

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN DE HORMIGÓN ARMADO CON ACERO Y ACERO GALVANIZADO EN AMBIENTE SALINO

PARTE 1. RESULTADOS PRELIMINARES

CORROSION STUDY OF CONCRETE REINFORCED WITH STEEL AND GALVANIZED STEEL IN MARINE ENVIRONMENT

PART. 1. PRELIMINARY RESULTS

Autores: **Rosa Vera**⁽¹⁾⁽³⁾, **A. María Carvajal**⁽²⁾⁽³⁾, **María Villarroel**⁽¹⁾⁽³⁾ y **Marcela Cortés**⁽¹⁾

(1) Laboratorio de Corrosión, Instituto de Química,

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, rvera@ucv.cl

(2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Ingeniería,

Escuela de Construcción Civil, acarvajg@uc.cl

(3) Miembros del Proyecto DURACON XV.3 del CYTED

Fecha de recepción : 19/07/2004

Fecha de aceptación : 31/08/2004

RESUMEN

En este estudio se evaluó el comportamiento de armaduras de acero y acero galvanizado embebidas en hormigón frente a la corrosión por cloruros. La mezcla se preparó con una relación agua/cemento de 0,55 y fue caracterizada mediante ensayos físicos y mecánicos. Para cumplir con el objetivo, se instalaron muestras en una estación atmosférica marina ubicada en Valparaíso y se realizaron ensayos acelerados cíclicos de humedad/secado, sumergiendo las probetas en una solución de cloruro de sodio al 3,5%. Como una forma de evaluar la corrosión del metal se midieron las variables de potencial de corrosión y corriente de corrosión. Los resultados al cabo de 22 meses muestran que tanto el hormigón reforzado con acero como con acero galvanizado mantienen su vida útil, dado que el galvanizado se encuentra en estado pasivo y el acero al carbono presenta corrosión moderada.

Palabras claves: Corrosión, hormigón, acero al carbono, acero galvanizado, cloruro.

ABSTRACT

In this study it was evaluated the behaviour of steel and galvanized steel structures embedded in concrete against corrosion by chlorides. The mixture was prepared with a w/c ratio of 0.55, and was characterized by mechanical and physical tests. Samples were placed in a marine atmospheric station located in Valparaíso, and cyclic accelerated humidity/dry essays were carried out by immersing the probes in a 3.5% sodium chloride solution. In order to evaluate the metal corrosion, the corrosion potential and the corrosion current were measured. The results after 22 months show that concrete reinforced with steel as well as with galvanized steel maintain its useful life, since galvanized is found in passive state, and carbon steel present moderate corrosion.

Keywords: Corrosion, concrete, carbon steel, galvanized steel, chloride.

1. INTRODUCCIÓN

El diverso uso del hormigón en distintos tipos de estructuras, sometidas a adversas condiciones atmosféricas, ha generado variados procesos de corrosión en las matrices y armaduras afectando seriamente sus propiedades, disminuyendo así su vida útil de servicio.

Muchos factores tienen influencia sobre las propiedades del hormigón donde los de mayor importancia son la relación agua/cemento, la compacidad de la estructura y la adición de aditivos. Sin embargo, la permanencia del hormigón en el tiempo, se define como la resistencia a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o a cualquier deterioro y la falla del hormigón con y sin armadura se debe principalmente a causas mecánicas, naturaleza del hormigón y agentes externos del medio. Pese a todo, la propiedad más importante y la que más influye en la durabilidad del hormigón es la porosidad que le aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida y es que a través de ella el agua ejerce su función de transferir los elementos agresivos externos.

El acero de refuerzo es protegido de forma química contra los agentes iniciadores de corrosión gracias a la formación de una capa alcalina de carácter pasivante sobre el metal, propio de la hidratación del cemento, proporcionando así una barrera física al paso de agentes agresivos desde el medio ambiente.

Estudios realizados muestran que la causa más frecuente de la pérdida de pasividad del acero se debe a la penetración de iones agresivos, principalmente la difusión del ión cloruro hacia la interfase acero-hormigón dando origen a la corrosión por picado. Esto provoca la deslaminación y el desprendimiento del hormigón, además de reducir la adherencia mutua entre ambos materiales, debido a la naturaleza expansiva de los productos de corrosión. El fenómeno descrito, se produce debido a la penetración de los agentes externos por los poros del hormigón, los cuales producen una disminución del pH permitiendo la disolución de la capa pasivante del acero e iniciándose la corrosión.

Para disminuir o eliminar la corrosión del acero se han creado algunos métodos de protección que actúan directamente sobre el acero, entre ellos el galvanizado. Método que consiste en el recubrimiento del acero con una pequeña película de cinc que lo protege por la formación de una capa compacta de productos de corrosión. La efectividad de esta capa dependerá de la pureza y del espesor de la película de cinc.

En consecuencia, en esta investigación se evaluó por medio de medidas electroquímicas el comportamiento de armaduras de acero y acero galvanizado embebidas en hormigón frente a la corrosión por cloruros.

2. PARTE EXPERIMENTAL

En la realización de este trabajo el hormigón fue preparado con cemento Polpaico H25 (250 kg/cm²) y de una relación agua/cemento de 0,55, según la Norma Chilena 1017. Los materiales empleados referidos a un m³ de hormigón fueron los siguientes: 371 kg de cemento, 217 L de agua, 1029 kg de arena y 857 kg de gravilla. El curado de las probetas se realizó en cámara húmeda (H.R.:90-100% y T° :17-23° C) por un período de 28 días.

La caracterización físico-mecánica de las probetas comprendía las medidas de resistividad, absorción total, porosidad total (Norma ASTM C642), absorción capilar (método de Fagerlund), resistencia a la compresión (Norma ASTM C39) y resistencia a la tracción por hendimiento, (Norma ASTM C496).

Se prepararon probetas cilíndricas de 10 x 20 cm y de 15x30 cm con armadura y probetas cúbicas de 20 x 20 x 20 cm sin armadura.

Las barras de acero (A 44-28 H) y de acero galvanizado (80 µm de capa de Zn) tenían forma corrugada y sus dimensiones eran de 1 cm de diámetro y 10 cm de largo, con un área expuesta de 18,55 cm². Las probetas armadas estaban compuestas además, por dos electrodos de grafito de 5 mm de diámetro y 6 cm. de largo ubicados en posiciones simétricas con respecto al metal.

Se realizaron ensayos acelerados donde las probetas armadas fueron sometidas a ciclos alternados de inmersión (3 días)-emersión (5 días) en NaCl al 3,5% y ensayos a largo plazo donde las probetas se expusieron en la estación de atmósfera marina ubicada en Valparaíso, Chile (Lat. 32°S, Long. 71°W, 41 msnm), cuyos parámetros metereológicos promedios se muestran en la Tabla 1.

Por otra parte, los valores obtenidos para las propiedades físicas de una mezcla de a/c: 0,55 demuestran que el hormigón presenta un cierto grado de absorción y porosidad facilitando el acceso de agentes agresivos en este caso los cloruros, permitiendo que estos deterioren en un menor tiempo la armadura de refuerzo.

Tabla 1

Parámetros Metereológicos de la Estación de Valparaíso

Parámetros	HR (%)	T (°C)	TDH (f)	Precip. total (mm)	Vel. viento(m/s)	SO ₂ (mg/m ² día)	Cl ⁻ (mg/m ² día)	CO ₂ (mg/lt)
Mínimo	35,0	5,7	0,3	0	5,2	1,1	5,1	0,8
Máximo	100,0	29,2	1,0	201,6	9,3	12,1	38,8	1,1
Media	78,7	14,7	0,6	—	7,1	5,7	21,9	0,9

El contenido de ión cloruro (Cl⁻) y de dióxido de azufre (SO₂) como contaminantes principales se determinó mensualmente según norma ISO 9225 y el contenido de CO₂ por el método de Pettenkofer.

Las medidas de potencial de corrosión se realizaron con un potencióstato VoltaLab 21 y se llevaron a cabo después de finalizar cada ciclo y mensualmente en la estación atmosférica. El electrodo de referencia utilizado fue de cobre/sulfato de cobre. Además, se evaluó en ellas la corriente de corrosión utilizando como contraelectrodo una lámina de cobre.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización físico-mecánica del hormigón se indica en la Tabla 2. En ella podemos notar que las variables mecánicas se encuentran dentro de los valores establecidos en las normas chilenas con una mezcla de compactación y elasticidad aceptable.

Tabla 2

Propiedades Físico-mecánicas del hormigón

Propiedades	Mezcla a/c: 0,55
Resistencia a la Compresión (MPa)	22,4
Resistencia a la Tracción (MPa)	1,7
Absorción Total (%)	5,16
Porosidad Total (%)	16,09
Porosidad Efectiva (%)	13,8
Absorción Capilar (k/m ² s ^{1/2})	2,35 x 10 ⁻²
Resistencia a penetración de agua, m(s/m ²)	2,98 x 10 ⁷
Sorción Capilar, S (m/s ^{1/2})	1,8 x 10 ⁻⁴

En la Figura 1 se pueden apreciar los resultados obtenidos para la variación del potencial de corrosión (Ec) en función del tiempo para acero y acero galvanizado utilizados como refuerzo, después de cada ciclo húmedo en NaCl al 3,5 %.

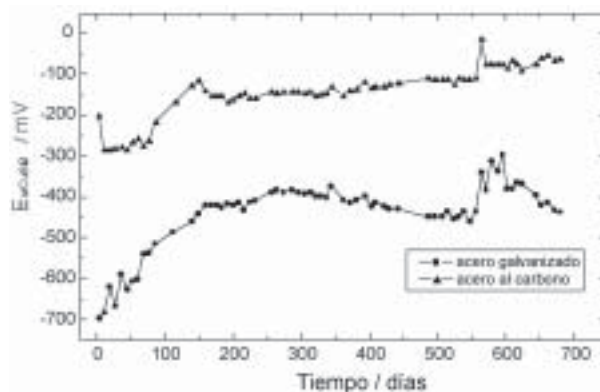


Figura 1. Potencial de corrosión en función del tiempo para el acero y acero galvanizado de refuerzo después de cada ciclo húmedo de NaCl al 3,5%.

En ella se observa que para ambos metales el Ec aumenta con el incremento del tiempo de exposición, indicando la formación de una capa pasiva de productos de corrosión en la interfase metal/hormigón que alcanza su estabilidad alrededor de los 200 días de exposición. El intervalo entre el Ec inicial y el potencial alcanzado en este período de ensayo es mayor para el acero galvanizado (Δ 300 mV) que para el acero al carbono (Δ 180 mV), lo que estaría indicando que el acero galvanizado en estas condiciones forma capas de mayor espesor de productos de corro

sión que generalmente en presencia de cloruros corresponde a hidroxizincato cálcico (CaHZn) y que actúan como barrera aislante a la continuación del proceso de corrosión, alcanzando así más fácilmente la pasividad.

Los productos de corrosión de Zn al ser más compactos que los productos de corrosión de hierro sellan en mayor grado los poros del hormigón disminuyendo así, la difusión del ión cloruro hacia el metal y por tanto la corrosión.

Un comportamiento similar al anterior se obtiene para las medidas de E_c después del ciclo de secado, tal como se observa en la Figura 2. En estas condiciones y durante el período de estudio ambos metales se mantienen en estado pasivo.

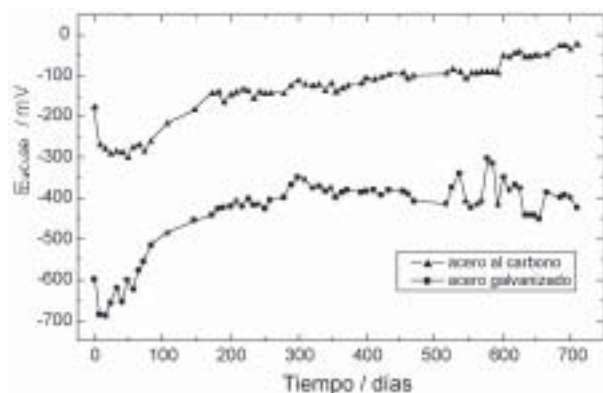


Figura 2. Potencial de corrosión en función del tiempo para el acero y acero galvanizado de refuerzo después de cada ciclo de secado.

Con respecto al ensayo atmosférico, en la Figura 3 se muestra la variación mensual durante el período en estudio de los parámetros meteorológicos en la estación de Valparaíso. En ella se puede observar una tendencia a la variación constante para la humedad relativa, pero no así para la temperatura, esto permite obtener una fracción promedio de 0.6 para el tiempo de humidificación lo que clasifica a la estación atmosférica de Valparaíso de medianamente agresiva con respecto al deterioro de los materiales.

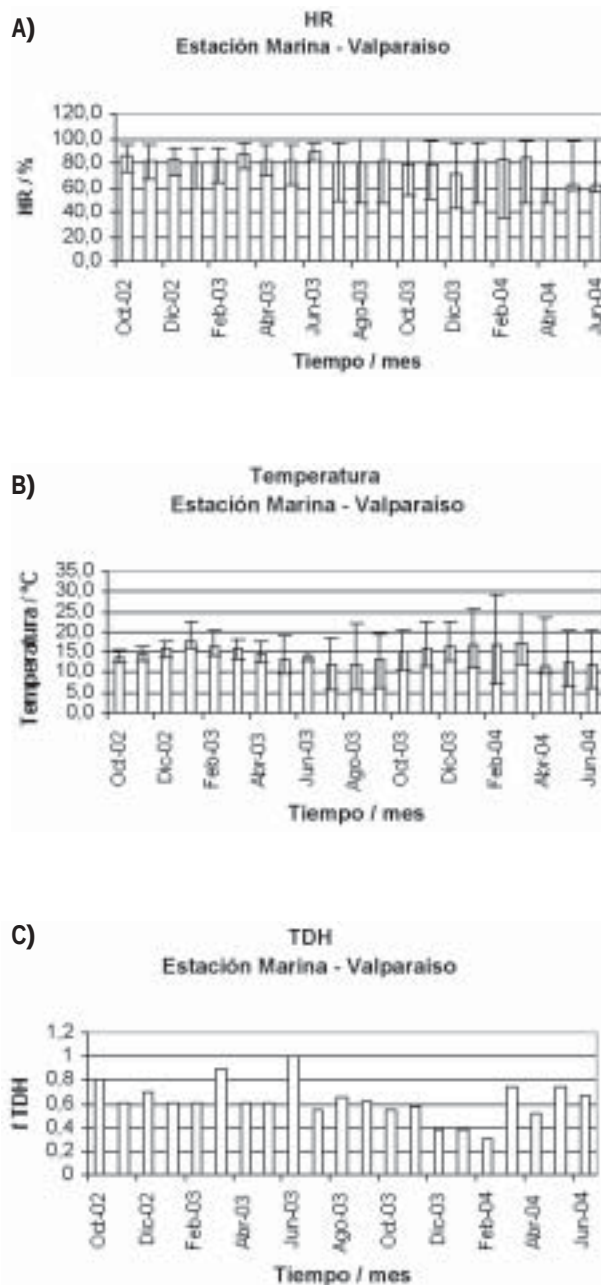


Figura 3. Representación de las variables meteorológicas durante el período de estudio.

(A) Humedad Relativa.

(B) Temperatura.

(C) Tiempo de Humectación.

En cuanto a la concentración de contaminantes en la atmósfera la Figura 4 presenta los contenidos de Cl^- , SO_2 y CO_2 durante el tiempo de exposición de las probetas.

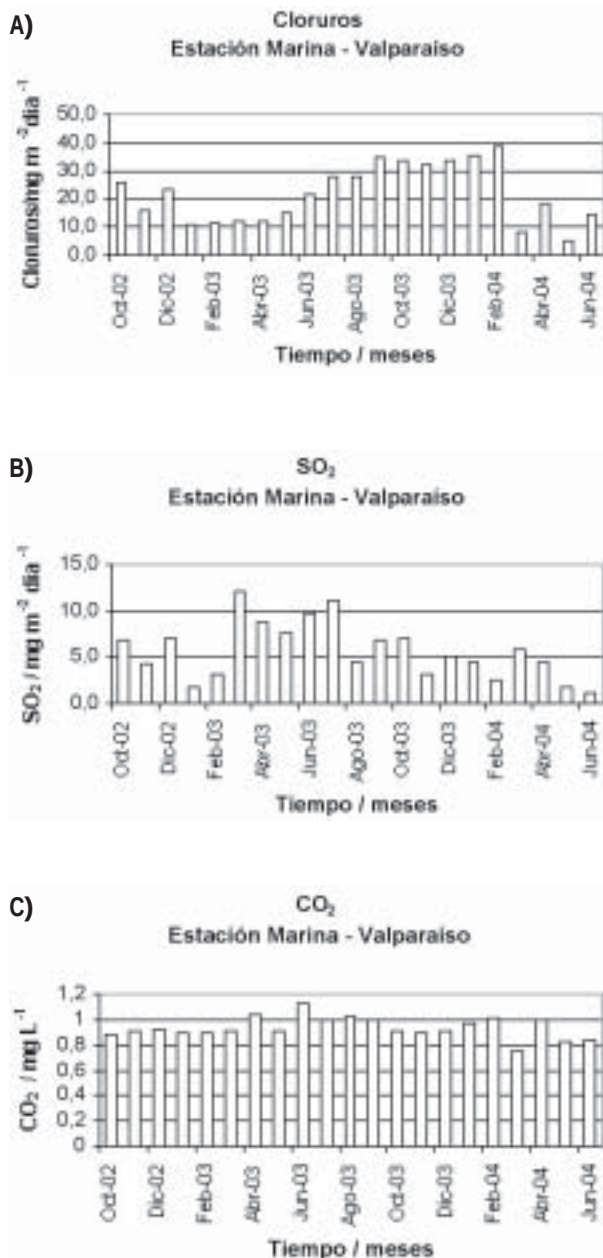


Figura 4. Variación de la concentración de contaminantes durante el período de estudio.

- (A) Cloruro.
(B) Dióxido de azufre.
(C) Dióxido de carbono.

El valor promedio de $[\text{Cl}^-]$ de $21,9 \text{ mg/m}^2 \text{ día}$ y para $[\text{SO}_2]$ de $5,7 \text{ mg/m}^2 \text{ día}$ clasifican a la atmósfera de la estación de Valparaíso en S_1 y P_0 (marina). Además, el bajo valor obtenido para $[\text{CO}_2]$ de $0,9 \text{ mg/L}$ nos indica que las muestras de hormigón expuestas alcanzarán un mínimo grado de carbonatación, no incrementando el proceso de corrosión.

En la Figura 5 se aprecia la variación del potencial de corrosión (E_c) en función del tiempo para acero y acero galvanizado utilizados como refuerzo, en la estación atmosférica marina de Valparaíso. Los resultados son concordantes con los obtenidos en el ensayo de inmersión-emersión, no obstante, en las condiciones atmosféricas los valores de potencial para ambos metales son superiores en un valor aproximado de 100 mV , lo que estaría indicando que ambos materiales se encuentran en estado pasivo. Este comportamiento es reflejo de la baja agresividad de la atmósfera en la que se encuentran expuestas las muestras, tal como se explicó en los párrafos anteriores.

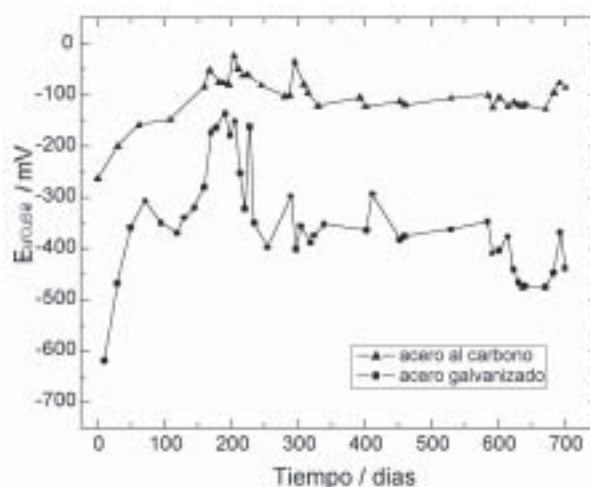


Figura 5. Potencial de corrosión en función del tiempo para el acero y acero galvanizado de refuerzo en ambiente marino (Valparaíso).

Además, se realizaron medidas de resistencia de polarización (R_p) después de 22 meses de exposición a los metales embebidos en el hormigón, las que permitieron calcular corriente de corrosión (I_c) y velocidad de corrosión (V_c), estos resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Corriente de corrosión y velocidad de corrosión de acero al carbono y acero galvanizado después de 22 meses de exposición

Material	Ciclo Seco		Ciclo Húmedo		Atmósfera Marina	
	Ic	Vc	Ic	Vc	Ic	Vc
	($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	($\mu\text{m}/\text{año}$)	($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	($\mu\text{m}/\text{año}$)	($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	($\mu\text{m}/\text{año}$)
Acero al carbono	0,13	1,51	0,15	1,74	0,11	1,27
Acero galvanizado	0,043	0,64	0,059	0,88	0,047	0,70

Los valores de Ic son promedio de 5 muestras y el cálculo de Vc es considerando corrosión general.

Los valores obtenidos en la corriente de corrosión para los dos tipos de muestras son menores en los ensayos atmosféricos que en los de inmersión, y ambos resultados indican que el acero al carbono comienza a despasivarse pues su valor de corriente es ligeramente mayor que $0,1\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este valor es el límite por sobre el cuál la corrosión se considera moderada y en esta condición la velocidad de corrosión promedio determinada para el acero muestra que éste ha perdido el 0,06 % en espesor.

Para el caso de acero galvanizado la corriente de corrosión alcanzada en cada ensayo es menor que $0,1\mu\text{A}/\text{cm}^2$, valor que confirma que el metal se encuentra en estado pasivo. Además, la medida de la velocidad de corrosión indica que se ha perdido aproximadamente un 2% de la capa de Zn, corroborando el buen comportamiento del galvanizado en el medio. Esto último estaría indicando que para similares tiempos de exposición en las condiciones estudiadas el acero galvanizado de refuerzo tiene un mayor tiempo de vida útil.

4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares a los 22 meses de exposición muestran que tanto el hormigón reforzado con acero como con acero galvanizado mantiene su vida útil. En estas condiciones el acero al carbono presenta una ligera corrosión y el acero galvanizado se encuentra en estado pasivo. Por tanto, para iguales tiempos de exposición a los ambientes estudiados el acero galvanizado presenta un mejor comportamiento a la corrosión que el acero al carbono.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, a la Industria Galvanizadora B. Bosch S. A., al Programa Iberoamericano

de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED), Proyecto XV.3 DURACON y a la Armada de Chile.

REFERENCIAS

1. Alonso, M. C. y Andrade, M. C., Métodos de Protección de la Armadura. Galvanización. XV Curso de Estudios Mayores de la Construcción, España, (2001).
2. Castro, P., Castillo, R. y Carpio, J.J.; Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Teoría, Inspección, Diagnóstico, Vida útil y Reparaciones, 1ª edición, IMCYC, México, (1998).
3. Castro, P. Infraestructura de Concreto Armado: Deterioro y Opciones de Preservación, IMCYC, 1ª edición, México, 2001.
4. Castro, P.; Genesca J. and Moreno, E.I.; Cem. Concr. Res., 30, 1565-1571 (2000).
5. Ihekweba, N.M., Hope, B.B. and Hansson, C.M.; Cem. Concr. Res., 26(7), 1095-1107 (1996).
6. Macias, A. and Andrade, C.; British Corrosion Journal, 22(2), 113-118 (1987).
7. Macias, A. and Andrade, C.; British Corrosion Journal, 22(2), 119-129 (1987).
8. Mohammed, T. U. and Hamada, H.; Cem. Concr. Res., 33, 1487-1490 (2003).
9. Stanish, K., Hooton, R. D., Thomas, M. D. A.; Cem. Concr. Res., 34, 51-57 (2004).
10. Trocónis de Rincón, O., Romero de Carruyo, A., Andrade, C.; Díaz, I.; Helene, P.; Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, 2ª edición, CYTED, Venezuela, (1998).