

# **BRAZILIAN JOURNAL OF ECOLOGY** **REVISTA BRASILEIRA DE ECOLOGIA**

## **Publication of the Ecology Society of Brazil**

**Editores:** Dr<sup>a</sup> Edisa Ferreira Inocência Nascimento  
Dr<sup>a</sup> Mutue Toyota Fujii

### **Colectivo de Autores:**

A. José Areces Mallea – Departamento de Oceanografia,  
Universidade Federal de Pernambuco  
Av. Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, 50.670-901 Recife, PE, Brasil.

Adilma L.M. Concentino – Departamento de Oceanografia,  
Universidade Federal de Pernambuco  
Av. Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, 50.670-901 Recife, PE, Brasil.

Thiago N.V. Reis – Departamento de Oceanografia,  
Universidade Federal de Pernambuco  
Av. Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, 50.670-901 Recife, PE, Brasil.

Edson R.T.P.P. Vasconcelos – Departamento de Oceanografia,  
Universidade Federal de Pernambuco  
Av. Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, 50.670-901 Recife, PE, Brasil.

Nathália C. Guimarães-Barros – Departamento de Oceanografia,  
Universidade Federal de Pernambuco  
Av. Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, 50.670-901 Recife, PE, Brasil.

Mutue T. Fujii – Núcleo de Pesquisa em Ficologia,  
Instituto de Botânica,  
Av. Miguel Estéfano, 3687, 04301-902 São Paulo, SP, Brasil.  
mutue.fujii@pq.cnpq.br

### **Mailing Address**

Departamento de Ecologia  
Rua do Matão, Travessa 14 no. 321. CEP.: 05508-900.  
Cidade Universitária – São Paulo, SP.  
Phone: (11) 3091 7600  
e-mail: contato@seb-ecologia.org.br  
site: www.seb-ecologia.org.br

## FICHA CATOLOGRÁFICA

Brazilian Journal of Ecology  
Revista Brasileira de Ecologia  
Volume Especial.  
Las Macroalgas como Bioindicadoras  
de Calidad Ambiental y Cambios Climáticos.  
Guía Práctica

Vol. 01      Ano 17 – 2015  
São Paulo, SP. Ecology Society of Brazil  
(Sociedade de Ecologia do Brasil).  
V/:il; 25 cm

Anual  
2015, I

II. Ecologia I. Sociedade de Ecologia do Brasil

**BRAZILIAN JOURNAL OF ECOLOGY**  
**A publication on the**  
**ECOLOGY SOCIETY OF BRAZIL**  
**SOCIEDADE DE ECOLOGIA DO BRASIL**

**BOARD**

**PRESIDENT**

Dr. Welington Braz Carvalho Delitti – IB/USP

**VICE PRESIDENT**

Dra. Karla Conceição Pereira – APTA/SP

**1st SECRETARY**

Dra. Débora Fernandes Calheiros – Embrapa Pantanal/UFMT

**2st SECRETARY**

Dr. Vladimir Stolzenberg Torres –

**1ST TREASURER**

Dra. Edisa Ferreira Inocência Nascimento – IB/USP

**2ST TREASURER**

Dr. Júlio Cesar Voltolini – UNITAU

**CONSELHO FISCAL**

Dra. Solange Ikeda Castrillon UNEMAT-

Dr. Josué Ribeiro da Silva Nunes - UNEMAT

Dra. Marisa Dantas Bitencourt – IB/USP

Dra. Fátima Aparecida da Silva Iocca - UNEMAT

Dra Vânia Regina Pivelo – IB/USP

Dr. Marcelo Dutra da Silva - FURG

**CONSELHO CONSULTIVO**

Ms. Valdemiro Lopes Marinho - UNEB

Dra. Alexandra Penedo de Pinho - UFMG

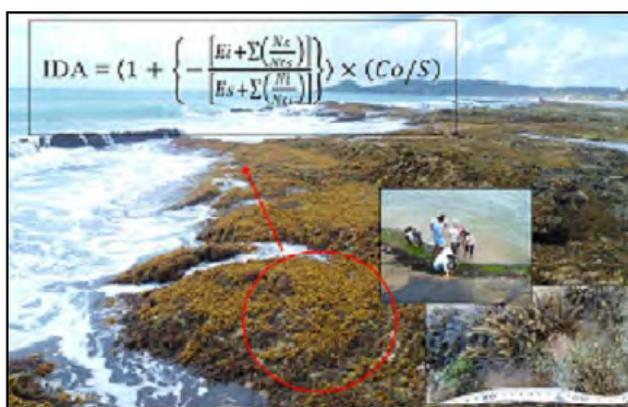
Dra. Patrícia Cristina Silva Leme – USP

Dra. Solange Aparecida Arrolho da Silva - UNEMAT

Dra. Carla Soraia Soares de Castro - UFPB

Dr. Victor Eduardo Lima Ranieri - EESC/USP

# Las Macroalgas como Bioindicadoras de Calidad Ambiental y Cambios Climáticos. Guía Práctica



**Laboratorio de Macroalgas  
Departamento de Oceanografia  
Universidade Federal de Pernambuco**

## Colectivo de Autores:

- A. José Areces Mallea – Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco – Recife, PE
- Adilma L.M. Concentino – Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco – Recife, PE
- Thiago N.V. Reis – Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco – Recife, PE
- Edson R.T.P.P. Vasconcelos – Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco – Recife, PE
- Nathália C. Guimarães-Barros – Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco – Recife, PE
- Mutue T. Fujii – Núcleo de Pesquisa em Ficologia, Instituto de Botânica, São Paulo, SP

## TABLA DE CONTENIDO

<b>A MODO DE INTRODUCCIÓN.</b> .....	6
<b>I. ASPECTOS GENERALES</b> .....	6
1. Principios básicos a tomar en cuenta para el uso de una categoría biológica en la diagnosis ambiental. ....	6
2. Las escalas de organización biológica: ventajas y limitaciones de uso en la bioindicación y el monitoreo de calidad ambiental. ....	7
<b>II. EL MACROFITOBENTOS COMO HERRAMIENTA DE TRABAJO</b> .....	12
1. Características fisioecológicas generales. ....	12
2. Premisas para su empleo en evaluaciones de calidad ambiental.....	13
3. Definición de objetivos.....	14
<b>III. MAXIMIZANDO LA REPRESENTATIVIDAD</b> .....	16
1. Esfuerzo muestral.....	16
2. El hábitat como unidad espacial de comparación.....	31
<b>IV. INDICADORES E ÍNDICES</b> .....	39
1. Aspectos generales .....	39
2. Documentación de disturbios mediante la elaboración de mapas de sensibilidad .....	41
3. Evaluación de la severidad ambiental y los cambios climáticos mediante el uso del macrofitocobentos.....	44
3.1 Base legal e historia reciente.....	45
<b>V. AGRADECIMIENTOS</b> .....	53
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	53

## A MODO DE INTRODUCCIÓN.

La panorámica que se ofrece al lector a continuación acerca del empleo de las macroalgas como herramienta en el diagnóstico ambiental no pretende ser ni exhaustiva ni una camisa de fuerza metodológica. De cada uno de los tópicos que se exponen someramente existe ya en la actualidad una cuantiosa información que puede ser consultada en revistas y publicaciones especializadas. Surgida la idea a partir de la compilación llevada a cabo para la preparación de un minicurso impartido en el XIV Congreso de Ficología de Brasil, los autores solo pretenden hacer énfasis en aquellos aspectos que no deben soslayarse y compartir la experiencia ganada a partir de investigaciones y prospecciones de campo realizadas en los últimos años en colaboración con investigadores de centros científicos como el Instituto de Botánica de San Pablo, Brasil, o el Instituto de Oceanología de Cuba. Sirva pues, esta exposición solo como acicate para la búsqueda de alternativas y el desarrollo de la bioindicación haciendo uso a escala comunitaria o ecosistémica de una de las categorías biológicas más interesantes por su conexidad ambiental.

### I. ASPECTOS GENERALES.

#### I. 1 Principios básicos a tomar en cuenta para el uso de una categoría biológica en la diagnosis ambiental.

Hoy se reconoce que la contaminación constituye una situación ambiental con marcada incidencia en los organismos, por lo cual un monitoreo de naturaleza solo físico-química no puede describir la amplia gama de impactos que estos procesos ocasionan. Los tensores que actúan como consecuencia de la contaminación, inciden de manera directa a nivel individual pero pueden reconocerse en cualquier escala biológica. A diferencia del plancton, cuyas respuestas solo son detectadas cuando son agudas o más rápidas que los procesos de advección circundantes, los organismos sésiles, debido a su restringida movilidad, resumen la historia ambiental prevaleciente en el lugar.

Mediante la bioindicación las respuestas de cualquier sistema biológico ante un tensor ambiental se utilizan para evaluar la acción del tensor o para planear acciones de monitoreo o correctivas. Los bioindicadores más usados son aquellos mediante los cuales pueden distinguirse consecuencias antrópicas de oscilaciones naturales y se dividen en indicadores sensibles, cuando expresan una respuesta bien diferenciada del comportamiento normal o acumuladores, cuando incrementan concentraciones o efectos sin mostrar daños reconocibles en un corto espacio de tiempo. Los bioindicadores pueden ser especies, grupos de especies o comunidades. La interpretación de los impactos y consecuencias de la contaminación sobre el medio dependerá del nivel trófico del organismo seleccionado como bioindicador ya que mientras más bajo este sea los efectos se dimensionarán más a nivel ecosistémico.

En la nomenclatura empleada para clasificar a las especies indicadoras se consideran como detectores a aquellos organismos que concurren naturalmente y responden a un tensor de manera medible, exploradores cuando la reacción al disturbio es positiva y favorece su competitividad, organismos testigo aquellos usados en condiciones de laboratorio para contrastar concentraciones o condiciones deletéreas según metodologías muy formalizadas de resultados reproducibles y monitores de calidad ambiental, tanto activos como pasivos. Los primeros son especies utilizadas para controlar condiciones ambientales de acuerdo con protocolos bien establecidos de introducción *in situ* y

evaluación posterior; las segundas aquellas que se colectan directamente del medio para ser analizadas en el laboratorio.

Para que una especie tenga utilidad en la diagnosis ambiental debe cumplir con las siguientes características:

- Alta conectividad con el medio abiótico
- Valencia ecológica estrecha

El conjunto de condiciones ambientales que permite que una especie o individuo sobreviva se denomina “valencia ecológica” y se dice que en cualquier sitio donde la especie sea observada los conflictos con el ambiente que la rodea no son limitativos (101). El grado de estenotopía puede constituir un buen criterio para seleccionar una especie indicadora. De hecho, una especie indicadora ideal de contaminación sería aquella con características estenotópicas y distribución ceñida al ambiente contaminado (29). Las especies indicadoras por lo general solo funcionan como biomonitores de calidad ambiental en un contexto regional.

El uso de una especie como bioindicadora entraña el conocimiento acerca de las peculiaridades que esta posee para ser utilizada en la medición de una manera matemáticamente significativa de cualquier tensor ambiental seleccionado. Con este fin ha debido explorarse toda su gama de respuestas potenciales, las que pueden oscilar desde una desaparición o multiplicación, cambios metabólicos o de composición evidentes, hasta la acumulación de elementos o sustancias de manera proporcional o no a la concentración ambiental prevaleciente. Conocida la respuesta, así como la distribución geográfica de la especie, cuando esta respuesta se asocia directamente a perturbaciones de la calidad ambiental el organismo suele denominarse especie centinela y sirve como un indicador de conservación ecosistémico (103).

## **I. 2 Las escalas de organización biológica: ventajas y limitaciones de uso en la bioindicación y el monitoreo de calidad ambiental.**

La respuesta ante un trastorno ambiental se expresará de manera diferente de acuerdo a su naturaleza, a las características del modelo empleado y al nivel de organización biológica que atañe. Desde un punto de vista bioquímico, el disturbio puede afectar la integridad del DNA, la expresión de alelos enzimáticos, la concentración de metabolitos secundarios o provocar alteraciones del metabolismo intermediario. A escala celular pueden documentarse cambios en los potenciales de membrana y su permeabilidad, y modificaciones tanto del retículo endoplasmático como de diferentes organelos. A nivel fisiológico, los disturbios provocan variaciones de la absorción de nutrientes, de la regulación osmótica y de las tasas de respiración y síntesis de materia orgánica que se reflejan, tratándose de individuos, en cambios del ritmo de crecimiento, del potencial reproductor y de la adaptabilidad de los mismos al medio circundante. Cuando la escala es poblacional, se expresan en variaciones de biomasa, del tamaño de las clases y cohortes de la población y de su tasa de reclutamiento. A escala comunitaria los cambios pueden evidenciarse en transformaciones de la dominancia, del tipo de distribución espacial de los grupos focales, de los patrones de zonación (Fig. 1), estratificación y sucesión estacional, así como de la información contenida en el sistema, la cual suele expresarse en índices  $\alpha$ ,  $\beta$  ó  $\Gamma$  de biodiversidad. Los plazos de respuesta dependerán del modelo seleccionado y oscilarán entre respuestas muy rápidas como la alteración en el potencial de membrana o del equilibrio Gibbs-Donnan y lentas como las transformaciones de la estructura y función comunitaria a nivel ecosistémico.

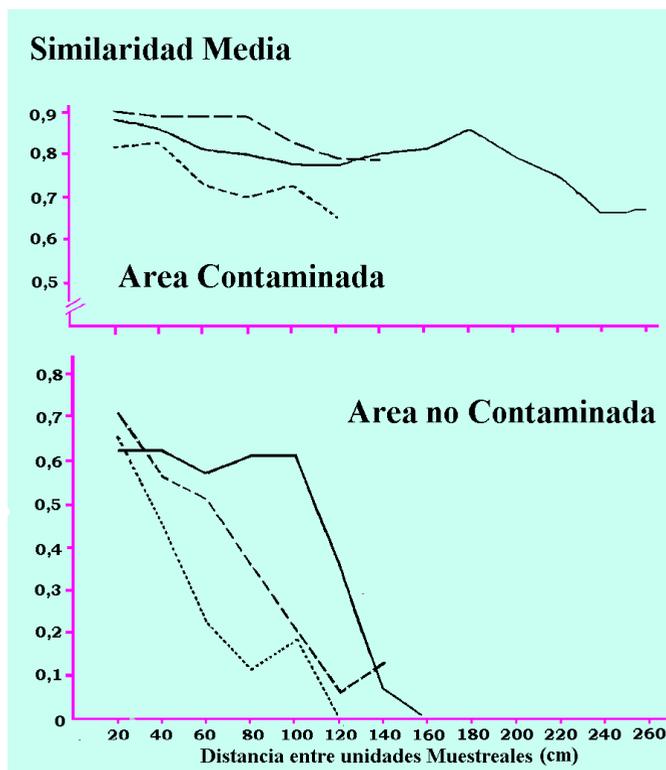


Fig. 1 Pérdida del patrón de zonación de la comunidad algar en el piso mesolitoral a causa de la eutrofización. Área contaminada correspondiente a la Caleta de San Lázaro, en las inmediaciones de la bahía de La Habana, Cuba. Área no contaminada en Santa Cruz del Norte, 45 km al E de la bahía. Índice de similitud de Kulczynski (26). Adaptado de Areces y Toledo, (9).

El acervo teórico acumulado por el hombre en los últimos 50 años sobre la organización biológica de mayor complejidad, el ecosistema ha permitido establecer regularidades y pautas en su evolución (Tabla I) que permiten emplearlas como criterio cuando la diagnosis ambiental se efectúa a esta escala de organización biológica. Todo proceso de intervención humana provoca cambios estructurales, simplifica los nexos y las relaciones entre los componentes del sistema y varía significativamente las rutas en los flujos de materia y energía, lo cual altera los plazos adaptativos y la recuperación de sus integrantes, que cuando son dominantes o especies ingenieras y muy sensibles a los cambios provocados, comprometen la resiliencia del sistema dando lugar a transformaciones irreversibles. El enfoque holístico aplicado en el análisis a diferentes escalas espaciales de un ecosistema constituye la manera óptima de estudiar sus características globales y evaluar a las transformaciones que este ha experimentado con respecto a un estado inicial de referencia, que lamentablemente muchas veces es imposible de conocer a causa de la velocidad actual que tienen los procesos de asimilación socioeconómica de los espacios naturales. Dicho enfoque puede llevarse a cabo de una manera estructural o funcional. Cuando este enfoque se expresa funcionalmente, el análisis de redes ecológicas (ARE) resulta una de las mejores alternativas para la descripción y la comparación espacio-temporal de distintos ecosistemas (15) y para ello suelen utilizarse programas como CTA (137), NETWRK (136), ECOPATH (33), Análisis de Redes Ambientales (54) o WAND (4).

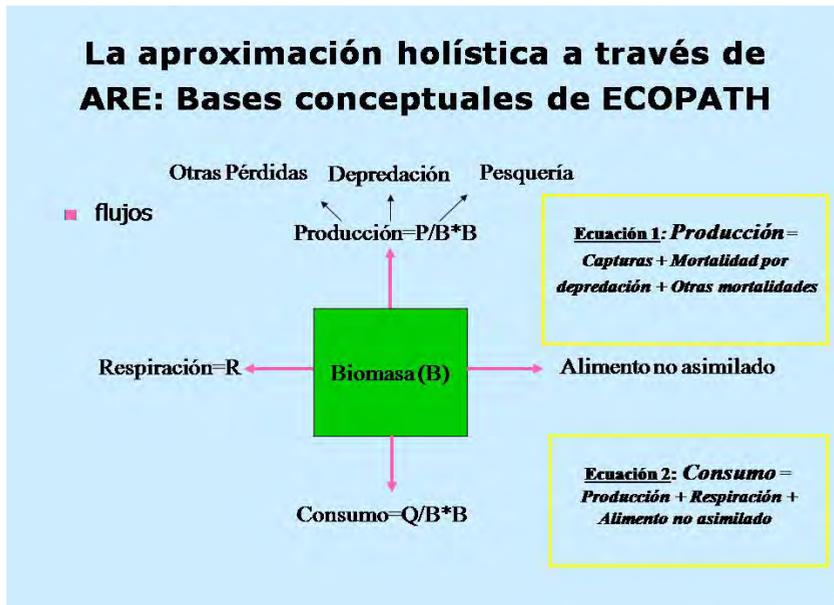


Fig. 2 ECOPATH constituye uno de los programas más utilizados para el análisis multiespecífico de pesquerías. El detrito y la biomasa generada por fanerógamas y algas planctónicas y bentónicas conforman la base de la pirámide trófica modelada.

Cuando dicho enfoque se basa en peculiaridades estructurales, los datos de campo se clasifican en conjuntos de especies y categorías de hábitats (65), mediante el empleo de técnicas multivariadas, el uso de estimadores de distancia ecológica como los índices de similitud o disimilitud, y el análisis de la diversidad, por lo general  $\alpha$  ó  $\beta$ , asumiéndose casi siempre que cada elemento considerado es igualmente diferente (90).

El acelerado avance en los últimos 10 años de la informatización tecnológica (creación de bancos electrónicos de datos de gran capacidad, la digitalización a gran escala de información, el uso masivo de la web para su difusión y búsqueda, así como el acceso público a bases de datos de carácter incluso global), ha revolucionado la manera en que la información sobre biodiversidad puede ser utilizada. Hoy en día es posible disponer de registros con más de  $10^4$  datos (77) y el análisis puede ser efectuado a resoluciones de  $10^2$  km<sup>2</sup> o menores (113) en espacios de  $10^5$  o más km<sup>2</sup>. La combinación de reportes de ocurrencia de especies con información electrónica sobre las características ecológicas del paisaje, permite estimar los nichos ecológicos fundamentales mediante la búsqueda de asociaciones no aleatorias entre ambos elementos (123). Con este fin pueden utilizarse programas como GARP (Algoritmo Genético para la Predicción Normada; 114). Ello ha dado lugar a un campo emergente denominado *Biodiversidad Informática* (130; Fig. 3), cuyas dos premisas para su desarrollo han sido el rápido avance de la teledetección (Fig.4) y la incorporación de los sistemas de información geográficos (SIG) como procedimiento de rutina en el tratamiento de la información espacial (Fig. 5).

Tabla 1. **Madurez Ecosistémica. Tendencias esperadas en el desarrollo de los ecosistemas (según Odum, 1969).**

<b>Atributos ecosistémicos</b>	<b>En fase de desarrollo</b>	<b>En etapas maduras</b>	<b>Expresiones funcionales (ARE: ECOPATH)</b>
<b>Energéticos</b>			
1. Producción bruta/Respiración comunitaria (razón P/R)	Mayor o menor que 1	Se aproxima a 1	Razón P/R
2. Producción bruta/Biomasa neta/Biomasa (razón P/B)	Alta	Baja	Razón P/B
3. Biomasa/Flujo de energía (razón B/E)	Baja	Alta	Razón B/E
4. Producción neta comunitaria ("yield")	Alta	Baja	Prod. neta comunit.
5. Cadenas alimentarias	Lineares, básicamente ramoneo	de Trama, básicamente detritus	Conectancia, Índice de Omnivoría
<b>Estructurales</b>			
6. Materia orgánica total	Pequeña	Grande	Biomasa del sistema
7. Nutrientes inorgánicos	Extrabioticos	Intrabioticos	
8. Diversidad específica-Variedad de componentes	Baja	Alta	
9. Diversidad específica-Equitabilidad	Baja	Alta	
10. Diversidad bioquímica	Baja	Alta	
11. Estratificación y heterogeneidad espacial (patrones de organización de la diversidad)	Pobre	Bien organizado	
<b>Historias de Vida</b>			
12. Especialización de nicho	Amplia	Estrecha	Índice de Omnivoría
13. Tamaño de los organismos	Pequeño	Grande	B/P
14. Ciclos de vida	Cortos, simples	Largos, complejos	B/P
<b>Reciclaje de Nutrientes</b>			
15. Ciclos de minerales	Abiertos	Cerrados	Índice de Reciclaje
16. Tasa de intercambio de nutrientes entre organismos y su medio	Rápida	Lenta	
17. Papel del detrito en la regeneración de nutrientes	Poco importante	Importante	Flujo de/al detrito
<b>Presión de Selección</b>			
18. Formas de crecimiento	Para crecimiento rápido ('r-selection)	Para control retroalimentado ('K-selection)	B/P
19. Producción	Cantidad	Calidad	Homeostasis global
20. Simbiosis interna	Poco desarrollada	Desarrollada	
21. Conservación de nutrientes	Pobre	Buena	Índice de Reciclaje
22. Estabilidad (resistencia a perturbaciones externas)	Pobre	Buena	"Overhead"
23. Entropía	Alta	Baja	Resp./Biom.
24. Información	Baja	Alta	"Flow Info."

**Adaptado de:** Christensen *et al.* 2000.



Fig. 3 Los avances tecnológicos de la informatización en los últimos diez años, particularmente en lo que concierne a la cantidad, variedad y resolución de datos electrónicos espacialmente explícitos empleados para describir el ambiente, han revolucionado la forma en que puede procesarse la información sobre biodiversidad.

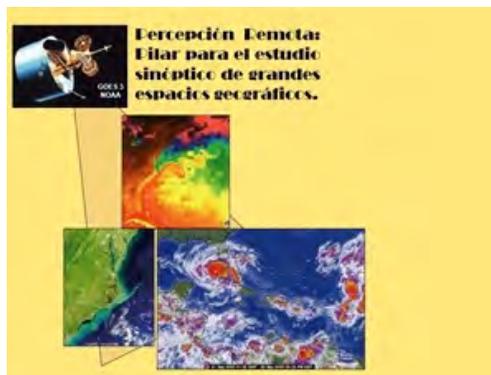


Fig. 4 El empleo de cámaras multispectrales colocadas en órbitas geoestacionarias y de barrido permite documentar cambios espacio-temporales de la temperatura, la clorofila, el vapor de agua, las corrientes y los elementos morfológicos existentes en fondos someros.



Fig. 5 La inclusión en un SIG de los resultados del tratamiento de imágenes satelitarias posibilita su análisis relacional y favorece la comparación a cualquier escala espacio-temporal. Golfo de Batabanó, plataforma SW del archipiélago cubano.

Ello ha permitido acceder al estudio de los patrones de distribución espacial de la biodiversidad en variadas escalas de trabajo, e inferir de una manera relativamente rápida sobre la calidad ambiental existente en estos espacios geográficos a partir del registro cartográfico de sus hábitats y de los cambios que estos experimentan en cuanto a naturaleza, extensión y configuración.

## II. EL MACROFITOBENTOS COMO HERRAMIENTA DE TRABAJO.

### II. 1 Características fisioecológicas generales.

Las algas poseen como característica común la formación de materia orgánica y la liberación de oxígeno a través del proceso de fotosíntesis, dando lugar aproximadamente al 40 % de la producción primaria del planeta y a casi el 100 % de la producción autotrófica existente en ecosistemas marinos. Sus características esenciales son en general las siguientes:

- Pueden considerarse organismos con estrategias fisioecológicas de adaptación basadas en la optimización de los procesos de síntesis proteica.
- Poseen gran habilidad para reorientar numerosas rutas metabólicas en dependencia de los factores ambientales y el estado fisiológico del organismo.
- Intensidades lumínicas muy altas, o un déficit prolongado de N en el medio pueden aumentar la síntesis de sustancias de reserva (carbohidratos o lípidos) en adición a la formación de proteínas esenciales.
- Las variaciones en la intensidad de los dos procesos anteriores como respuesta a cambios ambientales modifica la composición química de su materia orgánica, en particular de la denominada razón de REDFIELD (C:N:P), que se asume para organismos autótrofos unicelulares del medio marino como 100:16:1
- En las algas el crecimiento no es balanceado y las limitaciones de temperatura e iluminación tienden a desacoplarlo de la tasa de absorción de nutrientes como el N. En las algas superiores al menos, el crecimiento y la absorción de nutrientes no están sincronizados.
- Existe una relación significativa entre la tasa de crecimiento y la concentración interna de nutrientes. La *concentración crítica de un nutriente* es aquella que permite a la planta una tasa de crecimiento máxima bajo una condición dada. A concentraciones inferiores comienzan a aparecer, bajo dicha condición, signos limitativos. La *concentración de subsistencia* es aquella a partir de la cual se detiene el crecimiento.

Los organismos autótrofos propios del medio marino han desplegado respuestas adaptativas del sistema de absorción y fijación del C, originadas por la presión selectiva derivada de condiciones ambientales tales como:

- Una mayor concentración de ión bicarbonato con relación al anhídrido carbónico.
- Disponibilidad con frecuencia muy baja de Cinorgánico.
- Alta capacidad tampón del medio circundante.
- Ambiente hidrodinámico favorable para la excreción de metabolitos.
- Cambios pronunciados de la intensidad lumínica, a diferentes escalas de tiempo por efecto del oleaje, la difracción superficial, las mareas o el dosel vegetal.
- Acceso directo a los nutrientes presentes en el medio y mayor posibilidad de uso de los nitratos en el proceso fotosintético.

- Intercambio gaseoso ocasionalmente mínimo, con un consiguiente aumento del potencial oxidante causado por la limitada difusión del oxígeno generado en el tejido fotosintético.

De estas respuestas adaptativas derivan las particularidades siguientes:

- Baja sensibilidad del proceso de absorción del  $\text{CO}_2$  a cambios en la presión parcial del  $\text{O}_2$ , i. e. mayor independencia con respecto a la fotorespiración.
- Inducción a causa de cambios de PH u otros factores del medio, de sistemas complementarios de concentración y almacenaje basados en los iones  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ .
- Uso alternativo de fuentes diferentes de Cinorgánico por disponibilidad de diversos sistemas de concentración.

De ahí que, con independencia del nivel de complejidad que ostenten o el lugar que ocupan en la escala de desarrollo, los integrantes de la ficoflora expresen una elevada conexidad con el medio que las rodea y generen una amplia gama de respuestas ante literalmente cualquier cambio ambiental. Al constituir los primeros peldaños de la trama trófica, tienen importancia adicional por representar la interfase entre las comunidades biológicas restantes y el ambiente físico-químico en el cual subsisten. Transfieren además, a toda la trama trófica, metales pesados y compuestos orgánicos de vida media elevada afectándola también cuando los herbívoros no disponen de su biomasa. Estas características determinan que sean de gran utilidad para documentar alteraciones ambientales a cualquier nivel de organización biológica.

La amplia gama de respuestas que ofrecen las macroalgas (Fig. 6), ha permitido usarlas como biomonitores de compuestos tóxicos y elementos traza (31; 69), calidad ambiental (24; 53; 131; 70), e incluso para modelar las variaciones en biomasa de diferentes grupos funcionales ante cambios en la severidad ambiental (19). Hoy su empleo se ha generalizado en el estudio de procesos de eutrofización (85; 37), y para analizar la tendencia evolutiva de diversos ecosistemas marinos (62; 41).

## II. 2 Premisas para su empleo en evaluaciones de calidad ambiental.

A pesar de su reconocida importancia como monitor de calidad ambiental, el uso de la ficoflora requiere de normas metodológicas preestablecidas de acuerdo a los fines de la investigación, a la rapidez y operatividad requerida y a la extensión geográfica del levantamiento. En el hecho inciden cuatro peculiaridades del fitobentos que hay que tomar en cuenta:

- Inexistencia de una discontinuidad natural entre el macro y el microfítobentos.
- Imposibilidad en numerosas ocasiones de laborar con individuos o unidades discretas.
- Estratificación, por lo general marcada de la comunidad algar.
- Elevada complejidad taxonómica de muchos grupos en el ámbito específico.



Fig. 6 Las macroalgas se utilizan con numerosos propósitos en estudios de calidad ambiental y han sido incorporadas a protocolos estandarizados de algunas agencias ambientales .

Estas particularidades hacen conveniente definir de antemano los siguientes aspectos con el fin de simplificar la colecta, acelerar el procesamiento de la información y minimizar la influencia de la experticia del equipo de trabajo en el resultado final:

- Categorías a tener en cuenta (morfo-funcionales o taxonómicas).
- Tamaño mínimo estipulado (discernible o no al ojo desnudo).
- Naturaleza del registro (biomasa, densidad, frecuencia de ocurrencia o cobertura).
- Carácter del muestreo (destrutivo o no).
- Nivel taxonómico a considerar (específico, genérico, de familia u orden).

En la elección del protocolo de trabajo no solo deben tenerse en cuenta estos aspectos. Es necesario precisar también los objetivos de trabajo ya que los mismos determinarán las características del muestreo y los métodos de procesamiento numérico que deben aplicarse con posterioridad (Fig. 7).

### II.3 Definición de Objetivos

Cuando los inventarios florísticos se utilizan para estudios fitogeográficos o con vista al empleo de índices de riqueza, diversidad y similitud que faciliten la ubicación de lugares únicos en el ecosistema por la cantidad o tipo de información que contienen, es necesario un esfuerzo muestral que asegure la inclusión en la colecta del mayor número posible de las especies presentes en los hábitats más representativos y en todos los distintivos o singulares existentes en el lugar de estudio. En este caso resulta conveniente efectuar un análisis taxonómico del material colectado que permita segregarlo o diferenciarlo de una manera detallada. La estrategia será entonces aplicar un esfuerzo muestral que asegure la inclusión de la mayor cantidad posible de especies raras para describirlas hasta el menor nivel taxonómico posible. Obviamente, si se trabaja con modelos biológicos o en escalas de organización inferiores a la comunitaria debe nominarse con todo rigor el objeto de estudio.

Sin embargo, si lo que se pretende es una evaluación de calidad ambiental, la búsqueda de interrupciones y gradientes provocados por cambios en las relaciones de dominancia del macrofitobentos pueden ser suficientes a dicho fin ya que permiten asociar (cuando se conocen los requerimientos ecológicos de las especies predominantes), la unidad espacial evaluada a una calidad ambiental determinada. En este caso no es necesario inventariar hasta un nivel específico la ficoflora existente.

Aunque ha sido sugerido que en estudios acerca de variaciones espacio-temporales a pequeña escala resulta conveniente considerar comparaciones entre hábitats e identificaciones a nivel específico (104), el concepto de *Suficiencia Taxonómica* (TS; 51) ha recibido atención en los últimos años, postulándose que la clasificación taxonómica solo es requerida hasta aquel nivel donde puedan detectarse respuestas a escala comunitaria (142; 143). Al menos en algunos phyla y tipos de hábitats, se ha documentado bien que la pérdida de información taxonómica no impide a niveles supraespecíficos la detección de efectos provocados por la contaminación o por modificaciones ambientales (106; 25; 42; 18). En las macroalgas en particular, (17) trabajando a nivel genérico, demostraron que la cuantificación de abundancias puede resultar hasta un 97% equivalente en cuanto a rangos de similitudes entre muestras con relación al nivel específico.

OBJETIVOS	MÉTODOS EMPLEADOS	ESFUERZO MUESTREAL
Inventarios Florísticos	Índices de Diversidad, Riqueza y Equitatividad	Máximo Optimizado: registro de especies raras o de la "cola"
Biogeografía	Índices de Diversidad ( $\alpha, \beta, \gamma$ ), Distancia y Similaridad e Indicadores Biogeográficos	
Sistemática & Taxonomía	Cladística; Análisis Multivariado	
Dinámica Comunitaria	Análisis Multivariado; Modelación	
Representatividad Taxonómica	Biodiversidad Informática (IDE+GIS+Teledetección) (GARP)	
Detección de Gradientes de Calidad o "Salud" Ambiental	Índices de Calidad; Cartografía, GIS	Regulado: registro de especies dominantes e ingenieras
Tipificación de Hábitats	Análisis Multivariado	Regulado: registro de especies dominantes
Análisis Trófico	Redes Tróficas (CTA, NETWRK, ECOPATH, WAND)	

Fig. 7 La necesidad de racionalizar tiempo y recursos determina que el trabajo de campo, si esta bien diseñado, se conforme a partir de los objetivos de la investigación o el servicio.

El uso de grupos morfofuncionales constituye otra alternativa en el tratamiento de la ficoflora. Se asume que la formación de grupos polifiléticos solo asociados a una estructura anatómica determinada así como a potenciales específicos con respecto a la productividad y a la resistencia ante disturbios (siendo ambos potenciales considerados independientes entre si) y cuya abundancia dependerá de la biomasa somática, sirve para reflejar condiciones ecológicas particulares (134). De acuerdo con esta apreciación y con el fin de eliminar el "ruido" ambiental ocasionado por la variabilidad natural, Konar y Iken, (84) recomiendan el uso tanto de grupos morfofuncionales como de niveles taxonómicos supraespecíficos para la detección de impactos ambientales

mediante las macroalgas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la pérdida de información y la falta de uniformidad en los resultados que puede conllevar el empleo de categorías no estandarizadas. Además, la tolerancia ante un tensor no implica necesariamente requerimientos ecológicos similares entre los integrantes del grupo, lo cual pudiera restringir el alcance de la investigación, particularmente cuando se evalúan gradientes de disturbios físicos, ante los cuales el uso de grupos morfofuncionales ha resultado menos efectivo en la detección de diferencias que el método tradicional basado en la identificación de especies (115). En este caso, quizás una alternativa mejor resulte considerar la sugerencia de Padilla y Allen (110) acerca de efectuar el agrupamiento a partir de atributos fisioecológicos y no tanto morfológicos.

Con las dos aproximaciones es factible optimizar el esfuerzo muestral mediante un compromiso entre rapidez, superficie inventariada y tipo de procesamiento. La información una vez compilada se transforma con frecuencia a partir de algún índice apropiado en un valor numérico, al efecto de ser transcrita a cartografía georeferenciada mediante el empleo de Sistemas de Información Geográficos.

### **III. MAXIMIZANDO LA REPRESENTATIVIDAD**

La representatividad de los datos obtenidos (asumida como la correspondencia existente entre la organización real del entorno natural y su reflejo cognoscitivo), siempre requiere ser asegurada en aras de hacer aceptable cualquier evaluación ambiental. Dos elementos esenciales intervienen en la representatividad: el tipo y características del esfuerzo muestral, que de ser bien diseñado posibilitará obtener datos certeros con respecto a la naturaleza del sitio de estudio, y la verosimilitud intrínseca en la comparación de estos datos con otros extraídos de entornos espaciales considerados de referencia por su calidad ambiental.

#### **III 1. Esfuerzo muestral**

La colecta de información resulta una fase crucial en la investigación o uso de cualquier categoría biológica como herramienta de trabajo y sus requerimientos variarán en consonancia con los objetivos esperados. Una vez realizada, los elementos reales, propiedades o fenómenos naturales de nuestro objeto de estudio se transforman en una población de valores abstractos representados por números después de un proceso de conceptualización mediante el cual definimos las “variables” o atributos que serán medidos. Esta acción de colecta es conocida como muestreo y debe efectuarse de manera tal que se minimice la incertidumbre inherente a la toma de datos, asociada por lo general a errores experimentales y pre-acondicionamientos mentales. Los resultados obtenidos con cualquier método de muestreo siempre serán sesgados. De ahí que se recomiende la complementación entre diferentes técnicas de muestreo (20).

La transformación de la observación biológica a un dato, por lo general numérico, es el proceso inicial en cualquier investigación y requiere de un conocimiento profundo del problema, de modo que se tenga un espacio análogo al “real” en el que se pueda manipular matemáticamente el dato acorde a sus propiedades intrínsecas. Para que el estimado obtenido no este sesgado y pueda cumplir los supuestos implícitos en la mayoría de las pruebas paramétricas, la colecta de los datos debe ser efectuada de modo tal que estos tengan errores independientes normalmente distribuidos, homogeneidad en la variación de los errores entre grupos y aditividad de efectos (66).

Cuando se trabaja a escala de asociaciones o en niveles superiores de organización biológica, es importante tener en cuenta que la distribución de especies de acuerdo a la cantidad de individuos, biomasa o cobertura muestra un comportamiento semejante en una gran cantidad de comunidades diferentes, comportamiento que podría resumirse en la aseveración de que en su gran mayoría estas suelen ser raras. El hecho fue ya reconocido por Darwin en 1859 en su obra *Origen de las Especies* cuando postuló que: “*rarity is the attribute of vast numbers of species in all classes...*”. El término Abundancia Relativa de una especie define cuán común o escasa esta resulta con respecto a las restantes en una localidad o comunidad determinada. Junto a la Riqueza (S) describe atributos esenciales de la biodiversidad y suele asociarse a niveles tróficos o a categorías específicas de elementos biológicos. Uno de los primeros intentos de representar matemáticamente la relación entre número de especies (S) y número de individuos por especie (N) fue efectuado por Fisher *et al.*, (1943). La serie logarítmica que dichos autores propusieron para describir esta relación constituye una distribución de probabilidad discreta derivada de las series de McLaurin (Distribución de Taylor centrada en el cero). Puede expresarse de dos maneras diferentes (Fig. 8) y toma la siguiente forma:  $\alpha x$ ,  $\alpha x^2/2$ ,  $\alpha x^3/3, \dots, \alpha x^n/n$ , siendo S = la cantidad de especies con abundancia n y x = una constante positiva que deriva del conjunto de datos de la muestra, y cuyo valor, aunque se aproxima generalmente a 1 oscila entre ( $0 < x < 1$ ). No obstante, las evidencias han demostrado que conjuntos con gran número de elementos provenientes de colectas intensivas se aproximan en realidad a una distribución Log-Normal. Preston (1948) argumentó que la distribución de abundancias de las especies se rige de manera gaussiana como resultado del *Teorema del Límite Central*, ya que con muestras de tamaño pequeño, la serie logarítmica y la distribución Log-Normal Truncada no pueden distinguirse entre sí. De este modo la asimetría hacia la derecha observada en los histogramas de abundancia relativa puede deberse a un artefacto del muestreo. En dependencia del tamaño de la muestra, la denominada “*Línea encubierta de Preston*” (equivalente a la posición en el histograma a partir de la cual las especies raras dejarían de ser muestreadas) se alejará más hacia la izquierda a medida que se vayan incorporando más especies poco representadas como consecuencia de mayores esfuerzos muestrales (Fig. 9).

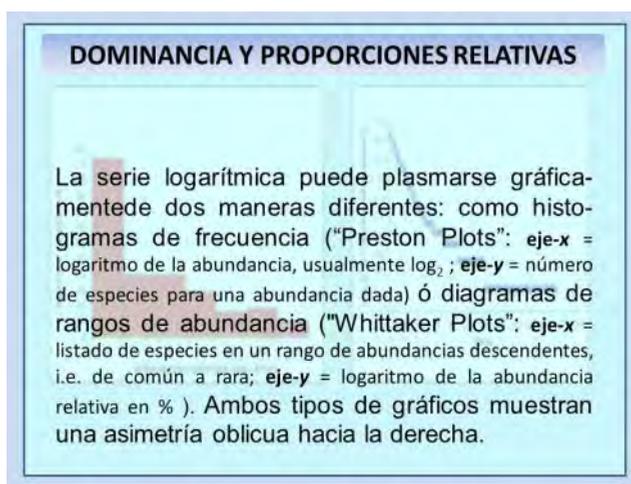


Fig. 8 Tanto en histogramas de frecuencia como en rangos de abundancia se hace ostensible que la mayor cantidad de especies son raras o están escasamente representadas.

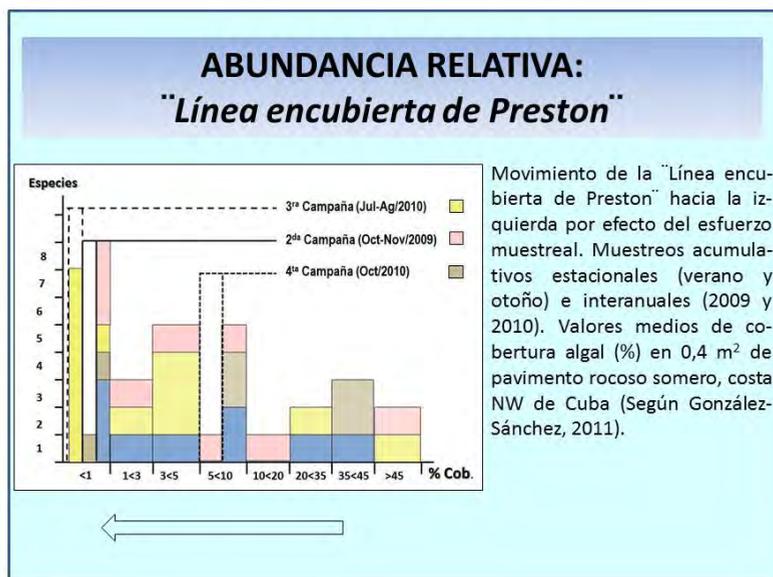


Fig. 9 El número de especies raras en un conjunto dependerá del esfuerzo muestral y a medida que este se incrementa, aumentará la representación de especies de escaso número.

Las consecuencias de este fenómeno son notorias en cuanto a la representatividad. El número de muestras requerido para registrar con una precisión dada a la densidad, cobertura o biomasa de una especie dependerá de su abundancia así como de la distribución espacial de sus integrantes (Fig. 10). A los efectos del muestreo dicho número también será influido por el tamaño de la unidad muestral.

El incremento en el número de especies a medida que aumenta el área muestral es otra de las pocas leyes de la ecología (121). Reconocido el hecho por de Candolle (1855) y Jaccard (1901; 1908), la ley se formalizó bajo la denominación: *Curva Especies-Área* (11; 58; 27; 98). Constituye una de las mediciones primordiales en el estudio de los patrones espaciales de cualquier comunidad, y se pueden definir no menos de seis tipos diferentes de curvas de acuerdo al arreglo de las unidades muestrales (Fig. 11), si son o no espacialmente explícitas y a la medición usada para construir la curva. Aunque se ha debatido durante mucho tiempo cual es la mejor función matemática para representar el contorno de este tipo de curva, se suelen considerar con mayor frecuencia tres expresiones diferentes (120; Fig. 12). En líneas generales, tanto la distribución de individuos por especie como la relación de estas con el área donde habitan se utilizan para optimizar a diversas escalas de organización biológica el esfuerzo muestral, ya sea cuando estudiamos la riqueza de especies existente en un sitio determinado (Fig. 13), o comparamos distintas comunidades (Fig. 14). Si pretendemos en particular describir con una adecuada precisión la abundancia relativa de sus miembros, se aplican para ello diversas formulaciones (Fig. 15).

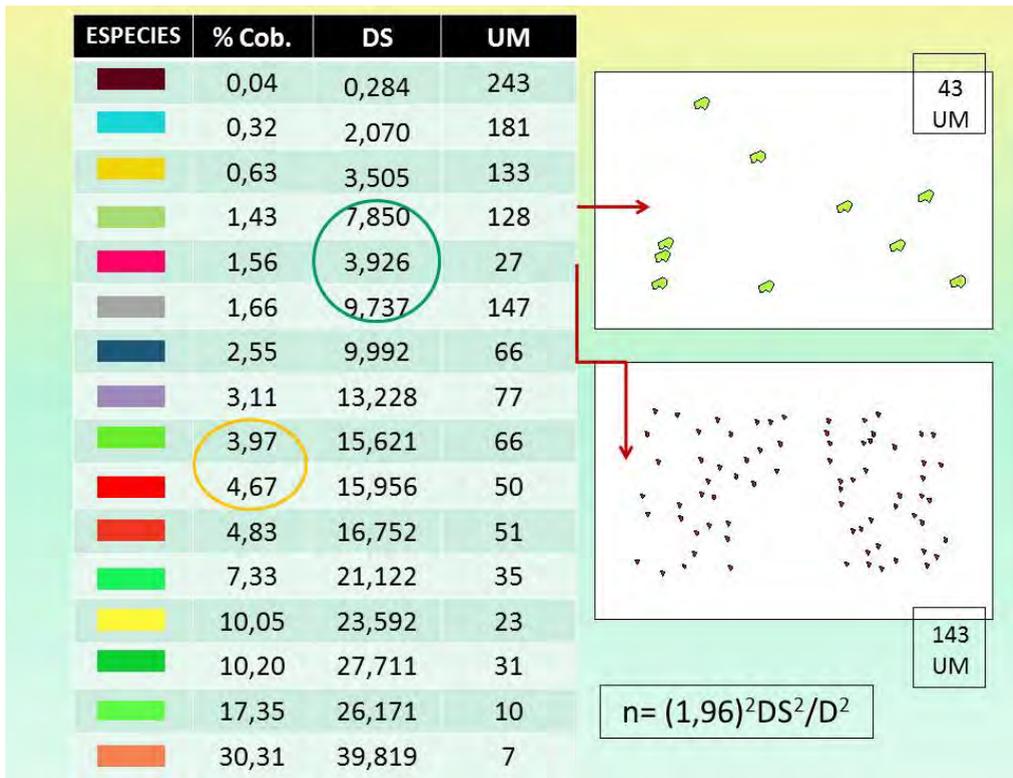


Fig. 10 Simulación de un manto algal parcelado en 680 unidades muestrales con un total de 16 especies distribuidas de acuerdo a una relación Log-Normal truncada y porcentos de coberturas comprendidos entre 0,04 y 30,31. Nótese como influye el valor de cobertura (% Cob.) y la desviación estándar (DS) sobre la cantidad de unidades muestrales (UM) requeridas para registrar la cobertura de la especie con una precisión dada (D), que en el ejemplo fue de 0,95 en relación a su valor "real". Aún con coberturas casi equivalentes, a medida que aumenta el número de UM que contienen la especie y su distribución se hace mas uniforme disminuyen la DS y el número de muestras necesarias (n). El valor de cobertura también incidirá sobre dicho número, incluso con DS casi semejantes.

La manipulación matemática de los datos requiere también del conocimiento de su naturaleza en cuanto a las limitaciones y propiedades que poseen las diferentes escalas de variables y sus posibilidades con respecto al uso de estadígrafos y la aplicación de procedimientos de inferencia estadística.

Existen cuatro escalas numéricas:

- Nominales
- Ordinales
- Intervalo
- Razón

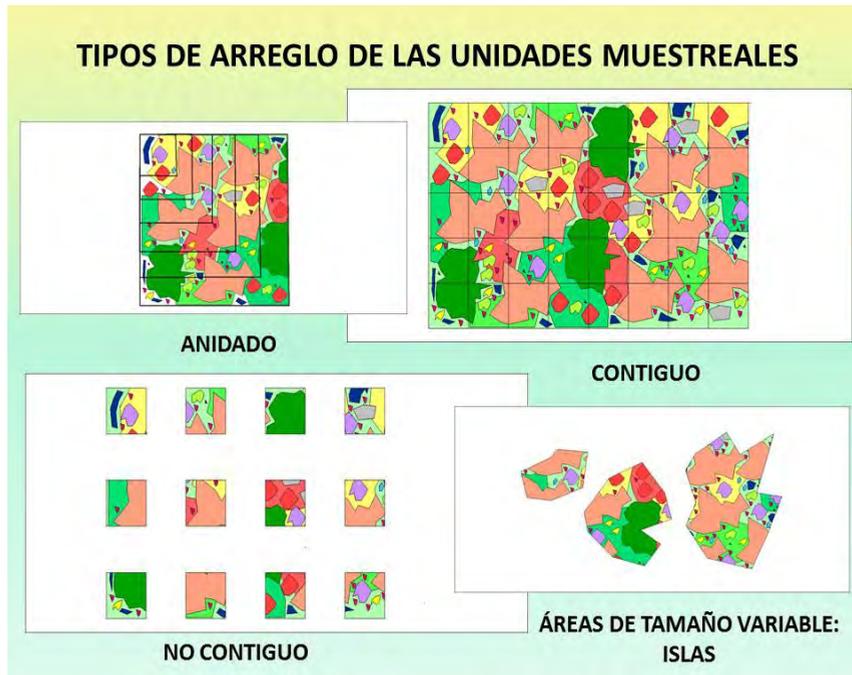


Fig. 11 El arreglo de las unidades muestrales, su vinculación o no espacial y el tipo de medición empleado dará lugar a 4 tipos básicos de curvas y dos variantes (I, IIA, IIB, IIIA, IIIB y IV). Adaptado de Scheiner, (120).

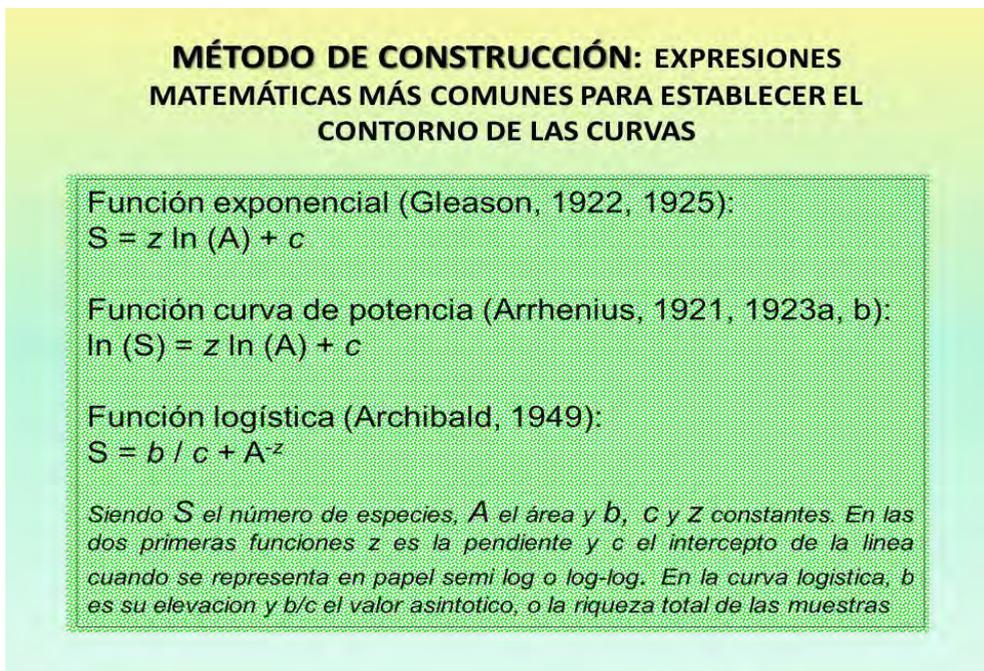


Fig. 12 En dependencia del tipo de función empleada para describir la relación entre el área y el número de especies contenida en ella, se asumirán incrementos indefinidos en el número de especies (función exponencial o de curva de potencia) o un "plateau" final en el cual estos aumentos no serán significativos (función logística).

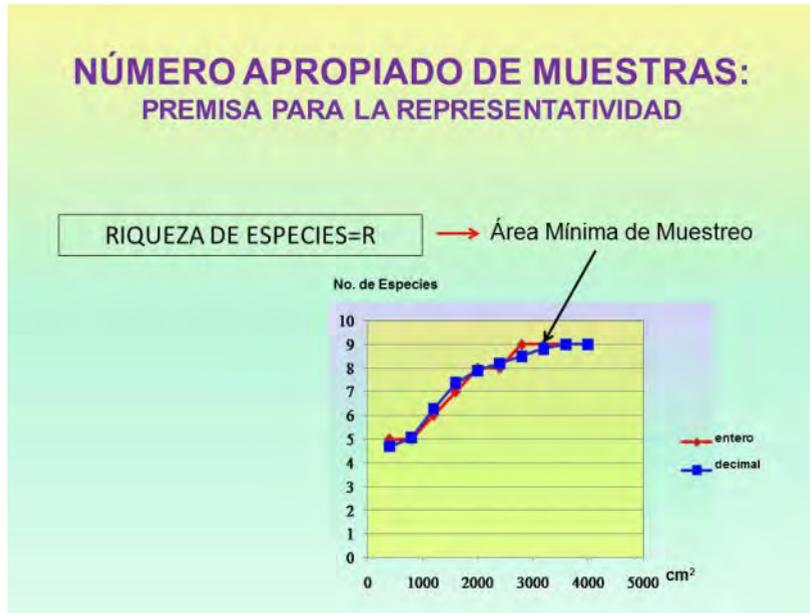


Fig. 13 A partir de un valor asintótico en el número de especies puede establecerse el área mínima de muestreo, que podrá ser posteriormente particionada de acuerdo al tamaño de la unidad muestral y se ubicará espacialmente de manera que se registre la mayor cantidad de información posible.



Fig. 14 Un tratamiento similar puede aplicarse a pares de muestras progresivamente mayores hasta lograr valores de similitud o disimilitud estabilizados con respecto al área muestral. Para ello puede ser empleado el índice de Morisita (99), o su modificación por Horm cuando se requiere una transformación logarítmica de los datos. El índice de Morisita, aunque no ha tenido la misma difusión que el índice de Disimilitud de Bray-Curtis, se asume como uno de los menos sesgados por el tamaño de la muestra o su diversidad (146).

La escala *nominal* se utiliza cuando sólo se pretende expresar igualdad o desigualdad entre los individuos estudiados. El caso más conocido es el de la escala binaria, considerada un caso particular de la escala nominal, en su variante de ausencia-presencia. Generalmente se utiliza el 0 para expresar ausencia y el 1 para la presencia, pero basta con que se empleen dos números diferentes.

La escala *ordinal* es aquella en la cual no sólo es importante la igualdad y desigualdad, sino también el orden. En este caso dos números diferentes no sólo indicarán que se trata de individuos con distintas características, sino que además se establece una jerarquía que abarca todo el recorrido de esta característica. Por ejemplo: abundante, común, rara.

En la escala de *intervalo* se incluyen las propiedades de las dos anteriores, pero además existe un valor arbitrario que se utiliza como punto de referencia, por lo que resulta posible, además de lo ya señalado con respecto a igualdad/desigualdad y jerarquía, conocer la diferencia con respecto a ese punto. El ejemplo clásico lo constituyen las escalas de temperatura, en las cuales se fija arbitrariamente un cero y las temperaturas se miden con respecto a él.



Fig. 15 La cantidad de muestras requeridas para lograr con un error predeterminado un estimado de la media poblacional puede ser obtenido mediante numerosas expresiones asociadas a la varianza, a la desviación estándar o al error estándar.

La escala de *razón* incorpora todas las propiedades de las anteriores, pero su punto de referencia es un 0 real. Esto quiere decir que el cero de la escala no se coloca arbitrariamente sino que coincide con la ausencia de la característica. Los ejemplos de esta escala son muy abundantes, basta señalar la estatura, el ancho, etc.

En general, las escalas se agrupan en dos categorías: cualitativas (*nominales* y *ordinales*) y cuantitativas (*intervalo* y *razón*). Las técnicas numéricas diseñadas para las escalas cualitativas, no hacen distinción en lo que respecta a si estas son nominales u ordinales. Lo mismo sucede con las que se incluyen entre las cuantitativas.

Siempre es posible bajar de una escala superior a una inferior, pero no ocurre así en caso contrario. Hay investigaciones en las que las características que se estudian pueden expresarse en escalas diferentes, todo depende de los objetivos particulares que se persigan. Siempre, no obstante, hay que efectuar una selección adecuada de la técnica numérica de procesamiento y opcionalmente efectuar una combinación de escalas si ello resulta factible, con vista a escoger el procedimiento estadístico más conveniente.

El uso de la Estadística Matemática por parte de muchas disciplinas ha experimentado un desarrollo extraordinario. La Biología en particular ha sido una de las pioneras en la utilización de las técnicas estadísticas, lo cual incentivó la creación de métodos especiales para el tratamiento de diferentes problemas biológicos. De ahí el concepto de Biometría, que puede definirse, en el sentido más amplio, como la rama de la estadística que comprende las técnicas y métodos utilizados en la obtención, análisis e interpretación de datos de origen biológico.

Dentro de la Biometría, el muestreo se ocupa de los métodos y la teoría para la selección de muestras, el uso de datos muestrales para la estimación de las características de la población (tales como promedio, total o proporción) y la evaluación de estas estimaciones.

Existen básicamente dos tipos de muestreo: el probabilístico, basado en la noción de que cada elemento se extrae con una probabilidad conocida. En el muestreo no probabilístico no sucede así. Ejemplos de este último son el muestreo al juicio y el muestreo por cuotas.

Las ventajas de muestrear son varias. La primera es obvia: resulta más barato obtener información a partir de la obtención de una muestra, que de la población completa. Otras ventajas son la rapidez en la adquisición de información, así como la posibilidad de poder realizar una inspección más profunda, ya que ésta se concentraría en una cantidad menor de individuos. Finalmente, es posible que no se pueda disponer de toda la población y con el muestreo se obtienen datos confiables.

Existen diferentes técnicas de muestreo que se utilizan según los objetivos a tomar en cuenta. El más sencillo es el denominado muestreo aleatorio simple, que es aplicable cuando no puede suponerse que en la población hayan subdivisiones o agrupamientos de los que se esperan respuestas diferentes para la característica en estudio.

A partir de esta consideración, pueden establecerse los siguientes tipos de muestreo:

- *Muestreo aleatorio simple*
- *Muestreo estratificado*
- *Muestreo sistemático*
- *Muestreo por conglomerados*

De todos ellos, el *muestreo estratificado* ha sido uno de los más empleados en investigaciones biológicas por varias razones, entre ellas, la evolución ontogénica de muchas características individuales, el comportamiento particular que pueden mostrar las cohortes en una población y el carácter agregado que con mucha frecuencia evidencia la distribución espacial de los organismos y que determina que las varianzas suelen depender de sus medias grupales. A continuación se describen sus principales características.

### Muestreo estratificado

Cuando no pueda suponerse que haya homogeneidad en la población con respecto a la característica estudiada, es aconsejable dividir la población en subgrupos que se consideren homogéneos y realizar muestreos dentro de cada uno de ellos. Cada subgrupo recibe el nombre de *estrato*. La división en estratos genera una partición de la población, esto significa que los estratos no tienen intersección y entre sí abarcan toda la población. El muestreo estratificado puede ser simple, cuando se distribuye el mismo número de muestras por estrato, proporcional, cuando las muestras se distribuyen en proporción al área de los estratos u optimizado, cuando el número de muestras dependerá de la magnitud de la varianza entre cuadrantes en cada estrato. Las formulaciones empleadas para el muestreo estratificado se muestran en el Tabla 2.

Una razón de peso para el uso de este tipo de muestreo es que su correcta utilización debe incrementar la precisión del muestreo (intervalo de confianza con una probabilidad dada de que en él se encuentre el verdadero valor del estimador de interés). Otra razón importante es que puede ser que se desee tener información de cada uno de los estratos. También resulta conveniente debido a que facilita la obtención de la información, ya que ésta se obtiene atendiendo a la estructura diseñada para agrupar a los individuos. Es bueno insistir, dado que es el punto central para la decisión acerca de si se usa muestreo estratificado o simple aleatorio, que son los objetivos del trabajo en primera instancia, los que nos llevan a suponer una estructura en estratos de la población. El investigador debe ser cuidadoso a la hora de conformar los estratos, ya que no debe olvidarse que la muestra es una “representación” en menor escala de lo que existe en la población.

Con independencia del tipo de muestreo empleado, la replicación cuando no es efectuada de manera apropiada constituirá una fuente de errores que afectaran los resultados obtenidos (Fig.16).



Fig. 16 La seudorreplicación de las muestra constituye una de las fuentes de errores mas frecuentes y cuando tiene lugar, presunciones como la independencia de las varianzas o los errores no pueden asegurarse y ocasionan falsas interpretaciones de los resultados derivados de muestreos aleatorios (A), sistemáticos (S) o con cualquier tipo de agregación.

Tabla 2. Formulaciones empleadas en el muestreo estratificado, de acuerdo con diferentes autores.

<b>Cálculo del costo (Höisater y Matthiesen, 1979).</b>	
1. $C = C_o + n(C_q)$	Co: Componente del costo independiente de n Cq: Costo por unidad muestral n: Número de unidades muestrales
<b>Cálculo del tamaño de muestra (Cochran, 1977)</b>	
2. $n = (1,96 S/d)^2 / [1 + (1/N)(1,96 S/d)^2]$	N: Tamaño de la muestra cuya varianza se utiliza en la fórmula S: Desviación estándar d: Precisión deseada
<b>Cálculo de las asignaciones (Cochran, 1977)</b>	
3. Proporcional $n_p = nW_i$	n: Número de recursos a asignar
4. de Neyman $n_n = n[ W_i S_i / C_i ]$	S <sub>i</sub> : Desviación estándar del estrato
5. Óptima $n_o = n[ (W_i S_i / C_i^{1/2}) / \sum (W_i S_i / C_i^{1/2}) ]$	W <sub>i</sub> : Ponderación del estrato C <sub>i</sub> : Costo de muestreo en el estrato
<b>Cálculo de los estadígrafos del estrato (Höisater y Matthiesen, 1979)</b>	
6. Ponderación del estrato $W_i = A_i / \sum A_i = P_i / \sum P_i$	A <sub>i</sub> : Área del estrato
7. Media del estrato $\hat{y}_i = \sum y_i / n_i$	n <sub>i</sub> : Tamaño de muestra del estrato
8. Varianza del estrato $S_i^2 = \{ \sum y_i^2 / n_i - [(\sum y_i)^2 / n_i] \} / (n_i - 1)$	P <sub>i</sub> : Peso del estrato
9. Desviación estándar $S_i = \sqrt{S_i^2}$	y <sub>i</sub> : Valores muestrales del estrato
<b>Cálculo de los estadígrafos para el área total (Höisater y Matthiesen, 1979)</b>	
10. Media del muestreo aleatorio estratificado $\hat{y}_{st} = \sum W_i \hat{y}_i$	
11. Varianza del muestreo aleatorio estratificado $V_{st} = \sum W_i^2 (S_i^2 / n_i)$	
<b>Cálculo de los límites de confianza (Höisater y Matthiesen, 1979)</b>	
12. $\hat{Y}_{st} \pm t(V_{st})^{1/2}$	
13. $n_e = [ \sum W_i^2 S_i^2 / n_i ]^2 / [ \sum W_i^4 S_i^4 / n_i^2 (n_i - 1) ]$	
<b>Cálculos para la evaluación del diseño de muestreo (Höisater y Matthiesen, 1979)</b>	
14. Varianza del muestreo aleatorio simple $V_{ran} = (1/n) [ \sum W_i S_i^2 + \sum W_i \hat{y}_i^2 - \hat{y}_{st}^2 ]$	

Los métodos de muestreo para macroalgas en pavimentos rocosos o fondos duros se clasifican en (Fig. 17):

- mediante parcelas
- sin parcelas
- con transeptos lineales
- mediante intersección de puntos
- barrido no selectivo
- de exploración visual.

En los métodos de muestreo mediante parcelas se utiliza una unidad muestral bidimensional cuya forma geométrica (aros, cuadrados o rectángulos) y tamaño (por lo general desde un m<sup>2</sup> a 25 cm<sup>2</sup>) varían de acuerdo a los requerimientos del propio muestreo y la conveniencia o comodidad del investigador. Con frecuencia se suele emplear un cuadrado de 25 cm de lado. De cualquier forma, el tamaño de la unidad muestral (Fig. 18) y la rugosidad del substrato incidirán en los resultados obtenidos. Cuando este es muy irregular por la presencia de cavidades o bloques, los valores de densidad o cobertura pueden subestimarse si el área se evalúa en proyección perpendicular, siendo en este caso mejor estimar la superficie real bajo la unidad muestral y estandarizar los resultados considerando el tamaño de la misma.



Fig. 17 A diferencia de las investigaciones llevadas a cabo en fondos no consolidados, en los cuales se utilizan con frecuencia muestreadores a distancia como jaibas y rastras, en el piso intermareal, o en pavimentos someros la interacción del investigador con el substrato suele ser directa y requiere muchas veces decisiones rápidas ante situaciones no previstas.

La distribución espacial de la unidad muestral puede ser o no aleatoria, en correspondencia con el uso de métodos rápidos exploratorios o si se aplica un diseño estadístico riguroso. Cuando el muestreo es al azar, este puede ser *bidimensional*, si se evalúa un área amplia, o *lineal* si se realiza a lo largo de una franja estrecha.

Cuando la distribución de la unidad muestral no es aleatoria, el muestreo puede ser sistemático lineal o sistemático bidimensional. En ambos casos las muestras se toman siguiendo un patrón establecido por el investigador, el cual puede ser en el primer tipo, a partir de transeptos con muestras contiguas o transeptos con muestras espaciadas, bien a tramos iguales o desiguales, en este caso si la cenoclina o gradiente amerita por su definición, concentrar las muestras en facies particulares.

Cuando el muestreo es sistemático bidimensional se utiliza una cuadrícula sobre la cual se efectúa un espaciamiento regular o irregular según la conveniencia del investigador.

El método de muestreo sistemático lineal con parcelas contiguas requiere, con respecto al aleatorio lineal o bidimensional, más muestras para obtener una cantidad similar de especies. Sin embargo, consume menos tiempo, por lo que puede ser una opción cuando se utiliza SCUBA a gran profundidad.



Fig. 18 Las muestras con parcelas son inapropiadas para dilucidar los patrones de distribución espacial de los miembros de una población o comunidad ya que los resultados variarían de acuerdo con su área (32).

Una variante recomendada es subdividir en varios tramos pequeños y dispersos los cuadrados consecutivos: De esta manera se abarca mayor extensión y se mantiene la economía del muestreo. El muestreo con parcelas puede ser también realizado utilizando la fotografía o cámaras de vídeo lo cual se efectúa por lo general mediante un muestreo sistemático lineal de parcelas contiguas. Para el procesamiento de la información pueden usarse diversos programas (82), con el fin de acelerar el tratamiento de la información y sus resultados finales son aceptables. No obstante el uso de estas herramientas requiere de una inversión inicial, por lo general significativa y cierto grado de experticia.

Los métodos sin parcelas han sido también muy utilizados. Consideran la cuantificación de cobertura o densidad. En el caso de la primera suele aplicarse el método de intercepción de cuerdas o de puntos y en el caso de la densidad el marcaje y recaptura o los métodos basados en medición de distancias. Estos últimos son de uso relativamente reciente en el medio marino (91) y se basan en medir la distancia entre organismos o entre puntos aleatorios y organismos (Fig. 19). Uno de los más frecuentes para muestrear macroalgas es el método de la *T-cuadrada* (91). De acuerdo a este método se escoge un punto al azar en el área de estudio, y se mide la distancia ( $x$ ) al organismo más cercano. Luego se mide la distancia entre este organismo y el vecino más cercano que se encuentre por fuera de una línea imaginaria perpendicular a la distancia ( $x$ ) y que pasa por el primer organismo cercano (distancia  $z$ ). Esto se repite varias veces, obteniéndose así 2 distancias por cada punto escogido al azar.