extracción en técnicas de simulación, dadas unas políticas propuestas, frente a un escenario planteado por un planificador central. El personaje que ejerce las funciones de un planificador central es aplicable en el caso de estudio en la isla de San Andrés, donde se coalicionan dos grandes fuerzas políticas ambientales, las cuales son la Gobernación del Archipiélago, en representación del poder legislativo nacional, y la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA).

II. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es determinar y estimar un modelo bioeconómico adecuado para la extracción y uso de los arrecifes de coral, a partir de la estructura teórica económica y biológica de los recursos renovables y no renovables, considerando condiciones socio-económicas y ambientales en la distribución coralina en la isla de San Andrés.

2.1 Objetivos específicos

- Especificar teóricamente los modelos bioeconómicos de extracción y uso de los recursos arrecifales coralinos desde los enfoques de los recursos naturales renovables y no renovables.
- Construir el modelo ajustado para la extracción del recurso arrecifal coralino en la isla de San Andrés bajo los dos enfoques.
- Estimar empíricamente los dos modelos y comparar su capacidad de interpretar y proporcionar alternativas de manejo del recurso.
- Proponer recomendaciones de manejo, si es necesario, para el uso del recurso arrecifal coralino basadas en las soluciones simuladas de los modelos.

III Modelos Bioeconómicos

El planteamiento de los modelos, según el tratamiento teórico de los recursos naturales renovables y no renovables, propone la utilización de la técnica de optimización dinámica, que como su nombre lo indica, estima las sendas de decisión óptimas para sistemas que evolucionan en el tiempo. Por lo anterior se resuelven los problemas propuestos por medio de la programación dinámica, como herramienta de optimización.

La interpretación de las variables determina el nivel del sistema en cada instante en el tiempo, desarrollando la función de valor máximo, la cual se define para este trabajo, como el valor máximo que puede alcanzar la función objetivo, una vez que se han seleccionado de manera óptima los controles desde el momento t hasta el final del problema, partiendo desde el estado inicial t_0 . Para el desarrollo del anterior método se utiliza la relación recursiva fundamental que traduce matemáticamente el principio básico de la programación dinámica llamado el principio de optimalidad de Bellman. La ecuación de Bellman enuncia: Una política óptima tiene la propiedad que cualquiera sea el estado y las decisiones iniciales tomadas, las restantes decisiones deben constituir una política óptima con independencia del estado resultante de la primera decisión (Miranda y Fackler, 2002).

3.1 Modelo teórico de recurso natural renovable

En el siguiente análisis se describen los modelos teóricos propuestos para desarrollar el problema específico del estudio empírico, aplicando los datos y funciones específicas para el recurso arrecífal, desde la perspectiva de los recursos naturales renovables, con el fin de encontrar las sendas de las políticas óptimas de extracción del recurso, mediante el enfoque de la programación dinámica y la decisión de un planificador central.

El siguiente modelo propuesto supone una naturaleza determinística en un horizonte infinito. Las siguientes variables y funciones describen el problema:

La variable de Estado (s) es la cantidad del *stock* en términos de kg. de $CaCO_3$, donde el área potencial de extracción está dada por el área arrecífal disponible en la zona de

estudio, 46.4 km² (14.5 km. de largo y 3.2 km. de ancho). El análisis de campo mostró que en 1 cm² de área coralina hay una equivalencia en promedio de 10 g. de CaCO₃, por lo tanto, se tendría un *Stock* inicial de 4.64x10⁹ kg. de CaCO₃. El espacio de la variable de estado está dada por los reales no negativos ($s \in [0, \infty]$).

La variable de control (x) es la cantidad del recurso extraído en kg. por periodo temporal de estudio, en término de área coralina (A_c) previa conversión analítica de centímetros a kilogramos, la cual tiene un espacio que va desde cero hasta el *stock* disponible ($x \in [0, s]$).

La ecuación de transición muestra la evolución del recurso como resultado del crecimiento propio ($F(s_t)$) y de la extracción (x), definiéndose de la siguiente forma:

$$g(s, x) = s_{t+1} = (s_t - x_t) + F(s_t) \quad (1)$$

La ecuación de recompensa depende de la variable de estado, por que enumera todos los estados posibles en el sistema y depende de la variable de control porque enumera todas las acciones que pueden ser tomadas por el agente. Esta ecuación define los beneficios obtenidos por la extracción del recurso arrecifal, en términos de ingreso y costos obtenidos en el proceso, y está definida de la siguiente manera, asumiendo esta forma funcional dada la característica del problema:

$$\begin{aligned} f(s, x) &= \int_0^x p(\phi) d\phi - \int_0^x C'(\phi) d\phi \\ f(s, x) &= \int_0^x p(\phi) d\phi - C(x) \\ f(s, x) &= \frac{psx^2}{2} - C(x) \end{aligned} \quad (2)$$

El caso específico para el problema empírico, asume las decisiones realizadas por un planificador central, el cual maximiza el bienestar social, sujeto a la ecuación de evolución del recurso, es decir, maximizar en valor presente la suma de los beneficios sociales netos obtenidos en la extracción de los recursos arrecifales:

$$\begin{aligned} & \text{Max}_x \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t \left[\int_0^x p(\phi) d\phi - C(x) \right]; \\ & \text{S.A : } g(s, x) = (s_t - x_t) + F(s_t) \end{aligned} \quad (3)$$

Por lo anterior se genera la ecuación de valor óptimo de Bellman de la siguiente forma:

$$V(s) = \text{Max}_x \left[\int_0^x p(\phi) d\phi - c(x) + \delta V((s_t - x_t) + F(s_t)) \right]; \quad (4)$$

Al derivar de la ecuación de Bellman, con respecto a la variable de control (x), se obtiene la condición de equimarginalidad:

$$p(x) - C'(x) + \delta \lambda_t (s - x + F(s)) - 1 = 0; \quad (5)$$

Al igual se obtiene la condición del envolvente, donde la ecuación de Bellman con respecto a la variable de estado (s):

$$\begin{aligned} \lambda_t(s) &= \frac{\partial F}{\partial s} + \delta \lambda_t (s - x + F(s)) (1 + F''(s)) \\ \text{Sea : } \frac{\partial F}{\partial s} &\neq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Donde: $\lambda_t = \frac{\partial V(s)}{\partial s}$; y el análisis de optimalidad plantea:

$p(x) + F''(s) = C'(x) + \lambda_t(s)$; donde el precio del recurso en el mercado más el beneficio marginal que genera ese crecimiento del *stock* es igual a la suma del costo marginal de extracción más el costo ínter temporal de no disponer de esa unidad extraída en el futuro.

El análisis permite capturar la tendencia en el largo plazo del proceso económico controlado, definiendo el estado estacionario del mismo; donde hay un equilibrio entre las decisiones tomadas y la evolución natural del recurso, las cuales satisfacen la ecuación de equimarginalidad y las condiciones en el estado estacionario de la siguiente forma:

$$p(x^*) - C'(x^*) + \delta \lambda^* (x^* + F(x^*)) = 0; \quad (7)$$

$$\lambda^* = \delta \lambda^* (x^* + F(x^*)); \quad (8)$$

$$s^* = g(s^*, x^*) = (x^* + F(x^*)). \quad (10)$$

Mostrando las ecuaciones en equilibrio, donde la ecuación de transición origina una igualdad entre las decisiones de extracción con la tasa de recuperación del recurso coralino.

3.2 Modelo teórico de recurso natural no renovable

El siguiente modelo plantea la resolución del problema por parte de un planificador central o agente tomador de decisiones, con naturaleza determinística. Por otro lado el horizonte es finito, ya que se estima un área mínima de explotación que es cuantificable y que considera un área de conservación coralina que no puede ser explotada, dado que el arrecife presta un flujo de bienes y servicios únicos en su estado ecológico natural y que no se recupera en periodos de tiempo observables en la escala temporal humana. Las funciones y variables se mantienen iguales que en el anterior modelo, dados los supuestos específicos para el problema, pero no se considera la función de crecimiento poblacional estimada para el anterior modelo del recurso renovable. Las principales diferencias son las siguientes:

El espacio de la variable de estado va desde el área mínima de conservación que se debe mantener del ecosistema arrecifal, hasta la capacidad de carga del mismo ($s \in [s_{Min}, k]$). Por otro lado, la variable de control tiene un espacio definido que va desde extraer cero, hasta extraer el máximo del *stock* posible, agotando el recurso coralino permitido en un tiempo establecido ($x \in [0, s]$).

La ecuación de transición muestra la relación entre la decisión de manejo y el estado presentado en un tiempo dado:

$$g(s, x) = s_{t+1} = (s_t - x_t); \quad (11)$$

La ecuación de recompensa muestra la siguiente forma funcional:

$$\begin{aligned} f(s, x) &= \int_0^x p(\phi) d\phi - \int_0^x C'(\phi) d\phi \\ f(s, x) &= \int_0^x p(\phi) d\phi - C(x) \quad ; \\ f(s, x) &= \frac{psx^2}{2} - C(x) \end{aligned} \quad (12)$$

El planificador central maximiza el bienestar social, sujeto a la ecuación de evolución del recurso:

$$\begin{aligned} & \text{Max}_x \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t \left[\int_0^x p(\phi) d\phi - C(x) \right]; \\ & \text{S.A : } g(s, x) = (s_t - x_t) \end{aligned} \quad (13)$$

La ecuación de valor óptimo de Bellman es:

$$V(s) = \text{Max}_x \left[\int_0^x p(\phi) d\phi - c(x) + \delta V(s_t - x_t) \right]; \quad (14)$$

La condición de equimarginalidad:

$$p(x) - C'(x) - \delta \lambda_t (s - x) = 0; \quad (15)$$

La condición del envolvente:

$$\begin{aligned} & \lambda_t (s) = \delta \lambda_t (s - x) \\ & \text{Sea : } \frac{\partial f(s, x)}{\partial s} = 0; \end{aligned} \quad (16)$$

Donde: $\lambda_t = \frac{\partial V(s)}{\partial s}$; llegando a la conclusión de optimalidad:

$p(x) = C'(x) + \lambda_t (s)$; donde el precio del recurso en el mercado es igual al costo marginal de extracción mas el costo ínter temporal de no disponer de esa unidad extraída en el futuro (costo de usuario).

Bajo el supuesto de $p(x_0) > C'(x)$, el modelo admite en el estado estacionario las condiciones de equilibrio caracterizadas sólo sí $\lambda^* = x^* = 0$ y $C'(s^*, 0) = 0$. Esto es si la extracción es abandonada cuando el *stock* coralino llega a cantidades ecológicas críticas en términos de cantidades óptimas ambientales (s^*).

IV. Datos Necesarios

Los datos de carácter biológico y ecológico fueron colectados directamente por parte del autor, siguiendo metodologías de muestreo internacionales propuestas por primera vez en el manual de monitoreo para arrecifes para el Caribe y el Atlántico occidental (Rogers *et al.*, 1994), cuya corrección es propuesta en los métodos para el monitoreo de parámetros

físicos y biológicos para el sistema arrecifal mesoamericano (Almada *et al.*, 2003), y la aplicación para los arrecifes Colombianos fue diseñada por el Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia, cuyas siglas son SIMAC (Garzón, Reyes y Rodríguez, 2002); la aplicación internacional estandarizada y empleada en el presente trabajo es la ajustada por la organización *Reef Check* (2004), donde los datos colectados fueron estandarizados en unidades métricas internacionales, y la colección y diseño de muestreo son correspondientes con los parámetros dados para el caso del presente estudio con modificaciones propuestas por el autor.

Considerando las necesidades de información que permitieran desarrollar los objetivos propuestos, los datos socioeconómicos utilizados provienen del reporte de COLCIENCIAS (2003), donde participa el Banco de la República, la Gobernación de San Andrés, Providencia y Santa Catalina y la Corporación Autónoma Regional, CORALINA. Las demás características utilizadas para el coherente y correcto desarrollo del análisis de resultados, así como las propuestas teóricas planteadas, nacen de las vivencias, entrevistas y observaciones del autor realizadas en la fase de campo. Para la construcción de la base de datos de orden económico, se utilizaron promedios anuales para un periodo consecutivo de 6 años (1999 – 2004), la cual es una fuente de observaciones que no son suficientes para una estimación exacta.

4.1 Base de Datos

La base de datos está compuesta por variables de tipo biológico, ecológico y económico; relacionados con la población biológica *Porites astreoides*, la cual es una de las poblaciones coralinas extraídas por los agentes económicos que conforman un mercado informal en la isla de San Andrés. La extracción de este recurso coralino es apta para la utilización del *carbonato de calcio* ($CaCO_3$), utilizado para varios propósitos cotidianos de construcción propios de las personas en las islas pobres del mundo. La base de datos biológicos se complementa con variables económicas como promedios de costos de extracción del recurso coralino y estimaciones de precios e ingresos generados en un periodo de tiempo correspondiente al periodo 1999-2004 (*Tabla 3*).

Tabla 3. Indicativos económicos asociados a la extracción de recursos arrecifales en la isla de San Andrés expresados en pesos colombianos constantes (Año base 2004, con el índice agregado simple de precios). Observación promedio anual de un periodo de seis años (1999-2004).

Año	Costo Total (Extracción por jornada)	Precio Insumos Técnicos (Pala, Pico, cuerda)	Precio Galón Gasolina	Salario Mínimo Legal Diario	Precio de 1 kg de Bienes Pesqueros (Moluscos, peces, crustáceos, entre otros)	Precio de 1 kg de CaCO ₃
1999	34,305	18,867	4,511	11,102	3,976	1,247
2000	35,714	17,971	4,652	10,814	3,714	1,142
2001	34,348	18,548	4,887	10,867	4,259	1,099
2002	34,483	19,258	4,066	10,930	4,229	1,041
2003	34,660	18,224	4,353	10,621	5,031	1,118
2004	34,000	18,000	4,510	11,300	5,200	1,000

Fuente: Modificado de COLCIENCIAS (2003) y reestructurado por vivencias y entrevistas realizadas por el autor en la fase de campo.

4.1.1 Metodología y muestreo

La fase metodológica correspondió a dos periodos discontinuos: el primero fue una etapa de pre-muestreo que se realizó del 12 de Octubre al 20 del mismo mes, en el año 2002. El segundo periodo fue el de muestreo, con una duración de 18 días, que va desde el 30 de Enero al 16 de Febrero del 2003. Los propósitos del pre-muestreo fueron los siguientes: (1) reconocer la estructura arrecifal de la Isla tanto en la zona oriental como la occidental (optando por la escogencia de esta última), (2) establecer los puntos de muestreo o estaciones, al posterior reconocimiento de la TAS, (3) determinar el perfil batimétrico de la terraza arrecifal, con una clara división en su geomorfología, (4) ubicar rápidamente las poblaciones coralinas de *Porites astreoides*, su estado y su establecimiento poblacional, (5) acomodar correctamente la metodología experimental y el diseño del muestreo según las estaciones y las profundidades (*Anexo 1*). Los puntos o estaciones de muestreo, se eligieron de acuerdo a la homogeneidad paisajística de la terraza y su conformación en el ecosistema arrecifal de corales mixtos, al igual se tuvo en cuenta el rango batimétrico marcado que no tuviera irregularidades en cortos espacios de terreno submarino.

Para el muestreo se utilizó la técnica del parcela-réplica (Ramírez, 1999), donde se manejó una parcela con un área de 10 m², elaborada con cuerda de color vistoso que en sus ángulos reposaba en el fondo mediante un peso de plomo (*Anexo 2, Figuras 15 y 16*).

La parcela de muestreo se replicó 5 veces en cada estación, recopilando datos de 50 m² en total para cada punto de la TAS de la Isla (Figura 3).

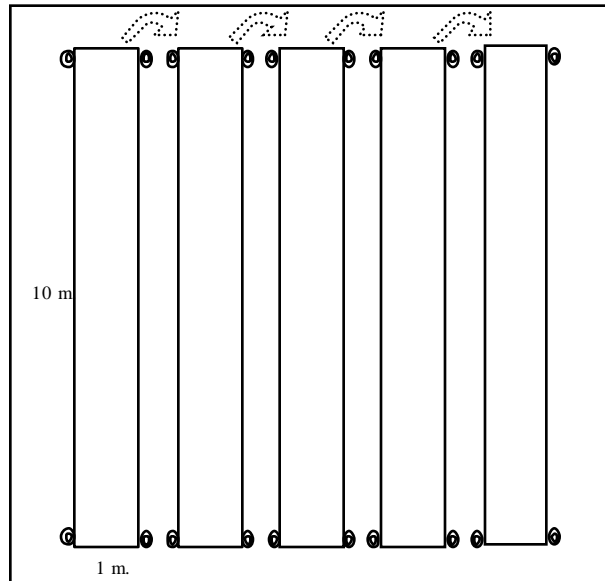


Figura 3. Parcelas de muestreo de 10 metros de largo por 1 metro de ancho.

En cada sitio de muestreo se identificaron las colonias de *P. astreoides*, donde se determinó la tasa de crecimiento por el número de líneas de crecimiento presentes en cada colonia (cm²/año), el tamaño de cada colonia (cm²) mediante un cuadrante de madera de 900 cm², con divisiones cuadradas de 4 cm² elaboradas con cuerda cada 2 centímetros a lo largo y a lo ancho (Anexo 2, Figuras 17 y 18), al igual que la mortalidad parcial (cm²) y las enfermedades blancas o *white diseases* (cm²). Para el muestreo se utilizó equipo *scuba* y cámara fotográfica submarina (Anexo 2, Figura 16).

Las características socioeconómicas fueron recolectadas mediante entrevistas directas a los pescadores, donde se preguntó la evolución de los precios, costos e ingresos de las actividades en la extracción de recursos coralinos. Los datos son correspondientes a un periodo de 6 años (1999-2004), contrastados con el informe de COLCIENCIAS (2003) en la agenda prospectiva de ciencia y tecnología para el archipiélago (Tabla 2).

4.1.2 Estadísticas descriptivas

Las siguientes estimaciones muestran el promedio, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos de cada variable de origen biológico y ambiental (*Tabla 4*).

Tabla 4. Estadística descriptiva de las variables de carácter biológico y ecológico de la población coralina. 875 observaciones.

<i>Variable</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>Tasa de crecimiento (cm²/año)</i>	0.227	1.098	0.003	23.76
<i>Área de la colonia coralina (cm²)</i>	101.092	307.794	4	5760
<i>Mortalidad parcial de la colonia coralina, tejido muerto (cm²)</i>	3.186	10.404	0	124
<i>Blanqueamiento, área de tejido enfermo de la colonia (cm²)</i>	0.566	4.784	0	100
<i>Densidad poblacional, numero de colonias coralinas por unidad de área (col/m²)</i>	1.834	0.956	0.3	4.1
<i>Variedad intra-específica poblacional (1: Variedad mostaza; 0: Lo contrario)</i>	0.579	0.493	0	1
<i>Profundidad, ubicación batimétrica de la colonia coralina (pies)</i>	32.642	14.245	12	55
<i>Ubicación con respecto a la contracorriente oceánica (1: Antes de corriente; 0: Lo contrario)</i>	0.149	0.356	0	1

Fuente: Autor.

Las colonias de coral de la población muestreada presentan una tasa de crecimiento promedio de 0.227 cm² en un año, que pueden llegar hasta los 23.76 cm² anuales. El área de las colonias coralinas o *stock* disponible del recurso a extraer, y presenta un área promedio por colonia de 101.1 cm² en toda la zona de muestreo, pero es posible encontrar colonias cuyo tamaño alcanza los 5,760 cm² conformando una colonia maciza y óptima para la extracción.

La mortalidad de las colonias se presenta en promedio con un área de 3.18 cm², al igual que el área enferma o que presenta blanqueamiento, donde el promedio es de 0.566 cm², considerando estos valores bajos con respecto a otros sitios del Caribe registrados en Díaz (2000). Por otro lado, se puede decir que el 57.9 por ciento de las colonias de la

población estudiada, pertenecen a la variedad intra-específica mostaza; y que el 14.9 por ciento están ubicada bajo la contra-corriente que fragmenta la población coralina en la parte occidental de la isla.

La profundidad promedio donde se desarrollan las colonias coralinas es de 32.64 Pies (9.98 metros), pero registrando colonias desde partes muy someras, hasta colonias encontradas a más de 60 pies (18.9 metros). Al considerar las variables binarias como variedad intra-específica y corriente oceánica, se permite considerar a toda la población coralina como una sola unidad geomorfológica en términos poblacionales.

Mediante un análisis de regresión lineal se calculó la relación entre profundidad y crecimiento (*Anexo 3*). La profundidad máxima en la cual las colonias de la población tendrían tasas de crecimiento positivo es de 86.22 pies (26.06 metros). La profundidad donde las colonias muestran la mayor tasa de crecimiento sería a 43.11 pies aproximadamente (13.03 metros), corroborado con la teoría biológica de la población estudiada, la cual dice que el crecimiento óptimo de las poblaciones coralinas se presenta entre los 40 y 50 pies de profundidad (Veron, 2000).

Con respecto a los costos de extracción de los recursos coralinos, se realizó el análisis considerando los precios de los factores de producción, para construir la función de costos (*Tabla 5*).

Tabla 5. Estadística descriptiva de las variables de carácter económico de la extracción de recursos arrecifales en la isla de San Andrés. Observación promedio anual de un periodo de seis años (1999-2004). Pesos constantes del año 2004.

<i>Variable</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>Costo Total (Extracción por jornada)</i>	34,585	594.60	35,714	34,000
<i>Precio Insumos Técnicos (Pala, Pico, cuerda)</i>	18,478	513.01	19,258	17,971
<i>Precio Galón Gasolina</i>	4,496	276.66	4,887	4,066
<i>Salario Mínimo Legal Diario</i>	10,939	235.94	11,300	10,621
<i>Precio de 1 kg de Bienes Pesqueros</i>	4,401	589.47	5,200	3,714
<i>Precio de 1 kg de CaCO₃</i>	1,108	86.02	1,247	1,000

Fuente: Autor y modificación del reporte de COLCIENCIAS (2003).

Durante el periodo de 6 años, generados a partir de tomar el 2004 como año base, el costo total promedio de extracción de recursos arrecifales en la isla de San Andrés es de 34,585 pesos por jornada de extracción, teniendo en cuenta que las actividades pesqueras se desarrollan cuatro días de la semana, el costo mensual de extracción promedio en estos seis años es de 553,365 pesos aproximadamente. Este dinero que muestra los costos, está representado por embarcación, que tiene ingresos por la venta directa de recursos pesqueros arrecifales (peces, moluscos, crustáceos, entre otros) y por la extracción de bienes asociados al arrecife de coral (algas y *carbonato de calcio*).

El precio en el mercado informal del *carbonato de calcio* no supera los 800 a 1,000 pesos el kilogramo. Los insumos técnicos son adquiridos una sola vez por parte de los pescadores, los cuales son usados en todas las faenas o jornadas de extracción de los recursos (*Tabla 5*).

4.1.3 Aspectos demográficos de la población coralina

La estructura coralina estudiada en el presente estudio, es ubicada en la parte occidental de la isla de San Andrés, conocida como la TAS, cuyo perfil batimétrico se fracciona en dos terrazas homogéneas (una somera y otra profunda) en toda la costa, terminando en un talud oceánico a los 20 metros de profundidad (*Figura 4*).

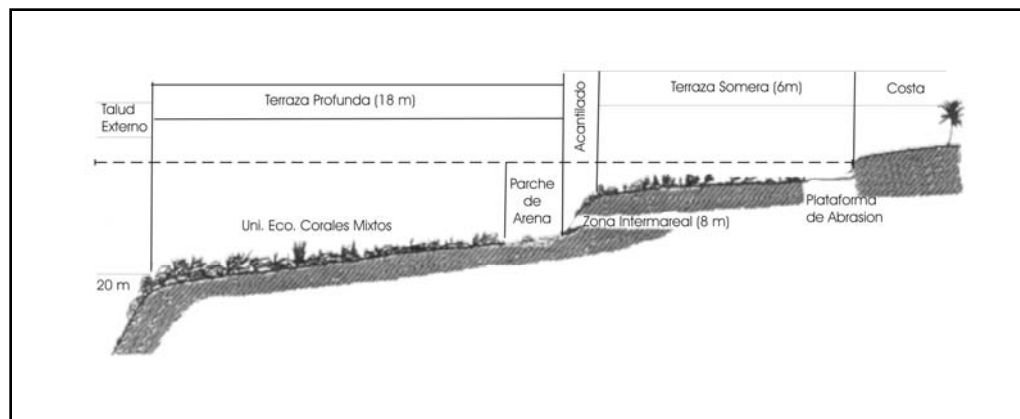


Figura 4. Perfil de la TAS que muestra la segmentación de las dos terrazas sumergidas: somera desde un metro hasta 6 metros de profundidad, y profunda desde los 6 metros hasta los 18 metros (Modificado de Díaz et al., 1996).

La estructura poblacional coralina es descrita en el estudio de Torres y Ramírez (2005), siendo confrontada en el presente estudio, se encuentran las siguientes características demográficas poblacionales: (1) el número de colonias de la especie *Porites astreoides* registradas en el presente estudio (n = 875), da un excelente indicativo tanto del muestreo como del estado poblacional en sí; (2) la población presenta una alta densidad poblacional en todas las estaciones muestreadas a lo largo de la TAS muy similar a otros registros estudiados en el Caribe; (3) las colonias alcanzan grandes tamaños tanto en San Andrés como en varios sitios del Caribe, los cuales contribuyen al moldeamiento en la geomorfología arrecifal; (4) los tamaños de las colonias coralinas son diferentes en las profundidades y en las diferentes estaciones muestreadas pero son iguales en las dos variedades intraespecíficas, la mostaza y la gris; (5) la cobertura de la mortalidad parcial es diferente entre las estaciones, en todas las profundidades y en las categorías de tamaños, pero es significativamente igual en las dos variedades intraespecíficas; (6) La cobertura de las enfermedades blancas o *white diseases* es diferente en las estaciones muestreadas y en todas las profundidades, pero no en las categorías de tamaños y en las dos variedades intraespecíficas; (7) las dos variedades intraespecíficas no presentan diferencias significativas en las variables demográficas cuantificadas, lo que permite deducir que son pertenecientes a un mismo grupo poblacional; (8) en la zona somera se relacionó el tamaño de las colonias con la cobertura de la mortalidad parcial, de forma lineal, directa y positiva; (9) las colonias coralinas registradas en la TAS están relacionadas por el tamaño y la cobertura de tejido muerto, donde se evidencia la mayor cobertura de mortalidad parcial en colonias de mayor tamaño; (10) el impacto ambiental humano se ve reflejado en la estación La Virgen (sitio de vertimiento de desechos humanos al occidente de la isla), en registrar los mayores valores en la cobertura de la mortalidad parcial y en las enfermedades blancas sobre las colonias coralinas; (11) la contaminación de origen antrópico afecta de manera directa y severa las colonias coralinas formadoras de arrecifes, aumenta las coberturas en la mortalidad y genera ambientes propicios para el desarrollo de plagas infecciosas fatales para los tejidos polipales; (12) la población coralina en la TAS se encuentra en un buen estado ecológico y con una promisoría perspectiva futurista en la recuperación de los arrecifes de la Isla y

del Caribe en general, a pesar de la constante explotación de los recursos coralinos y de los recursos asociados al mismo.

4.2 Estimaciones

La función de crecimiento poblacional del recurso natural, se calculó mediante el método de regresión lineal por el procedimiento de mínimos cuadrados (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados de la regresión lineal para obtener la función de crecimiento poblacional del recurso. Sea: Gr – Tasa de crecimiento ($cm^2/año$); $Const$: Constante; Ac – Área coralina (cm^2); Pmp – Porcentaje de mortalidad parcial; Pwd – Porcentaje de blanqueamiento; Dp – Densidad poblacional (col/m^2); Vi – Variedad intra-específica poblacional (1: Variedad mostaza; 0: Lo contrario); Cr – Ubicación con respecto a la contracorriente oceánica (1: Antes de corriente; 0: Lo contrario); Pf – Profundidad (pies); Fc – Prueba f calculada; $R2$ – Coeficiente de ajuste; p -Valor – Valor probabilístico.

Gr	Coefficiente	p -Valor
$Const$	-3.733	0.000
Ac	0.006	0.000
Ac^2	-1.12×10^{-6}	0.000
Pmp	0.011	0.000
Pwd	0.001	0.842
Dp	0.015	0.773
Vi	-0.187	0.003
Cr	0.116	0.034
Pf	0.018	0.239
Pf^2	-2.15×10^{-4}	0.171
Fc	332.20	0.000
$R2$	0.6469	

Formulando el siguiente modelo econométrico:

$$\hat{Gr} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1(Ac) + \hat{\beta}_2(Ac^2) + \hat{\beta}_3(Pmp) + \hat{\beta}_4(Pwd) + \hat{\beta}_5(Dp) + \hat{\beta}_6(Vi) + \hat{\beta}_7(Cr) + \hat{\beta}_8(Pr) + \hat{\beta}_9(Pr^2)$$

Sea: Gr – Tasa de crecimiento ($cm^2/año$);

Ac – Área coralina (cm^2);

Pmp – Porcentaje de mortalidad parcial de la colonia coralina, tejido muerto;

Pwd – Porcentaje de blanqueamiento, área de tejido enfermo de la colonia;

Dp – Densidad poblacional, número de colonias coralinas por unidad de área (col/m^2);

Vi – Variedad intra-específica poblacional (1: Variedad mostaza; 0: Lo contrario);

Cr – Ubicación con respecto a la contracorriente oceánica (1: Antes de corriente;
0: Lo contrario);
 Pf – Profundidad, ubicación batimétrica de la colonia coralina (pies).

La población coralina de la isla de San Andrés presenta la siguiente función de crecimiento conformada de manera estadística y matemática:

$$\text{Tasa de crecimiento; } Gr = -3.386 + 0.0067(Ac) - 1.12 \times 10^{-6} (Ac^2)$$

Asumiendo una función de crecimiento logística de la siguiente forma a partir de la regresión lineal, se puede deducir:

$$f(Ac) = 0.0067(Ac) - \frac{0.0067(Ac^2)}{6047.14}$$

Donde: $r = 0.0067$, es la tasa intrínseca de crecimiento en $\text{cm}^2/\text{año}$.

$k = \left| \frac{0.0067}{-1.12 \times 10^{-6}} \right| = 6047.14 \approx 6050$, es la capacidad de carga en número de colonias.

A partir de los resultados obtenidos se genera la función cuadrática de crecimiento poblacional coralina expresada en la *Figura 5*.

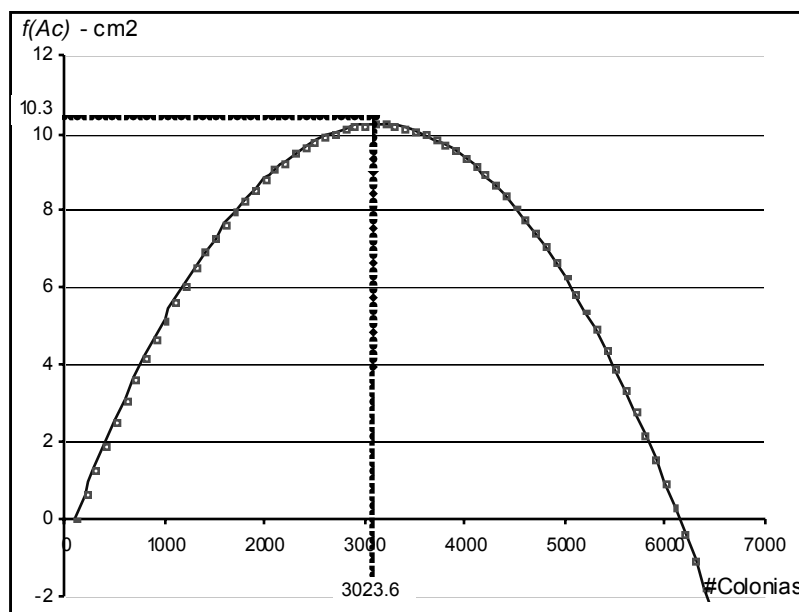


Figura 5. Función de crecimiento poblacional coralina de la isla de San Andrés.

El rendimiento máximo sostenible (*RMS*) o cantidad máxima de extracción sostenible, corresponde a 3,023 colonias en el ecosistema arrecifal como nivel de *stock* generado por una posible extracción equivalente a 10.3 cm².

El *stock* inicial corresponde a un área calculada total del arrecife de 46.4 km², correspondiente a la terraza arrecifal de sotavento (La TAS correspondiente a la *figura 1* y *figura 4*). Esta cantidad de recurso disponible equivale a 4.64x10⁹ kg de CaCO₃, según la conversión equivalente biológica (1cm² ≈ 10gramos).

Por el precio de mercado promedio (1,108 ≈ 1,000gramcs), se puede calcular el monto comercial en dinero del recurso extraído de la población biológica coralina o CaCO₃ a comercializar, el cual equivaldría aproximadamente a 5.1 billones de pesos.

La función de costo total se construyó a partir de la estimación de los parámetros correspondientes a los precios de la gasolina y el salario mínimo legal diario que permiten extraer directamente los bienes del arrecife de coral de la isla de San Andrés en un periodo de seis años (1999 – 2004), tomando el año 2004 como año base. La estimación econométrica se realizó mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios, considerando una secuencia temporal consecutiva basada en los promedios anuales de pocas observaciones, considerando una forma funcional doble logarítmica, evitando que los parámetros estimados no sean sesgados ni ineficientes (Judge, *et al.*, 1998). El modelo estimado se representa de la siguiente forma:

$$\widehat{LCt} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1(LPgg) + \hat{\beta}_2(LSmdl)$$

Sea: *LCt* – Logaritmo costo total de extracción de recursos coralinos en pesos;

LPgg – Logaritmo precio de un galón de gasolina en pesos;

LSmdl – Logaritmo salario mínimo legal diario en pesos;

La estimación de los parámetros, considerando la forma funcional doble logarítmica, se registra en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Resultados de la regresión lineal por el método de mínimos cuadrados ordinarios, para obtener la función de costo total de extracción de recursos arrecifales en la isla de San Andrés. Sea: LCt – Logaritmo del costo total; LPgg – Logaritmo del precio de un galón de gasolina; LSmdl – Logaritmo del salario mínimo legal diario; Const: Constante; Fc – Prueba f calculada; R2 – Coeficiente de ajuste; p-Valor – Valor probabilístico. Observaciones promedio anuales del periodo comprendido entre el año 1999 a 2004.

<i>CT</i>	<i>Coficiente</i>	<i>p-Valor</i>
<i>Const</i>	14.4071	0.027
<i>Pgg</i>	0.0405	0.097
<i>Smdl</i>	0.46207	0.069
<i>Fc</i>	0.83	0.0516
<i>R2</i>	0.3223	

De acuerdo con los resultados estimados se construye el siguiente modelo:

$$LCt = 14.4071 + 0.0405(LPgg) + 0.4621(LSmdl)$$

El modelo presenta dependencia y relevancia global dada la prueba estadística *F*, al igual que un valor de ajuste de más del 32 por ciento. Por otro lado, se puede decir que los costos fijos están representados por la constante del modelo estimado, que representarían el valor en pesos de la depreciación de los insumos técnicos por jornada (estos insumos son comprados una sola vez por los pescadores y comprenden la lancha, el motor fuera de borda, la pala, el pico, las sogas, entre otros), los cuales son utilizados en la extracción de recursos arrecifales en la isla, en especial la extracción de *carbonato de calcio*. Los costos totales de extracción de recursos arrecifales dependen del precio de la gasolina, mostrando el efecto de los costos variables, donde al aumentar una unidad porcentual en el precio de la gasolina (pesos), aumentan los costos totales de manera significativa. El costo de oportunidad es capturado en el efecto del salario mínimo legal diario, el cual muestra de manera significativa que al aumentar este en una unidad en el periodo anterior, los costos totales de extracción aumentan.

El recurso coralino ($CaCO_3$) en la isla de San Andrés es explotado de forma activa por 126 personas aproximadamente, el cual es el 0.23 por ciento de la población de la isla,

correspondiente a los pescadores registrados por las autoridades regionales administrativas (COLCIENCIAS, 2003). Donde la presión promedio anual sobre el recurso (toneladas), depende del número de personas que se dedican a la actividad de extracción de $CaCO_3$ y a la cantidad promedio anual extraída por cada persona (Tabla 8).

Tabla 8. Indicadores de la extracción de $CaCO_3$ en la isla de San Andrés.

<i>Indicador</i>	<i>Cantidad</i>
Población humana en la isla de San Andrés (2004)	56,000
Personas que viven directamente de la extracción de recursos marinos ($CaCO_3$, entre otros)	15,320
Personas registradas que se dedican a la extracción de $CaCO_3$	126
Personas que extraen $CaCO_3$ con respecto a la población total (%)	0.23
Personas que extraen $CaCO_3$ con respecto a la población beneficiada por la extracción (%)	0.82
Promedio extraído aproximado por persona (kg/día)	7.5
Promedio extraído aproximado por persona (kg/año)	360
Precio promedio de $CaCO_3$ en el mercado (pesos)	1,108
Ingreso anual promedio por persona que extrae $CaCO_3$ (pesos)	398,880
Valor económico promedio anual de la actividad extractiva (pesos)	50'258,880
Presión promedio anual sobre el recurso (kilogramos)	45360
Presión promedio anual sobre el recurso (toneladas)	45.4

Fuente: Modificado de COLCIENCIAS, 2003.

La extracción de $CaCO_3$ realizada en la isla, por parte de los pescadores registrados en la corporación autónoma regional, se realiza en las jornadas cotidianas de pesca, las cuales son programadas de acuerdo con la autorización de la asociación de pescadores a la cual pertenecen (en la isla ejerce función la Asociación de Pescadores del Cove y la Asociación Central de Pescadores). Estos pescadores registrados, extraen aproximadamente en promedio para cada jornada 7.5 kg. de $CaCO_3$, actividad que realizan una vez por semana y por demanda del consumidor de carbonato.

Esta actividad genera ingresos promedio anuales de 398,880 pesos aproximadamente para cada persona. Donde es posible calcular el valor económico monetario promedio anual de la actividad extractiva, la cual depende del número de personas que realizan esta actividad, la cantidad promedio de recurso extraído por cada persona (kg) y del precio

promedio anual de cada unidad comercializada en el mercado informal del recurso. Este valor económico monetario calculado de la actividad es aproximadamente de 50'258,880 pesos.

Si se considera la presión ejercida hacia el recurso natural, es necesario incorporar el producto resultante de la cantidad de personas que realizan la actividad extractiva y el promedio anual aproximado que extrae cada uno de ellos (kg/año). La cantidad aproximada promedio anual es de 45.5 toneladas, conformando la presión extractiva anual hacia el recurso natural (*Tabla 8*).

Con respecto a la solución analítica del problema de optimización, desde la perspectiva de un planificador central, se estima la maximización del flujo de beneficios netos sociales sujeto a la función de transición o cambio ínter temporal del recurso:

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{Ac,s} \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t \left[\frac{ps_t (Ac_t)^2}{2} - C(Ac_t) \right] \\ \text{S.A: } & f(Ac_t) = \left[(s_t - (Ac_t)) + r(Ac_t) - \frac{r(Ac_t)^2}{k} \right] \end{aligned}$$

Sea: Ac – Cantidad de recurso x o $CaCO_3$ extraído ($1cm^2 \approx 10 \text{ gramos}$).

s – Cantidad del *stock* arrecifal representado en kg . de $CaCO_3$ disponible.

p – Precio del mercado por unidad de recurso extraído ($\$1,108 \approx 1,000 \text{ gramos}$).

r – Tasa intrínseca de crecimiento.

k – Capacidad de carga biológica poblacional.

$C(Ac)$ – Función de costo de extracción del recurso arrecifal.

δ – Tasa de descuento.

t – Subíndice del tiempo ($t = 0, \dots, \infty$).

El lagrangiano se expresaría:

$$L = \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t \left\{ \left[\frac{ps (Ac_t)^2}{2} - C(Ac_t) \right] + \delta \lambda_{t+1} \left[(s - (Ac_t)) + r(Ac_t) - \frac{r(Ac_t)^2}{k} - f(Ac_t) \right] \right\}$$

Las condiciones de primer orden:

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial Ac_t} &= \delta^t \left[ps_t(Ac_t) - C - \delta\lambda_{t+1} + r - \frac{2r(Ac_t)}{k} \right] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial s} &= \delta^t \left[\frac{p(Ac_t)^2}{2} + \delta\lambda_{t+1} \right] = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial [\delta\lambda_{t+1}]} &= \delta^t \left[(s_t - (Ac_t)) + r(Ac_t) - \frac{r(Ac_t)^2}{k} - f(Ac_t) \right] = 0\end{aligned}$$

Donde los óptimos obtenidos generados a partir de asumir un estado estacionario en el largo plazo, son utilizados como insumos empíricos para el método de optimización dinámica en los tratamientos de los modelos de recursos naturales:

$$\begin{aligned}s^* &= \frac{k(r - \delta)}{2r} \\ Ac^* &= \frac{k(r^2 - \delta^2)}{4r}\end{aligned}$$

V. Modelo Empírico

El siguiente análisis empírico (para el caso de estudio y partiendo del planteamiento teórico de optimalidad), considera inicialmente al arrecife de coral como un recurso renovable, por las condiciones reproductivas que presentan. Los corales tienen altas tasas de reproducción tanto de forma sexual como asexual. Liberan al medio marino gametos (esperma y óvulos) y larvas durante ciertas épocas del año que es determinado por los ciclos lunares y tendencia de corrientes y mareas oceánicas. Por otro lado, se reproducen de forma asexual de manera constante, segregando $CaCO_3$, por medio de procesos como la fisión y fragmentación; estos procesos pueden ser de carácter intrínseco de las especies o por fenómenos geofísicos ambientales.

El arrecife de coral también puede ser percibido como un recurso no renovable, como una propuesta de metodología dado la condición de fragilidad y baja resiliencia de los arrecifes coralinos. Estos organismos han existido en la tierra desde hace 2,000 millones de años, conformando y estructurando costas, playas e islas en todo el mundo. Al considerarlo como un recurso que se renueva y recupera en tasas no apreciables por el ser

humano, es posible modelar su extracción como si fuera un recurso agotable con la adaptación respectiva al recurso.

Por todo lo anterior, es necesario plantear mecanismos en el uso y extracción de los recursos arrecifales, en especial del $CaCO_3$ dado que es el recurso base del arrecife, que permitan un desarrollo sostenible económico evitando el deterioro ambiental, al constituir una alianza metodológica entre las variables socioeconómicas y biológicas del recurso natural.

5.1 Modelos estimados y equilibrios óptimos

Extracción coralina como recurso natural renovable

Cuando se realiza el análisis numérico, se establece como política de extracción óptima una explotación constante a partir de 49 mil toneladas de recurso disponible, considerando la disminución significativa inicial del recurso y teniendo en cuenta solo el beneficio generado por la extracción de *carbonato de calcio* ($CaCO_3$) del ecosistema coralino. La *figura 6*, evidencia el comportamiento de una extracción proporcional y la disminución del $CaCO_3$ disponible, donde el término “*stock*” representa al $CaCO_3$ en el medio natural y el término “*recurso*” expresa cantidades de $CaCO_3$ extraídas para la correspondiente comercialización.

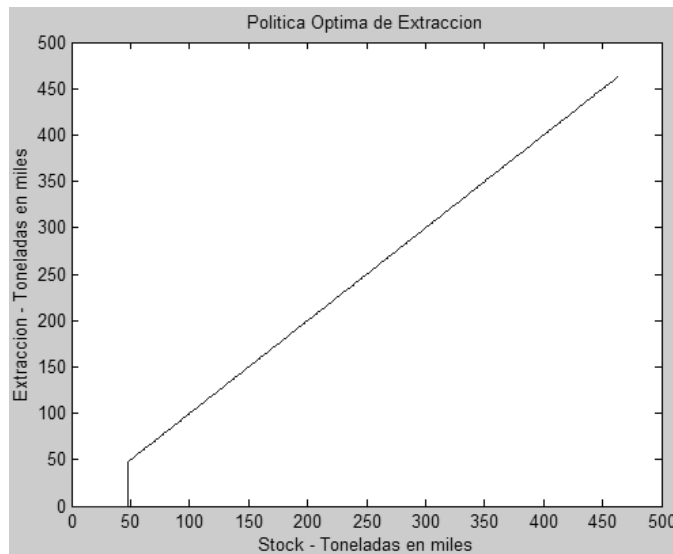


Figura 6. Extracción proporcional del recurso coralino en miles de toneladas de $CaCO_3$.

El valor óptimo generado por la ecuación de Bellman, muestra una función creciente y ascendente, donde a medida que va aumentando la cantidad del *stock* su valor aumenta de manera directa con una mayor pendiente; donde a medida que hay más *stock* disponible, los valores del mismo aumentan cada vez más (*Figura 7*).

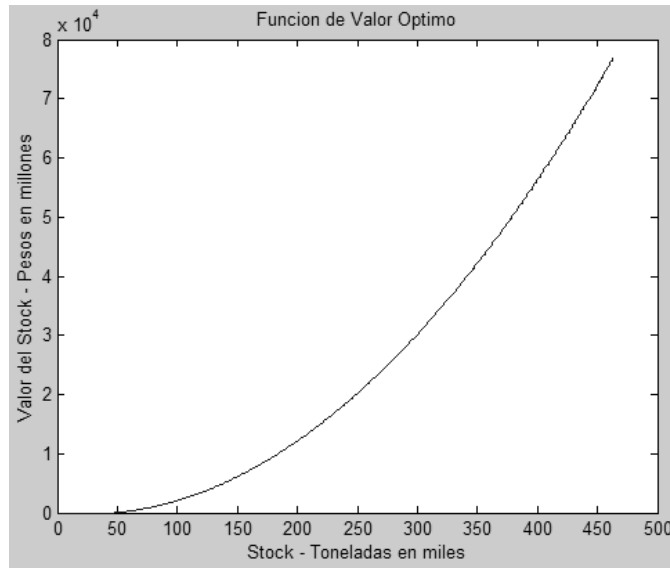


Figura 7. Función de valor óptimo en el enfoque de recurso natural renovable, generado a partir de la ecuación de valor de Bellman.

El máximo valor que puede alcanzar el recurso natural es 78,726 millones de pesos, dado por una cantidad inicial del *stock* de 464,000 toneladas representadas en $CaCO_3$, asumiendo una función de demanda, un factor de descuento ($\delta = 0.5$), una extracción constante, y una función de costos calculada que es asociada a la extracción.

Extracción coralina como recurso natural no renovable

El método utilizado para encontrar la función de valor óptimo fue la técnica de la función de aproximación, mediante la colocación de nodos. El siguiente enfoque muestra valores máximos del *stock* disponible en términos monetarios, los cuales van aumentando a medida que aumenta la cantidad de *stock* disponible en el ambiente natural. El valor del *stock* disponible aumenta a partir de las 60.5 toneladas de $CaCO_3$ disponibles.

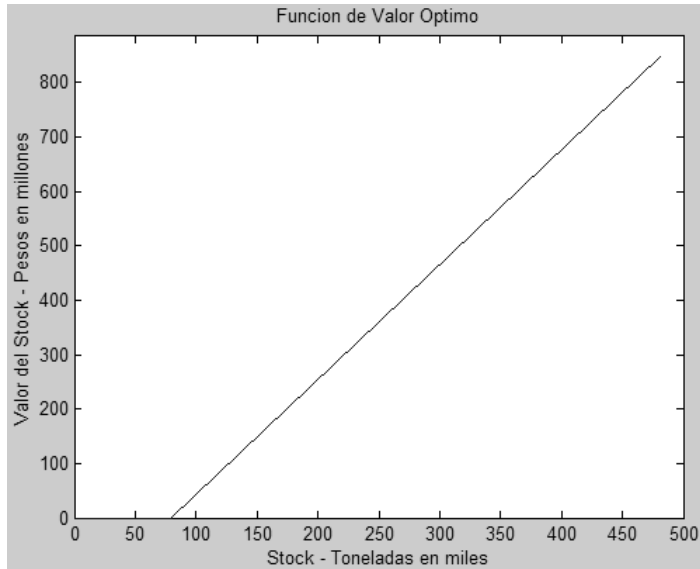


Figura 8. Función de valor óptimo en el enfoque de recurso natural no renovable, generado a partir de la ecuación de valor de Bellman.

El precio sombra ó valor marginal de una unidad adicional del recurso extraído, va fluctuando a medida que se dispone de más *stock* natural en el ecosistema, llegando a estabilizar levemente su función en las primeras 140 mil toneladas, iniciando con valores que superan los 260 millones de pesos por tonelada comercializada adicional, hasta los 50 millones de pesos por unidad adicional de recurso disponible (Figura 9).

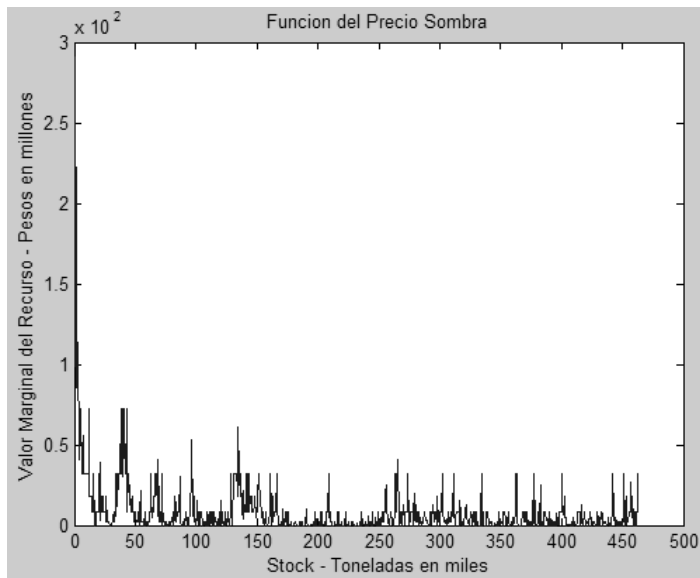


Figura 9. Comportamiento del precio sombra ó valor marginal de una unidad adicional del recurso extraído a medida que aumenta el Stock disponible.

La disponibilidad del recurso va disminuyendo a medida que se extrae el $CaCO_3$ de los corales vivos, por la condición de fragilidad ambiental del ecosistema arrecifal, donde cualquier contacto con el tejido vivo coralino destruye los órganos vitales de estos animales, deteniendo a la mínima tasa la fijación de $CaCO_3$ y la recuperación de los mismos tejidos.

5.2 Análisis de pos-óptimalidad y simulación

El siguiente análisis plantea métodos de simulación el comportamiento del *stock*, la extracción del recurso y los esperados económicos, según los supuestos parametrizados en la optimización dinámica, donde cada tratamiento implica una política específica de manejo.

Extracción coralina como recurso natural renovable

La simulación del problema se realizó para 10 años debido a la conformación dinámica de la población coralina, teniendo en cuenta la función de crecimiento del recurso natural. Al mantener una extracción proporcional del *stock* remanente, dado una cantidad inicial, se agotaría el recurso de manera sustancial al transcurso de 5 años, con un remanente en el *stock* de 97 mil toneladas (*Figura 10*).

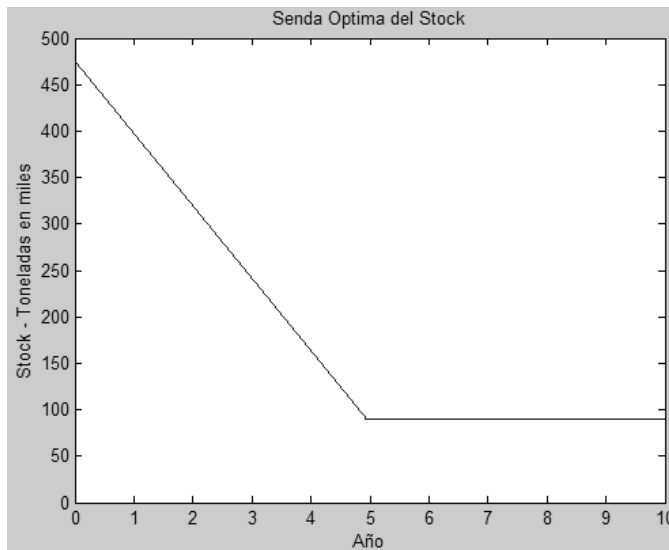


Figura 10. Simulación de la senda de extracción del recurso coralino si es realizada de manera proporcional.

La *figura 10* evidencia el agotamiento del *stock* remanente a cantidades ambientalmente mínimas de sostenimiento ecológico (97 mil toneladas), considerando el comportamiento del mercado y la recuperación del ecosistema en términos reproductivos. La senda óptima del *stock* muestra una extracción constante, donde los 5 primeros años consecutivos se estabiliza la población coralina a la cantidad ambientalmente sostenible. Este remanente alcanzado a los 5 primeros años, suministra bienes y servicios ambientales que el arrecife solo puede prestar de manera natural, sin alteraciones ambientales.

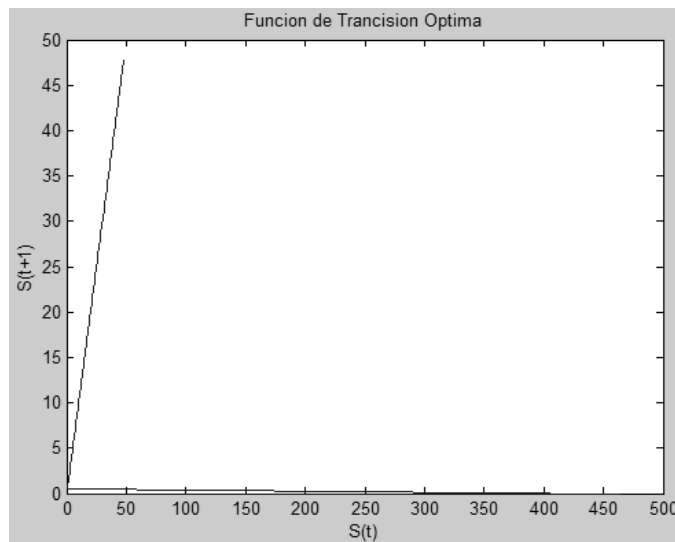


Figura 11. Simulación de la función de transición óptima para la política hipotética de extracción proporcional.

Considerando la extracción constante, el recurso se regeneraría a tasas muy lentas, mostrando una baja recuperación al siguiente periodo de tiempo, el cual es posterior al agotamiento o cantidad mínima ambiental del *stock* (*Figura 11*).

La *figura 11* muestra la disminución en el periodo inicial del recurso con respecto al periodo siguiente que se decide extraer, donde se muestra una recuperación de 47.5 toneladas de $CaCO_3$ secretado por los corales vivos que se desarrollan en su ciclo reproductivo natural en el ecosistema arrecifal. Este remanente arrecifal propuesto genera bienes y servicios únicos que solo puede brindar en su sucesión biológica natural sin intervención humana.

Extracción coralina como recurso natural no renovable

Mediante la simulación extendida a 100 años, considerando la baja recuperación del ecosistema arrecifal, se demuestra que la política óptima de reducir y establecer la extracción del recurso a 60.5 toneladas constantes anuales (*Figura 12*), asegura la permanencia del recurso en general, incorporando el flujo de todos los bienes y servicios que prestaría el arrecife de coral en un futuro.

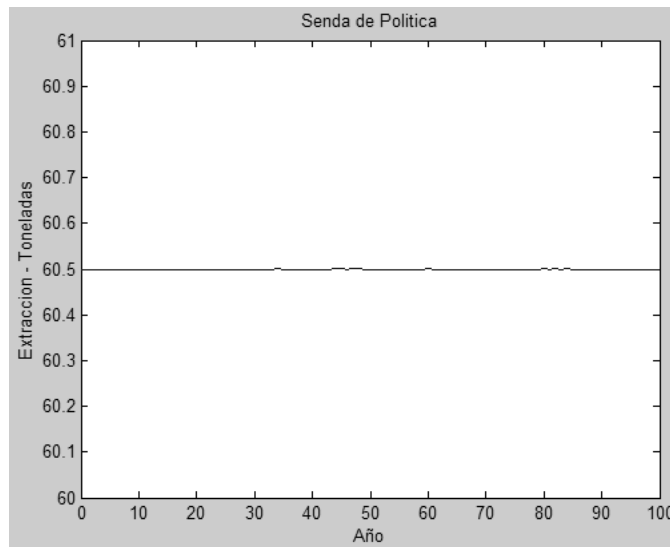


Figura 12. Simulación de la senda de extracción del recurso coralino al largo plazo.

Al adoptar la política de extracción constante (60.5 toneladas), se disminuiría la cantidad de *stock* disponible hasta considerar un remanente ambiental que mantenga en condiciones mínimas óptimas el equilibrio ecológico del ecosistema, donde los primeros 10 años habrían 450 mil toneladas de $CaCO_3$ disponibles, evidenciando la forma decreciente de las cantidades de recurso disponible a medida que transcurre el tiempo. Al final del período simulado, se pueden mostrar las 192 mil toneladas que generan ese remanente prístino natural que le da soporte ecológico al ecosistema (*Figura 13*).

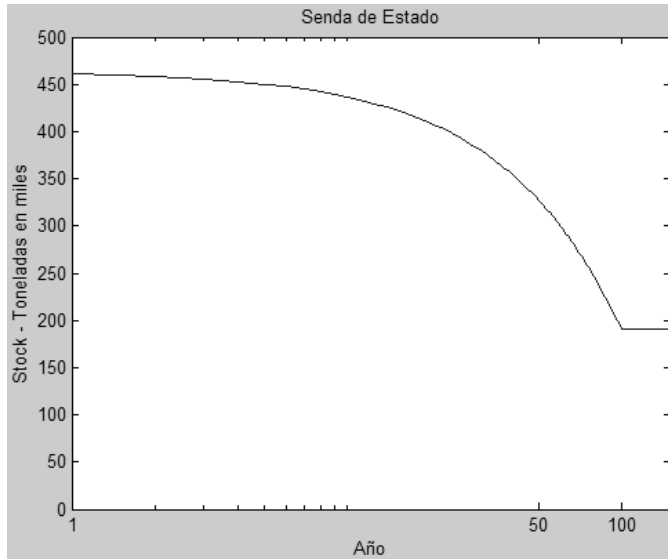


Figura 13. Simulación de la senda de Stock disponible del recurso coralino si es iguala cero la extracción en el largo plazo.

VI Conclusiones

- La población biológica coralina en la isla de San Andrés, presenta tasas de crecimiento ($0.23 \text{ cm}^2/\text{año}$), muy similares a otros sitios del Caribe; ajustando su función de crecimiento a una forma funcional cuadrática, se puede concluir que en condiciones favorables es posible mantener de forma óptima, más de 6,050 colonias coralinas en términos biológicos, ecológicos y ambientales.
- El *stock* inicial corresponde a un área calculada total del arrecife de 46.4 km^2 , correspondiente a la terraza arrecifal de sotavento. Esta cantidad de recurso disponible equivale a $4.64 \times 10^9 \text{ kg}$ de CaCO_3 , según la conversión equivalente biológica ($1 \text{ cm}^2 \approx 10 \text{ gramos}$). Por el precio promedio anual en el mercado informal del recurso ($1,108 \approx 1,000 \text{ gramcs}$), se puede calcular el monto comercial en dinero del recurso extraído de la población biológica coralina o CaCO_3 a comercializar, el cual equivale a 5.1 billones de pesos aproximadamente.
- El análisis dinámico permite evidenciar la tendencia en el largo plazo del proceso económico controlado, donde hay un equilibrio entre las decisiones tomadas y la evolución natural del recurso en el crecimiento poblacional del mismo, en otras palabras, se puede decir que en el largo plazo se extrae la cantidad que es

reincorporada de forma natural por el ecosistema, si este es considerado como recurso renovable.

- El análisis de simulación, bajo el enfoque de renovación, demuestra que una extracción proporcional del recurso disminuye el *stock* disponible al quinto año, hasta llegar a 97 mil toneladas; cantidad ambientalmente óptima como área mínima natural que estabiliza el ecosistema.
- El planteamiento de recurso no renovable simula una política de extracción constante extendida por 100 años. Al considerar la baja recuperación del ecosistema arrecifal, se evidencia que la política óptima sería mantener la extracción del recurso a 60.5 toneladas anuales (consideración de cota en la extracción).
- La extracción actual del recurso natural es 45.4 de toneladas promedio anual, cantidad menor a la propuesta en el enfoque de no renovación (60.5 toneladas promedio anual); por lo anterior, se puede concluir que en la isla de San Andrés no se ejerce presión adversa en el proceso de extracción del recurso natural.
- Bajo el supuesto teórico de no renovación, la explotación del recurso arrecifal en el largo plazo propone que se debe abandonar cuando el *stock* coralino llega a cantidades ecológicas mínimas en términos de cantidades mínimas óptimas ambientales (192 mil toneladas) o s^* .
- Los datos de carácter socioeconómico del presente trabajo no permiten realizar cálculos exactos en las estimaciones porque incorpora promedios anuales aproximados, donde es necesario ser cauto en la interpretación de los resultados.

VII Recomendaciones

- Para realizar un análisis bioeconómico de un recurso natural, es necesario establecer la dinámica poblacional biológica, en caso de un recurso renovable, o conocer el *stock* inicial y remanente si se trata de un recurso no renovable; con el fin de aplicar la política de manejo más apropiada.
- Es recomendable generar una extensa base de datos económicos, si es posible una serie de tiempo de varios periodos consecutivos, caracterizando la continuidad y

homogeneidad en la frecuencia temporal de los mismos, que relacionen diversas variables descriptivas de las actividades económicas.

- La recomendación a la figura del planificador central, es generar planes eficientes para el manejo ambiental de los ecosistemas marinos, que permitan diagnosticar los impactos ambientales y proponer soluciones a los mismos.
- Es necesario recomendar para las investigaciones venideras del mismo patrón, un análisis de los problemas que enfrentan los recursos naturales de manera conjunta, holística y sistemática, como intentó hacerlo el presente trabajo, el cual es una herramienta sencilla, básica y pionera para este tipo de análisis ecosistémico.

Referencias bibliográficas

ALMADA, P., SALE, P., GOLD, E. y KJEREVE, B. (2003). Métodos seleccionados para el monitoreo de parámetros físicos y biológicos para el sistema arrecifal mesoamericano (SAM). Coastal resources multi-complex building, Belice City.

BELL, F. W. (1972). Technological externalities and common-property resources: an empirical study of the U.S. northern lobster fishery. *Journal of Political Economy*, 80; 148-58.

BERACHI, I.G. (2003). Bioeconomic analysis of artisanal marine fisheries of tanzania (Mainland). Master of Science in International Fisheries Management, Department of Economics, Norwegian College of Fishery Science University of Tromsø, Norway.

BERCK, P. (1995). Empirical consequences of the Hotelling principle. *The handbook of environmental economics*, Oxford, Blackwell.

CESAR, H. (1996). Economic analysis of Indonesian coral reefs. Environment department work in progress, Indonesia.

CESAR, H. (2002). The biodiversity benefits of coral reef ecosystems: Values and markets. Cesar Environmental Economics Consulting, Amsterdam.

CESAR, H. and CHONG, C.K. (2000). Economic Valuation and Socioeconomics of Coral Reefs: Methodological Issues and Three Case Studies. Economic Valuation and Policy Priorities for Sustainable Management of Coral Reefs. WorldFish Center, Indonesia.

CESAR, H, LUNDIN, C.G, BETTENCOURT, S and DIXON, J. (1997). Indonesian Coral Reefs—An Economic Analysis of a Precious but Threatened Resource. *Ambio*, 26(6): 345–350.

COLCIENCIAS (2003). Agenda prospectiva de ciencia y tecnología para el departamento archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Gobernación de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

CONNELL, J.H. (1978). Diversity in tropical rain forest and coral reefs. *Science*, 199: 1302-1310.

CONRAD, J.M. (1999). *Resource Economics*. Cambridge University Press.

DÍAZ, J.M. (2000). Áreas Coralinas de Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Invemar. Santa Marta.

DÍAZ, J.M., BARRIOS, L.M Y GARZÓN, J. (2001). Las Formaciones Coralinas de Colombia: Cuánto, dónde y cómo. Colacmar IX Congreso. San Andrés.

DÍAZ, J. M; DÍAZ–PULIDO, J.; GEISTER, J.; GARZÓN-FERREIRA, J.; SÁNCHEZ, A. Y ZEA, S. (1996). Atlas de los Arrecifes Coralinos del Caribe Colombiano. Invemar. Santa Marta.

DÍAZ, J. M; GARZÓN-FERREIRA, J Y ZEA, S. (1995). Los Arrecifes Coralinos de San Andrés. Estado Actual, Perspectiva para su Conservación. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. San Andrés.

FABRES, B. (2002). Policy issues and Caribbean coral reefs: Surfing in the perfect storm. *World Fish Center*, Indonesia.

FERNANDES, L., RIDGLEY, M.A. and VANTHOF, T. (1999). Multiple criteria analysis integrates economic, ecological and social objectives for coral reefs managers. *Coral Reefs*, 18: 393-402.

GARZON, J., REYES, M. y RODRÍGUEZ, A. (2002). Manual de métodos del SIMAC. Sistema nacional de monitoreo de arrecifes coralinos en Colombia, Invemar, Santa Marta.

GEISTER, J. (1973). Los Arrecifes de la Isla de San Andrés. Mitt. *Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas*, Santa Marta. 7(1): 211-228.

GEISTER, J. AND DÍAZ, J.M. (1997). A field guide to the oceanic barrier reefs and atolls of the southwestern Caribbean (Archipiélago of San Andres and Providencia, Colombia). Proc. 8th Int. Coral reef Sym. Invemar, Santa Marta.

GUSTAVSON, K. and HUBER, R.M. (2001). Ecological economic decision support modelling for the integrated coastal zone management of coral reefs. World Bank Research Committee, USA.

HOOTEN, A.J. and HATZIOLOS, M.E. (1995). Sustainable financing mechanisms for coral reef conservation. Held at The World Bank. Environmentally Sustainable Development Proceedings Series No. 9. Washington.

HUGHES, R. (1989). A Functional Biology of Clonal Animals. College of North Wales. Bangor.

JENNINGS, S. and POLUNIN, N.C. (1996). Impacts of fishing on tropical reefs ecosystems. *Ambio*, 25:1, 44-49.

JUDGE, G., HILL, R., GRIFFITHS, W., LUTKEPOHL, H. and LEE, T. (1998). Introduction to the theory and practice of econometrics. Second Edition, John Wiley and Sons, New York.

MIRANDA, M., and FACKLER, P. (2002). Applied Computational Economics and Finance. MIT press.

NGAZY, Z., N. JIDDAWI and CESAR, H. (2003). Coral bleaching and the demand for coral reefs: A marine recreation case in Zanzibar. WorldFish Center. Economic Valuation and Policy Priorities for Sustainable Management of Coral Reefs. 118–125.

PEZZEY, J.C, ROBERTS, C.M. and URDAL, B.T. (2000), A simple bioeconomic model of a marine reserve. *Ecological Economics*, 33: 77-91.

RAMÍREZ, A. (1999). Ecología Aplicada. Diseño y Análisis Estadístico. U.J.T.L. Bogotá.

REES, W.E. (2003). Economic development and environmental protection: An ecological economics perspective. *Environmental monitoring and assessment*, 86(2): 29-45.

REEF CHECK (2004). Guía de monitoreo de arrecifes coralinos de *Reef Check*. Institute of the environmental, University of California at Los Angeles, Los Angeles.

ROGERS, C., GARRISON, G., GROBER, R., HILLIS, Z. and FRANKE, M. (1994). Coral reef monitoring manual for the Caribbean and western Atlantic. National park service, Virgin Island National Park.

SANCHIRICO, J.N. and WILEN, J.E. (2001). A bioeconomic model of marine reserve creation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 42: 257-276.

SCHAEFER, M. B. (1954). Some aspects of the dynamics of populations important to

the management of commercial marine fisheries. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin, 1: 27-56.

SPURGEON, J. (1992). The economic valuation of coral reefs. *Marine Pollution Bulletin*, 24(11): 529-536.

SPURGEON, J. (2001). Valuation of coral reefs: The next ten years. Economic Valuation and Policy Priorities for Sustainable Management of Coral Reef an International Consultative Workshop, Malaysia.

TORRES, C., and RAMIREZ, A. (2006). Demographic aspects of the coralline specie *Porites astreoides* in the Leeward Terrace Reef of San Andrés Island (Colombian Caribbean). *Revista Ciencias Marinas*. Instituto de ciencias oceanográficas. UABC. Baja California. México. En edición.

VERON, J. (2000). Corals of the World. Mary Stanfford-Smith, Scientific Editor and Producer. Australian Institute of Marine Science. 3 volumes.

WHITTINGHAM, E.; CAMPBELL, J. and TOWNSLEY, P. (2003). Poverty and reefs. A global overview and case studies. DFID-IMM-IOC/UNESCO, Paris.

ZEA, S.; GEISTER, J.; GARZÓN-FERREIRA, J. AND DÍAZ, J.M. (1998). Biotic changes in the reef complex of San Andres Island (Southeastern Caribbean Sea, Colombia) occurring over nearly three decades. *Atoll Research Bulletin*. National Museum Of Natural History Smithsonian Institution. Washington,

ANEXOS

Anexo 1. Descripción de estructura en las estaciones muestreadas.

Tabla 9. Estaciones de muestreo en la Terraza Arrecifal de Sotavento (TAS) ubicadas en el occidente de la isla de San Andrés.

Estación	Profundidad (Pies)	Cobertura coralina aproximada (%)	Cobertura aproximada de la población coralina (%)	Observaciones
Bajo Bonito	38	55	8	Punto extremo del norte de la TAS, se caracteriza por su alta y evidente conservación ecosistémica
Plaza de Toros	40	40	5	Se caracteriza por ser una gran estructura coralina arrecifal con un parche de arena circular en el centro de la constitución coralina
Reaage Nest	51	15	1	Sitio de fuerte corriente debido a la ubicación de un canal de arena submarino que encamina la fuerza oceánica de las corrientes del nor-orient
La Virgen	32	40	3	Antiguo botadero de basuras sólidas de la Isla, pero en la actualidad es el sitio de vertimiento de aguas hervidas o de desecho humano que por fuerza de corrientes se esparce por los arrecifes y demás ecosistemas marinos del sur-occidente
El Faro	16	20	4	
Barco Hundido zona Norte	50	45	5	Se caracteriza por fragmentarse en dos grandes parches de corales mixtos divididos por un sector arenoso donde reposa un navío naufragado
Barco Hundido zona Sur	48	55	7	
El Velerito	38	60	3	Este sitio se caracteriza por presentar una pequeña embarcación naufragada colonizada por escleractineos juveniles, algas y algunas esponjas
West View	15	25	7	
La Iguana	38	30	5	
La Piscinita	42	40	3	
Nirvana	12	30	5	
West Point	55	60	2	Este es el punto extremo ubicado en el sur de la TAS, siendo el sitio donde termina esta unidad geomorfológica dando paso a los cantiles abismales del sur de la Isla

Fuente: Autor.

La anterior tabla muestra la descripción de cada estación de muestreo, en términos de profundidad, cobertura de la comunidad coralina, cobertura de la población coralina estudiada (*Porites astreoides*) y algunas observaciones ambientales de cada punto.

Anexo 2. Figuras descriptivas de la metodología en la compilación de datos biológicos.

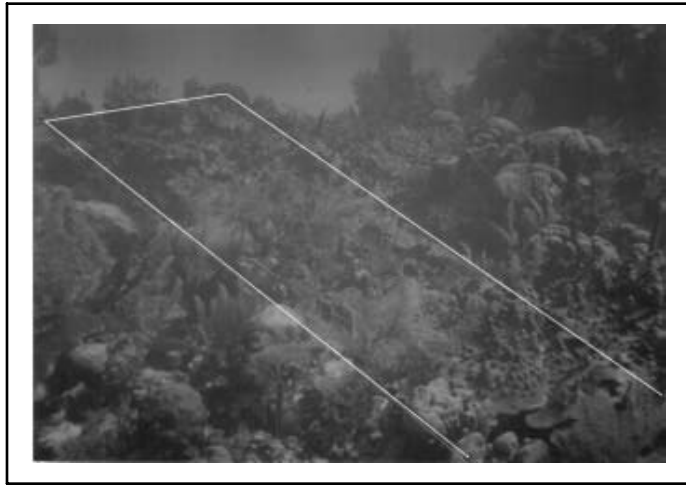


Figura 14. Parcela de muestreo de 10m x 1m. Nótese la cuerda que delimita la parcela (Foto: Autor. Terraza arrecifal de sotavento, San Andrés).



Figura 15. Ubicación de la parcela de muestreo de 10m x 1m. Se puede observar la cuerda y la utilización del equipo Scuba (Foto: Autor. Terraza arrecifal de sotavento, San Andrés).

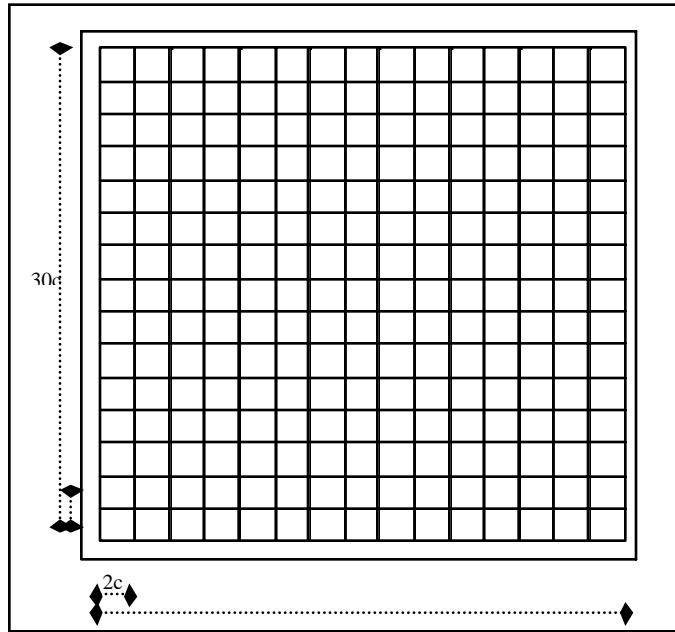


Figura 16. Cuadrante de madera utilizado para el muestreo de 30 centímetros de largo por 30 centímetros de ancho, con divisiones cada 2 centímetros a lo largo y a lo ancho con un área total de 900 cm². Herramienta de medida exacta para determinar el tamaño de las colonias (cm²), la mortalidad parcial (cm²) y las enfermedades blancas (cm²).

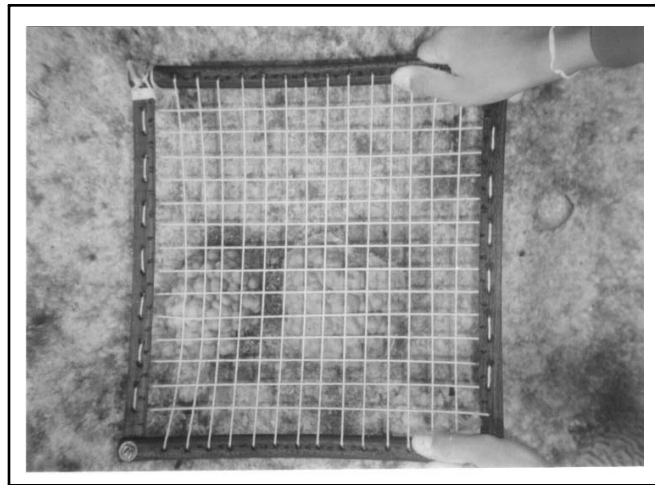


Figura 17. Cuadrante de madera utilizado para el muestreo de 30 centímetros de largo por 30 centímetros de ancho, con divisiones cada 2 centímetros a lo largo y a lo ancho con un área total de 900 cm² (Foto: Autor. Terraza arrecifal de sotavento, San Andrés).

Anexo 3. Análisis econométrico de las funciones biológicas de crecimiento.

La población coralina de la isla de San Andrés presenta la siguiente función en la tasa de crecimiento anual ($\text{cm}^2/\text{año}$) según la profundidad (pies) en la cual se evidencia un aporte positivo en el crecimiento por medio del siguiente modelo estimado (Tabla 6):

Tasa de crecimiento:

$$Gr = -3.1653 + 0.0185(Pf) - 2.15 \times 10^{-4}(Pf^2)$$

$$(0.000) \quad (0.239) \quad (0.171) \quad F_c : 332.20; \quad R_{Aj.}^2 : 0.6469$$

Asumiendo una función de cuadrática; $f(Gr) = 0.0185(Pf) - \frac{0.0185(Pf^2)}{86.22}$

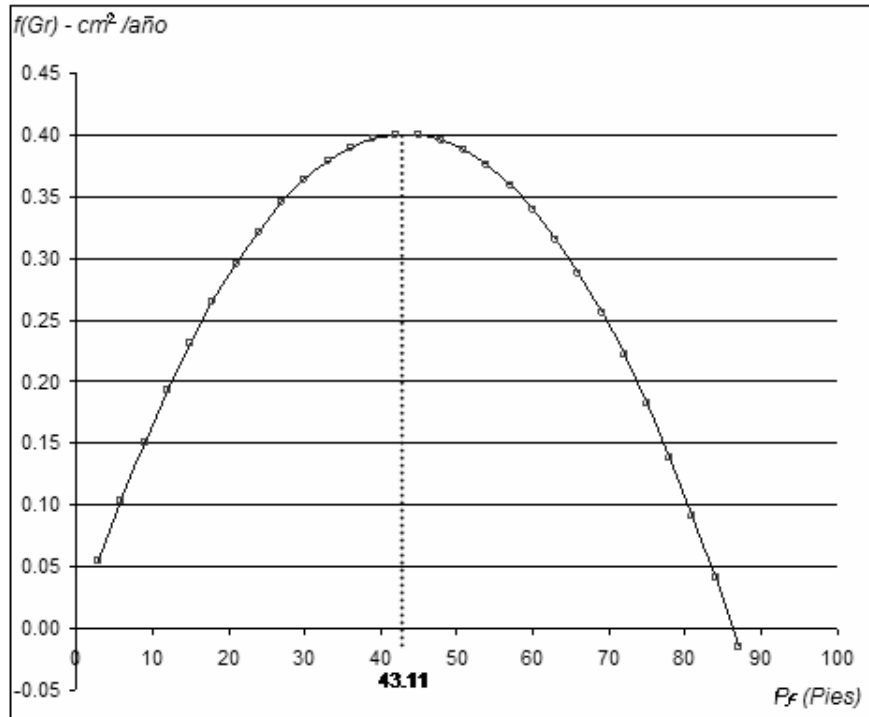


Figura 18. Relación entre la tasa de crecimiento y la profundidad de asentamiento de las colonias coralinas en la zona muestreada de la isla de San Andrés.