

# Sensores de fibra óptica y sus aplicaciones en el medio ambiente

Juan Antonio Villanueva Hernández  
Rubén Alejandro Vázquez Sánchez  
Carlos Manuel García Lara

## Nota de los autores

Escuela de Ingeniería Ambiental, UNICACH. Libramiento Norte Poniente 1150, Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Tel y Fax (961) 61 70 440 ext. 4270. Correo electrónico antonio.villanueva@unicach.mx

Para citar este artículo:

García, C., Vázquez, R. y Villanueva, J. (2013) Sensores de fibra óptica y sus aplicaciones en el medio ambiente. *Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 2 (3), 94-115. doi: 10.31644/IMASD.3.2013.a06

## Abstrac

This research provides an analysis on optical fiber sensors and their application in the environment, taking into account the quality of water, soil and air them which are areas with a greater interest in the field of study, because they are part of environment in which life develops. A body of water, air or soil with high contents of pollutants are places unfit for the life and development of the species. When it comes to measuring one or more physical parameters of the water or air, or to detect and quantify a substance, it is necessary to use some kind of sensor to provide us with reliable data in order to implement solutions to mitigate the risks that exist. Sensor types most commonly used for this purpose are mechanical, electrochemical, and, for some parameters already in place, are optical sensors. In the society in which we live, it is becoming more necessary to develop analytical small devices that are inexpensive, portable, reliable, selective, easy to use and require few microliters of sample to determine a particular parameter.

**Key words:** environment, physical parameters, optical sensors.

## Resumen

En esta investigación se hace un análisis sobre sensores de fibra óptica y su aplicación en el medio ambiente, teniendo en cuenta la calidad del agua, suelo y aire, áreas con un mayor interés del campo de estudio, debido a que forman parte del entorno en que la vida se desarrolla. Un cuerpo de agua, aire o suelo con altos contenidos de contaminantes son lugares no aptos para la vida y desarrollo de las especies. Cuando se trata de medir uno o varios parámetros físicos del agua o aire, o de detectar alguna sustancia y cuantificarla, es necesario utilizar algún tipo de sensor que nos proporcione datos confiables para poder aplicar soluciones que mitiguen los riesgos que existen. Los tipos de sensores que más se utilizan para estos fines son mecánicos, electroquímicos, así como, para algunos parámetros ya en aplicación, sensores ópticos. En la sociedad en la que vivimos, cada vez se hace más necesario el desarrollo de pequeños dispositivos de análisis que sean de bajo costo, portátiles, fiables, selectivos, de fácil manejo y que requieran de pocos microlitros de muestra para determinar un parámetro concreto.

**Palabras claves:** medio ambiente, parámetros físicos, sensores ópticos.

## Introducción

La contaminación es definida por Henry y Heinke (1999: 235-237) como *“un cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del aire, el agua o el suelo que puede afectar de manera adversa la salud, la supervivencia o las actividades de los humanos o de otros organismos vivos”*, es consecuencia de la inadecuada utilización de los recursos en la producción de bienes y servicios y de la forma de vida consumista y vilipendiosa de nuestras culturas (Bustos y Chacón: 2009, 164-181.).

Algunos de los principales contaminantes atmosféricos que se conocen son: Óxidos de Nitrógeno (NOX), Anhídrido Sulfuroso (SO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono o Anhídrido Carbónico (CO<sub>2</sub>), el Ozono, el Plomo (Pb), el Mercurio (Hg) y los Hidrocarburos (HC). Estos contaminantes pueden ser primarios o secundarios, los primarios se originan directamente de las fuentes y los secundarios son los que se forman en la atmósfera por combinación de los primarios con componentes atmosféricos normales (García y Martínez: 1978, 70-75). Existen diversos agentes contaminadores de agua, en la mayoría de los casos afectan directamente la salud del ser humano y sus consecuencias pueden ser muy severas:

### Agentes Patógenos

Son aquellos que ocasionan enfermedades. En general son bacterias, virus, protozoarios y gusanos que entran al agua, provenientes del drenaje doméstico y de los desechos animales. En la mayoría de los países subdesarrollados, son la principal causa de enfermedades y defunciones, entre ellas, las de muchos niños menores de cinco años. Un indicador de la calidad del agua para beber o nadar es el número de bacterias coliformes presentes en una muestra de 100 mililitros de agua. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una cuenta de 0 colonias de dichas bacterias por 100 mililitros de agua para beber y para nadar un máximo de 200 colonias por 100 mililitros de agua. Las fuentes de estos agentes pueden ser el excremento, tanto humano como animal (Tyler: 1994, 27-39).

### Desechos que requieren oxígeno

Estos son los desechos que pueden ser descompuestos por las bacterias aeróbicas, que, a su vez, utilizan oxígeno para biodegradar los desechos. Poblaciones muy grandes de bacterias soportadas por estos desechos

pueden agotar el gas oxígeno que se encuentra disuelto en el agua. Sin este oxígeno, mueren los peces y otras formas de vida que la consumen. Las fuentes de contaminación pueden ser las aguas negras, los escurrimientos agrícolas, el procesamiento de animales y la fabricación del papel (Tyler: 1994).

## **Sustancias químicas inorgánicas solubles en agua**

Dichas sustancias se refieren a ácidos, sales y compuestos de metales tóxicos (como el mercurio y el plomo). Niveles altos de estos sólidos disueltos pueden hacer al agua no potable, dañar a los peces y demás vida acuática, e incluso afectar la vida agrícola y acelerar la corrosión del equipo que usa agua. Las fuentes principales son las industrias.

## **Nutrientes vegetales inorgánicos**

Estos nutrientes son los nitratos y fosfatos solubles en agua, que pueden ocasionar el crecimiento exagerado de algas y demás plantas acuáticas, que mueren y se descomponen, lo que tiene como resultado el agotamiento del oxígeno que se encuentra en el agua y la muerte de peces y otros seres vivos que dependen de ella. Los niveles excesivos de nitratos en el agua potable pueden reducir la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre y ocasionar la muerte de bebés, especialmente menores de tres meses (Tyler: 1994).

## **Sustancias químicas orgánicas**

Las sustancias químicas orgánicas que pueden contaminar el agua son el petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, solventes y detergentes, entre muchos otros productos químicos hidrosolubles y no hidrosolubles que amenazan la salud humana y dañan a la vida acuática (Tyler: 1994).

## **Sedimentos o materia suspendida**

Estos se refieren a partículas insolubles en el suelo y otros materiales sólidos, tanto orgánicos como inorgánicos que llegan a quedar suspendidos en el agua. Esta materia enturbia el agua, reduce la aptitud de algunos organismos para encontrar alimento, reduce la fotosíntesis hecha por plantas acuáticas, altera las redes alimenticias acuáticas y es un transportador de plaguicidas, bacterias y otras sustancias nocivas. El sedimento del fondo destruye los terrenos o sitios de alimentación de peces, obstruye y rellena a los lagos, estanques, bahías y canales acuáticos. La fuente principal es la erosión terrestre (Tyler: 1994).

## Sustancias radioactivas

Las sustancias radioactivas son isótopos hidrosolubles capaces de ser amplificados biológicamente a concentraciones más altas conforme pasan a través de las cadenas alimenticias. Esta radiación puede causar efectos congénitos y cáncer, entre otras enfermedades. Las fuentes principales de estas sustancias son la minería, las plantas generadoras de energía y las plantas de producción de armamento (Tyler: 1994).

Se considera que 58.4% de las aguas superficiales está contaminado, siendo escasas las zonas del país que presentan una buena calidad de agua (Alcocer: 1998, 127-129). Asimismo, se calcula que entre 75 y 90% de los residuos peligrosos (sustancias tóxicas, reactivas, explosivas, inflamables o infecciosas) es manejado sin los mecanismos de control ambiental adecuados, lo que genera graves procesos de contaminación en zonas agrícolas, industriales y urbanas (Díaz, et al: 1998, 104-115). En este escenario es importante considerar que alcanzar un tipo de desarrollo viable tanto en términos ecológicos como económicos no depende únicamente de la puesta en marcha de nueva tecnología y de medidas de regulación sobre el uso de los recursos.

La sostenibilidad implica en sí misma generar nuevas formas de vida en sociedad, es decir, nuevas normas, valores y virtudes que permitan construir una relación sociedad-ambiente distinta. Se vuelve indispensable, entonces, conocer de qué forma y bajo qué circunstancias los valores ambientales se difunden dentro de una sociedad (Durand: 2004, 511-530). La importancia de la calidad medioambiental es un hecho incuestionable en la actualidad sobre todo en la relación sociedad-ambiente, y por ello es necesaria una rápida medición de la posible contaminación para mantener un control del medio ambiente. Aquí es donde juegan un importante papel los biosensores. El término biosensor se aplica a un sistema analítico que acopla un elemento biológico sensible asociado a un sistema de transducción, el cual permite detectar y medir de manera rápida, proporcional, precisa y sensible la señal producida por la interacción del elemento biológico y la sustancia de interés (Castro-Ortíz, et al: 2007, 35-45).

Los biodetectores ambientales, de acuerdo con el tipo de técnica empleada, pueden ser clasificados en bioensayos y biosensores. Los bioensayos fueron la primera herramienta biológica en ser aplicada al campo ambiental. Básicamente constituyen procedimientos que emplean diversos materiales vivos para estimar la toxicidad potencial de una sustancia o de una matriz contaminada. Un bioensayo se define genéricamente como un experimento enfocado a investigar el papel

de alguna sustancia en un contexto biológico, ecológico o evolutivo, empleando organismos o sistemas vivos (Mozaz, et al: 2005, 291-297). Mientras que el término biosensor se aplica a un sistema analítico que acopla un elemento biológico sensible asociado a un sistema de transducción, el cual permite detectar y medir de manera rápida, proporcional, precisa y sensible la señal producida por la interacción del elemento biológico y la sustancia de interés (Castro-Ortíz, et al: 2007).

En los últimos 10 años los biosensores han sido integrados a los programas de control de contaminantes, implementándolos en sistemas de seguridad ambiental en dos formas:

1. Métodos de seguimiento capaces de predecir el posible peligro de efectos biológicos, como toxicidad, pudiendo medir una gran cantidad de contaminantes en cortos períodos de tiempo.
2. Métodos de cribado (screening) que sirven para detectar la presencia de algún compuesto contaminante.

Los sensores representan alternativas a los instrumentos de análisis convencionales. El arreglo de un sensor de fibra óptica basado en el método sol-gel tiene dos características muy importantes:

1. El análisis en el sitio y en tiempo real. Lo cual se traduce en un resultado de mayor confiabilidad, ya que evitamos que la sustancia pierda sus características de origen, debido al traslado de esta. La detección temprana nos permite tomar medidas de prevención y mitigación.
2. El sol-gel es un material inerte, es decir presenta resistencias a medios muy hostiles que muchos sensores basados en polímeros no tienen (Valcárcel y Luque de Castro: 1994, 32-55).

## Definición de fibra óptica

Una fibra óptica es un medio físico dieléctrico que transporta información en forma de luz, o sea, en ondas electromagnéticas guiadas paralelas al eje de la fibra. Se compone de un núcleo en donde se efectúa la propagación de la luz, una cubierta óptica o revestimiento necesaria para que se lleve a cabo el mecanismo de propagación y uno o más recubrimientos de protección mecánica (figura 1) (Vázquez: 2011, 163-188).

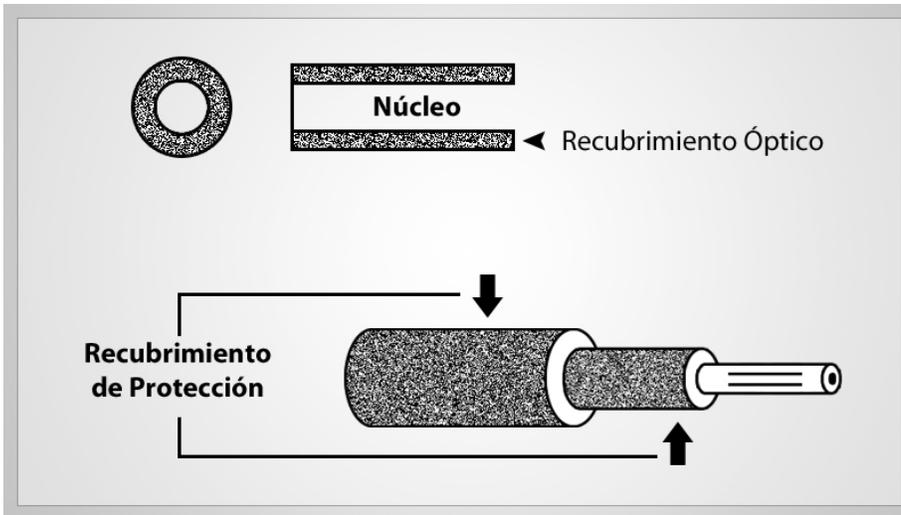


Figura 1. Representación de una fibra óptica (Vázquez, 2011).

Las fibras son hechas de vidrio, consistiendo en silicio o un silicato ( $\text{SiO}_2$ ). El núcleo debe tener un índice de refracción mayor que el revestimiento, para que exista la propiedad de reflexión interna total. Los óxidos de dopados tales como  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  son adicionados al silicio para obtener la diferencia entre los índices de refracción (Vázquez: 2011).

Los sensores de fibra óptica son más conocidos dentro de la comunidad científica como óptodos, mencionado por primera vez por investigadores alemanes Optiz y Lübbers haciendo referencia a un sistema óptico de medida de  $\text{CO}_2$  (Wolfbeis y Bernhard: 2006, 95-111). Algunas propiedades características de los óptodos (Marazuela: 1997, 103-109) en el medio ambiente son:

- *No requieren señal de referencia.* A diferencia de los electrodos potenciométricos y amperométricos que miden diferencias absolutas de potencial, los óptodos no necesitan una señal de referencia.
- *Posibilidad de construir sensores remotos.* La utilización de fibras ópticas de baja pérdida como guías de luz, posibilita la medida a grandes distancias, facilitando el acceso del sensor a los lugares de medida. Las grandes profundidades en lagos o medios expuestos a interferencias electromagnéticas o radiación ionizante, al contrario que en sensores eléctricos convencionales, no constituyen un problema para estos sistemas, ya que la distancia entre el terminal

sensible y el transductor puede adaptarse a las condiciones de medida sin que ello suponga pérdida de información.

- *Medición multiparamétrica.* Debido al gran ancho de banda de las fibras ópticas, es posible transmitir mucha más información que los cables eléctricos. Esto es, las señales ópticas que se originan por la presencia de diferentes analitos en la muestra pueden diferir unas de otras en longitud de onda, fase, modulación de intensidad o polarización, por lo tanto se puede hacer un multiplexado de estas señales para que se pueda tener un sensor multiparamétrico.
- *Terminales sensibles fácilmente intercambiables.* El análisis multiparamétrico puede llevarse a cabo también por intercambio de terminales sensibles específicos, cuyos indicadores basados en el mismo principio de medida permitan la utilización de un solo dispositivo instrumental. Esta ventaja de los sensores químicos de fibra óptica es particularmente útil en Química Clínica, ya que facilita la esterilización de los terminales y posibilita la utilización de sensores desechables (Bustamante: 2001, 55-59).

## Propagación

A las ondas luminosas se les referencia por su longitud de onda, que está relacionada con la frecuencia mediante la expresión  $\lambda = c/f$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $c$  la velocidad de la luz y  $f$  es la frecuencia.

Como la luz es una forma de onda electromagnética, sus propiedades han de ser descritas a partir de las ecuaciones de Maxwell. El método riguroso de cálculo de la intensidad y la fase de una onda luminosa implica, entonces, utilizar dichas ecuaciones. Ahora bien, debido a que la longitud de ondas de las ondas electromagnéticas que se propagan (infrarrojo y visible) es muy pequeña, el estudio de la propagación en el interior de la fibra puede efectuarse con el modelo simplificado de rayos luminosos y leyes de la óptica geométrica (López-Higuera: 2002, 89-98).

De esta forma, el estudio de la llegada de la onda o rayo luminoso a la superficie de separación entre dos medios con diferente índice de refracción, se puede realizar de dos formas:

- A. Como una onda óptica, donde deberá resolverse la ecuación de onda, la cual impone las condiciones de contorno.

- B. Como un rayo luminoso, mediante la ley de Snell y la reflexión total (Wolfbeis y Bernhard, 2006).

## Aspectos generales de la fibra óptica

Con el desarrollo de la fibra óptica a finales de los años 60, se consiguieron sistemas prácticos de comunicaciones ópticas. Pronto estas tecnologías desarrolladas para las comunicaciones ópticas, se unieron a las tecnologías de detección óptica, permitiendo la introducción de las fibras ópticas como elementos de guías de onda para los sensores ópticos, y desde entonces han mostrado un progreso continuado y se han desarrollado enormemente (López-Higuera: 2002). La aplicación de fibras ópticas tanto para transportar la señal como para operar como elemento activo del sensor (transductor) hace posible que los sistemas ópticos puedan miniaturizarse (lo que los hace compactos y portátiles aptos para su uso en campo), aumentar su sensibilidad y utilizar fuentes de radiación más potentes e idóneas. La avanzada tecnología de bajo coste disponible es crucial para el éxito de los sistemas de sensores ópticos, que pueden aprovecharse de la tecnología de fibra y los métodos de fabricación de dispositivos producidos para telecomunicaciones (Alois: 2001, 203-209).

El principal esfuerzo de los investigadores se ha realizado en producir un conjunto de técnicas basadas en fibra óptica que puedan usarse para una amplia variedad de propósitos, proporcionando una buena base para una tecnología de medida efectiva que pueda complementar los métodos convencionales. Esta es la clave del éxito de los sensores de fibra óptica: la toma de medidas en situaciones difíciles para ambientes específicos, donde el uso de los sensores convencionales no es posible.

## Ventajas y desventajas de la fibra óptica

Las principales ventajas que la tecnología de fibra óptica pone al alcance de los investigadores para su uso en sensores incluyen:

- Fibras de telecomunicaciones baratas.
- Fuentes infrarrojas disponibles: LED's, diodos láser. Posibilidad de usar fibras láser.
- Amplio rango de láseres que se pueden acoplar a fibras de forma razonablemente efectiva.

- Amplio rango de detectores: dispositivos p-i-n, fotodiodos de avalancha, etc.
- Disponibilidad de nuevos sistemas ópticos u ópticos integrados (Grattan:1997, 109-119).

Sin embargo, existe una serie de problemas tecnológicos que hacen que la situación ideal no sea aplicable tan fácilmente:

- Las fibras de telecomunicaciones son a menudo inapropiadas para su aplicación como sensores: necesitan diámetros/aperturas numéricas mayores, las fibras exóticas son caras por su producción en pequeñas tiradas, las fibras con mayores diámetros son caras y poco flexibles.
- Las pérdidas por curvatura de la fibra afectan a sensores basados en medidas de intensidad.
- Las fuentes láser son a menudo difíciles de acoplar con las fibras ópticas: muchos diodos láser o LEDs tienen ángulos de emisión anchos y numerosos láseres proporcionan una potencia limitada en las bandas útiles.
- Muchas fuentes láser en el visible medio o el infrarrojo son grandes, caras e inadecuadas para el uso y acoplamiento con fibras.
- Las fibras de telecomunicaciones tienen un rango de temperatura limitado: típicamente el límite superior está en 100-150°C mientras que muchas aplicaciones requieren temperaturas mayores de 200°C.
- Los métodos de acoplamiento mecánicos en sensores extrínsecos pueden ser complejos o no fiables, especialmente con cambios medioambientales.
- Las fibras dopadas son caras y limitadas en dopantes disponibles, que están regidos por las necesidades en telecomunicaciones (Er, Nd).
- Las fibras láser, prometedoras como fuentes, son caras y son principalmente infrarrojas o rojas, o se requiere un equipo complejo de doblado de frecuencia.

- Necesidad de montaje a mano de los sensores: alto coste asociado a muchos de ellos.
- Es necesario un adiestramiento para el personal para familiarizarse con las nuevas técnicas (Grattan:1997).

Como resultado de todo esto, a la hora de desarrollar los sensores es necesario alcanzar una serie de compromisos prácticos en especificaciones, materiales, respuesta, tamaño del sensor y robustez, etc. Esto puede fijarse para llegar a definir lo que debe ser un sensor de fibra ideal. Las especificaciones ideales sólo serán practicables para unas ciertas aplicaciones, sin embargo merece la pena, para el caso particular de sensores de fibra óptica diseñados para explorar el medioambiente, intentar conseguir estos ideales aunque sólo algunos puedan adoptarse (Grattan:1997). Por todo ello, para aprovecharse al máximo de las ventajas disminuyendo al mínimo los inconvenientes un sensor debería:

- Operar en el infrarrojo o rojo para aprovechar la simpleza y el bajo coste de fuentes y detectores.
- Operar de forma intrínseca para evitar acopladores y no estar basados en medidas de intensidad para evitar pérdidas por acoplamiento o curvatura.
- No mostrar problemas con los niveles de potencia: suficientes fotones para una detección con bajo ruido.
- Usar fibra de telecomunicaciones y minimizar la necesidad y el número de acopladores.
- Operar en un rango de temperaturas  $T < 150^{\circ}\text{C}$ .
- Ser insensible a cualquier otro parámetro en la medida de lo posible.
- Ser barato y fácil de fabricar automáticamente.

El potencial de los sensores de fibra óptica es significativo. Se ha visto que a medida que el coste de los componentes claves disminuye y el número de componentes más baratos se amplía, el potencial para un mayor mercado y calidad de los componentes aumenta (Herrera: 2005, 141-153).

## Tipos de fibra óptica

Dependiendo del tipo de propagación de la señal luminosa en el interior de la fibra, éstas se clasifican en los siguientes grupos:

1. Multimodo
2. Monomodo

En una fibra monomodo, la luz puede tomar un único camino a través del núcleo, que mide alrededor de 10 micras de diámetro. Las fibras multimodo tienen núcleos entre 50 y 1000 micras. Las fibras monomodo son más eficaces a largas distancias, pero el pequeño diámetro del núcleo requiere un alto grado de precisión en la fabricación, empalme y terminación de la fibra (Krohn: 1988, 53-77).

La fibra óptica también se clasifica en función del índice de refracción, siendo de dos tipos:

- a. Salto de índice
- b. Índice gradual

En las fibras de índice gradual, el índice de refracción es inferior en las proximidades del revestimiento que en el eje de la fibra. Las ondas luminosas se propagan ligeramente más lentas en las proximidades del eje del núcleo que cerca del revestimiento.

Atendiendo al material de la fibra, éstas pueden clasificarse:

- a. Fibras de vidrio
- b. Fibras de material plástico

Estas últimas se utilizan para comunicaciones a muy cortas distancias. Suelen emplearse para interconexión de equipos situados en un mismo edificio, conexión de equipos digitales de audio y en pequeñas redes de ordenadores.

Dentro de las dos primeras clasificaciones generales (tipo de propagación e índice de refracción), tenemos tres tipos básicos de fibra óptica:

- a. Fibra multimodo de salto de índice
- b. Fibra multimodo de índice gradual
- c. Fibra monomodo

Generalmente se utilizan las fibras multimodo en la primera y segunda ventanas, y monomodo en la segunda y tercera ventanas (Krohn: 1988).

## Fibra multimodo de salto de índice

El guiado de la señal luminosa está causado por la reflexión total en la superficie de separación entre el núcleo y el revestimiento. El índice de refracción presenta un perfil definido por la expresión siguiente:

$n = n_1 (1 + \Delta)$  (siendo el  $\Delta$  incremento del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento)

En este tipo de fibra la apertura numérica, NA, puede aproximarse a la expresión:  $NA = \sqrt{2\Delta}$ . Valores típicos de NA se encuentran entre 0,2 y 0,5.

Las señales incidentes con un ángulo cuyo seno sea inferior a la apertura numérica provocan la aparición de multitud de modos (o dicho de forma más intuitiva de multitud de rayos y ángulos de reflexión) propagándose por el interior de la fibra (Figuras 2 y 3). Esta es la razón del término multimodo para describir el tipo de fibra.

El núcleo de este tipo de fibras tiene un diámetro entre 50 a 1000  $\mu\text{m}$ . Este núcleo tan grande implica que se propaguen varios modos. Los diferentes caminos dan lugar a la dispersión modal, o sea, el ensanchamiento temporal de la luz cuando viaja a través de la fibra. La dispersión es un mecanismo que limita el ancho de banda o la cantidad de información que la fibra es capaz de transportar.

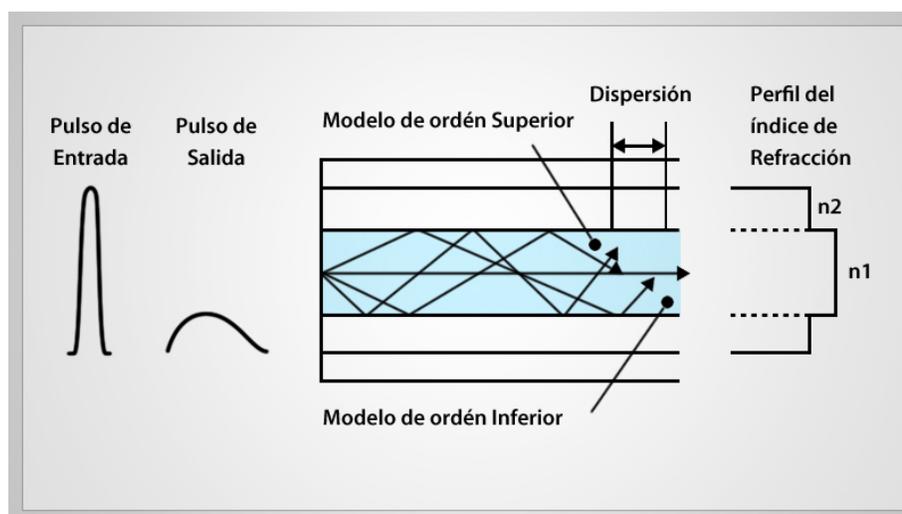


Figura 2. Fibra multimodo (Krohn: 1988).

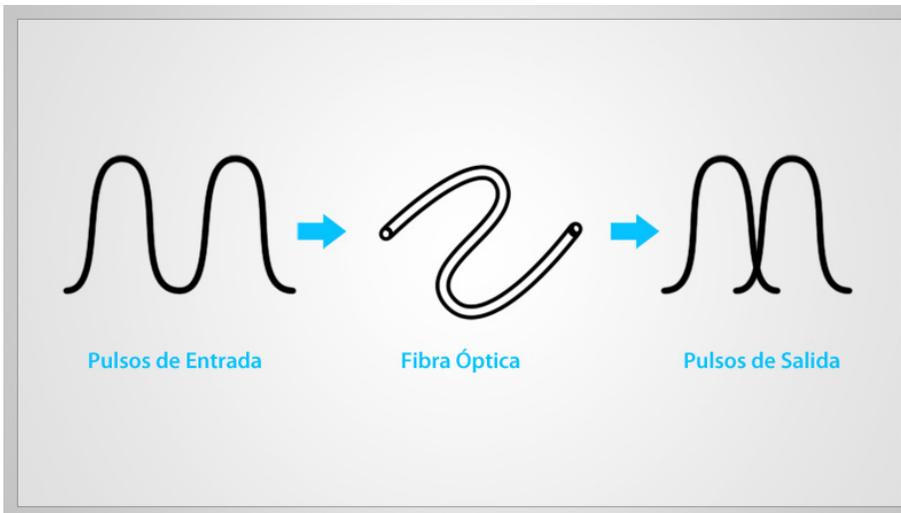


Figura 3. Dispersión (Krohn: 1988).

Estas fibras pueden clasificarse a su vez en función de su composición:

1. Vidrio/Vidrio: cubierta y núcleo de vidrio.
2. Plástico/Vidrio: cubierta de plástico y núcleo de vidrio.
3. Plástico/Plástico: cubierta y núcleo de plástico.

Este tipo de fibras son las más utilizadas en enlaces de distancias cortas, hasta 1 km. y su aplicación más importante está en las redes locales.

### Fibra multimodo de índice gradual

En este caso el cambio de índice de refracción en el interior de la fibra es gradual, lo que provoca una propagación ondulada del rayo de luz (figura 4).

Las fibras de índice gradual comprometen la eficiencia en el acople para tener mayor ancho de banda. Se hace esto dando al núcleo un índice de refracción no uniforme en todo su perfil.

La variación del índice de refracción en el perfil de la fibra da lugar a que la luz se propague según una trayectoria curva, en lugar de a tramos rectos como en las fibras de salto de índice. El mayor recorrido del rayo se compensa por la mayor velocidad de propagación ( $V=c/n$ ) en la región exterior del núcleo.

En estas fibras el ángulo de aceptación depende de la distancia al eje del núcleo, siendo máximo en el centro y cero en la frontera con

el revestimiento. Sin embargo, la apertura numérica (NA) de las fibras de índice gradual se define de la misma forma que en las de salto de índice:

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

La **NA** tiene un valor típico de 0,2 para estas fibras.

La mayoría de las fibras de índice gradual tienen un núcleo con diámetro de entre 50  $\mu\text{m}$  y un revestimiento con 125  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Estas fibras provocan menos modos de propagación que las de salto de índice, reduciéndose la dispersión, y con ello un aumento del ancho de banda. Estas fibras son empleadas hasta distancias de 10 km.

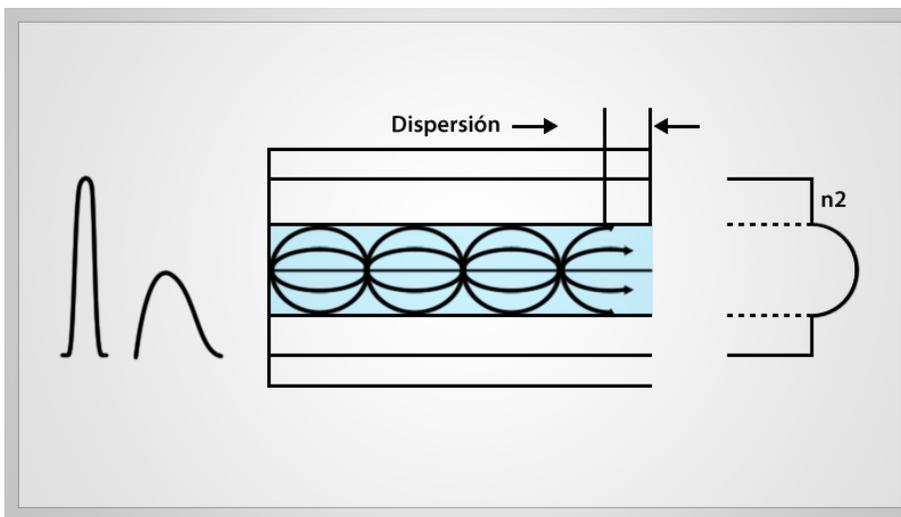


Figura 4. Fibra multimodo de índice gradual (Krohn: 1988).

## Fibras monomodo

Cuando se requieren anchos de banda muy grandes se usan fibras monomodo. Estas fibras, en su construcción más simple, son iguales a las multimodo de salto de índice, solo que el diámetro del núcleo es muy pequeño (5-12  $\mu\text{m}$ ), pudiéndose propagar un sólo modo.

La dispersión modal es muy baja, alrededor de solo decenas de picosegundos (10–12 segundos) por kilómetro, con lo que los anchos de banda son excepcionales y las pérdidas bajas, siendo adecuadas para largas distancias o comunicaciones de alta velocidad (Krohn: 1988).

Es el caso conceptualmente más simple, ya que se trata de una fibra de salto de índice pero de un diámetro del núcleo tan pequeño

(inferior a 10 micras) que solo permite la propagación de un modo, el fundamental (Figura 5).

Este tipo de fibra es el que permite obtener mayores prestaciones y se usa en enlaces de gran distancia. Estas fibras presentan no obstante, algunas desventajas como la mayor dificultad para inyectar la señal luminosa a la fibra (apertura numérica típica de 0.1 @ ángulo de incidencia de  $12^\circ$ ), mayor sensibilidad a errores mecánicos, malos tratos, empalmes defectuosos, etc. La dificultad de inyección de señal se soluciona utilizando fuentes de luz láser (Krohn: 1988).

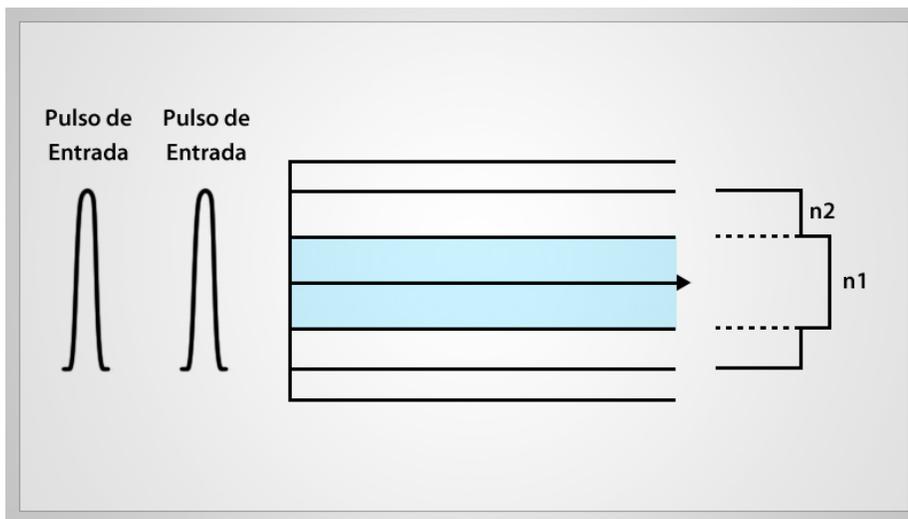


Figura 5. Fibra monomodo (Krohn: 1988).

## Sensores de fibra óptica para el monitoreo de parámetros medioambientales

Las aplicaciones de los sensores de fibra óptica corresponde a las tareas de monitorización ambiental, el control de procesos industriales, la biomedicina. Se han desarrollado ya con éxito sensores ópticos para la monitorización de oxígeno molecular, dióxido de carbono, pH, hierro, sulfuro de Hidrógeno, alcoholes, humedad, temperatura, detergentes, aceites, pesticidas, glucosa, acetil colina y colesterol, además de la unión de los sensores ópticos con moléculas biológicas (enzimas, anticuerpos, ADN) se construyen los biosensores, los cuales son empleados en diferentes áreas como diagnósticos médicos, aplicaciones biológicas (detección de bacterias), monitoreo del agua y aire (Espinoza, et al: 2007, 797-859).

La clara demanda que existe de métodos de exploración que operen in-situ y de forma continua conlleva que las potenciales aplicaciones medioambientales de los sensores en general y de sensores de fibra óptica en particular sean:

- Análisis medioambiental como medidas puntuales.
- Monitorización continua del objetivo.
- Sistemas de alarma precoz.
- Sistemas de control medioambiental.
- Sistemas de protección medioambiental.

Se pueden clasificar las aplicaciones de detección medioambiental de acuerdo con el área que se va monitorizar: sensores domésticos, monitorizaciones industriales dentro de edificios, sensores al aire libre y en el espacio, sensores marinos o de pureza de agua (López-Higuera: 2002).

La estrategia apropiada para la monitorización medioambiental es fuertemente dependiente del analito a detectar, el medio que contiene la sustancia de interés, la accesibilidad del área a analizar, la peligrosidad de los entornos circundantes, la calidad deseada de la información obtenida, y de la legislación vigente. Cada paso desde la identificación de un problema de contaminación hasta la limpieza y la potencial monitorización posterior requieren diferentes tipos de técnicas de análisis que ponen de manifiesto los potenciales campos de aplicación de sensores en la monitorización medioambiental.

Cuando se identifica una zona contaminada, es esencial una caracterización extensiva del lugar, incluyendo la naturaleza y nivel de la contaminación. Son necesarias técnicas de análisis y herramientas de diagnóstico para identificar contaminantes esperados y desconocidos. El análisis de los datos obtenidos nos dará las especificaciones de los contaminantes (Herrera: 2005).

Estas medidas requieren normalmente la toma de numerosas muestras discretas, que se analizarán de forma discontinua para conocer la presencia o ausencia de contaminantes.

La demanda de explorar el campo y de tener dispositivos portátiles acentúa el uso de métodos en laboratorio miniaturizados aplicables en campo, así como sensores capaces de proporcionar el análisis in-situ. Esta última característica es una ventaja de gran valor cuando se considera la determinación de compuestos orgánicos volátiles, especialmente en fase acuosa, ya que el análisis in-situ sin procedimientos

de toma de muestras hace que los errores debidos a la evaporación del analito o cambios en las condiciones del medio puedan minimizarse.

Una monitorización constante de los contaminantes es crítica para continuamente adaptar dicho proceso así como para disminuir los costes mediante la minimización de esfuerzos de corrección si se alcanza el nivel de limpieza deseado (Herrera: 2005).

Dependiendo de las medidas legislativas, puede ser obligatorio un tratamiento o una monitorización posterior. En ese caso, sensores *in-situ* que actúen como dispositivos de umbrales de alarma serían altamente efectivos en tiempo y coste comparados con el análisis clásico de laboratorio. La robustez, fiabilidad y el ser inertes a influencias electromagnéticas hace a los sensores de fibra óptica candidatos ideales para esas tareas. Otra área de interés para sistemas de análisis que operan de manera continua es la observación a largo plazo de parámetros medioambientales, como la contaminación del agua causada por considerables cantidades de fertilizantes agrícolas, herbicidas y pesticidas o por la entrada de aguas residuales industriales (Herrera: 2005).

Se demandan sensores para determinar parámetros como oxígeno, pH, dióxido de carbono, amoníaco, nitratos, PAH, etc., puesto que dispositivos de monitorización facilitan el control de la calidad del agua y la regulación de los umbrales de alerta medioambientales en caso de accidente. Los lugares de aplicación para dichos sistemas son estaciones de monitorización continua en ríos, estuarios y aguas costeras superficiales. Debido a su versatilidad y flexibilidad los sensores de fibra óptica representan una alternativa atractiva a las medidas electroquímicas establecidas (Herrera: 2005).

## Óptodos aplicados al análisis de aguas

Entre 1984 y 1986, la EPA (Environmental Protection Agency, agencia de protección del medio ambiente estadounidense) publicó una serie de informes en los que se incluía la valoración y mejora de la calidad del agua con objeto de proteger la salud pública y el ecosistema. Los puntos más destacados en estos informes fueron el endurecimiento de las medidas adoptadas por cada Estado sobre la calidad de las aguas y la creación de una organización encargada de vigilar el cumplimiento estricto de las normas establecidas por la EPA (Bustamante: 2001).

En 1994, en el seno del IV Programa Marco de I+D de la Unión Europea, en el subprograma de Medio Ambiente, se establecieron dos objetivos prioritarios: (a) identificar y evaluar los efectos de la actividad

humana sobre el ecosistema y (b) contribuir al desarrollo tecnológico necesario para la observación, monitorización e investigación del medioambiente, incluyendo las metodologías y tecnologías para la vigilancia, prevención y gestión de los riesgos naturales. En este último punto, la unión europea hace especial hincapié en el desarrollo de sensores en todas aquellas aplicaciones donde los sistemas convencionales de medida están limitados por sensibilidad, selectividad, precisión, fiabilidad y/o coste, así como en procesos industriales que contemplen una producción menos contaminante. En la actualidad y hasta el año 2002, está en vigor el V Programa Marco (1999) en el que se vuelve a remarcar la necesidad de un control de la contaminación de los recursos hídricos a través de la analítica de las aguas y los sistemas de vigilancia de fuentes contaminantes puntuales o accidentales (Bustamante: 2001).

Tradicionalmente, el control de la calidad del agua se ha llevado a cabo mediante las imprescindibles tomas de muestra y su posterior traslado a los laboratorios de análisis, donde gracias a las actuales técnicas analíticas, tales como la espectroscopía de absorción atómica (AAS), la cromatografía de gases (GC), la cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) y la espectrometría de masas (MS), se detectan y cuantifican todo tipo de sustancias contaminantes.

Los principales analitos a monitorizar en el agua son: pH, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, contaminantes orgánicos, metales pesados y radiactivos.

La monitorización a distancia de contaminantes en aguas subterráneas es un campo donde el empleo de fibra óptica ofrece grandes ventajas, como es la de poder dirigir la fibra hacia el punto de interés aunque sea a grandes profundidades. El primer sensor luminiscente de pH fue desarrollado por Saari *et al.* (1982), la fase reactiva del sensor, fluoresceinamida, atrapada en un polímero de acrilamida, se inmoviliza covalentemente en el extremo de una fibra óptica. Las principales ventajas de este óptodo son corto tiempo de respuesta al no tener membrana y amplio intervalo de trabajo (pH 2-9) al tener el indicador dos constantes de acidez sucesivas. Su principal inconveniente es su pobre precisión (Pérez: 2001, 130-140).

Siempre que la concentración de una sustancia en las aguas esté legislada, se hace necesaria la optimización de un método de medida, que suele aparecer junto con los límites permitidos de la concentración de esa especie. Generalmente, los métodos de laboratorio permiten medir un número muy elevado de analitos con un coste inferior al que supondría utilizar sensores de fibra óptica, los cuales habitualmente están desarrollados para la medida de un único parámetro.

Para que un sensor de fibra óptica pueda reemplazar a los tradicionales métodos de medida, es necesario que los óptodos introduzcan mejoras en diversos parámetros analíticos, como la sensibilidad, selectividad, precisión y tiempo de respuesta. Además, deben ser competitivos en cuanto a costes de mercado con los métodos ya implantados, lo cual se suele lograr cuando se fabrican óptodos multiparamétricos.

## Conclusiones

El estudio del desarrollo de sensores de fibra óptica es de gran importancia debido a que el uso de estos sensores es de forma continua e in situ para el monitoreo de las concentraciones de diferentes analitos a nivel medioambiental. Empleando la fibra óptica en conjunto con algún medio utilizado como dopante, abre un nuevo campo de investigación en la cual el uso de métodos químicos para el análisis de algunos parámetros físicos medioambientales provocan contaminantes al medio haciendo mayor referencia a los análisis de agua y suelos. El uso de estas sustancias químicas en ocasiones son nocivas y agresivas a los ecosistemas, de ahí la importancia de utilizar un sensor de fibra óptica que proporcione datos confiables para poder aplicar soluciones que mitiguen los riesgos que existan.

## Bibliografía

**Alcocer Durand, J.** (1998). *Contaminación de aguas continentales. Destrucción del hábitat*. Coordinado por G. Toledo Cortina y M. Leal Páez. México: UNAM-PUMA. Pp. 127-129.

**Alois T.** (2001). *Modern sensors handbook*. S.f., edited by Pavel Ripka. Pp. 203-209.

**Bustamante Álvarez N.** (2001). *Sensores de temperatura pH y detergentes para control medioambiental con un prototipo que utiliza fibra óptica y luminiscencia con resolución de fase*. Tesis de Doctorado. Universidad Complutense de Madrid. Pp. 55-59.

**Bustos Flores, C. y Chacón Parra, G. B.** (2009). *El desarrollo sostenible y la agenda 21*. Telos, Universidad Rafael Beloso Chacín, Vol. 11, Num.2, Venezuela, pp. 164-181.

**Castro-Ortiz.** (2007). *Estado del arte y perspectivas del uso de biosensores ambientales en México*. Rev. Int. Contam. Ambient. 23 (1) 35-45.

**Díaz Barriga, F., G. Pedraza, R. Reyes, L. Carrizales y L. Yáñez.** (1998). *Contaminación por residuos peligrosos. Destrucción del hábitat*. Coordinado por G. Toledo Cortina y M. Leal Páez. México: UNAM-PUMA. Pp. 104-115.

**Durand P. V. Y Durand S.** (2004). *Valores y actitudes sobre la contaminación ambiental en México*. Reflexiones en torno al posmaterialismo, Revista Mexicana de Sociología, UNAM, 63(3): 511-530.

**Espinoza Bosch, A. J. Ruíz Sánchez, F. Sanchez Rojas and C. Bosch Ojeda.** (2007). *Recent Development in Optical Fiber Biosensors*. Sensors, 7, pp. 797-859.

**García, C. y Martínez, M.** (1978). *Técnicas de Seguridad e Higiene Industrial*. Editorial Mapfre, S.A. España. Pp. 70-75.

**Grattan K.T.V.** (1997). *Principles of optical fiber sensing for water industry applications*, Measurement 20(2), 109-119.

**Henry, G. y Heinke, W.** (1999). *Ingeniería Ambiental*. Prentice Hall, México, pp. 235-237.

**Herrera Díaz N.** (2005). *Desarrollo de sensores de fibra óptica para el control in situ de parámetros físicos del medio acuático*. Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid. Pp. 141-153.

**Krohn D.A.** (1988). *Fiber Optics Sensor, Fundamentals and applications Instruments*. Society of America. Capítulo 2. Pp. 53-77

**López-Higuera J.M.** (2002). *Handbook of optical fibre sensing technology*. John Wiley & Sons LTD. Pp. 89-98.

**Marazuela L. M. D.** (1997). *Diseño, caracterización y aplicación analítica de (bio)sensores de fibra óptica para la determinación de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y metabolitos de interés clínico*. Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid. Pp. 103-109.

**Mozaz R.S., López de Alda J.M., Marco M.P. y Barceló D.** (2005). *Biosensors for environmental monitoring: a global perspective*. *Talanta* 65, 291-297.

**Pérez C.** (2001). *Sensores ópticos*. Universidad de Valencia. Pp.130-140.

**Tyler Miller Jr. G.** (1994). *Ecología y Medio Ambiente: Introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la conciencia de conservación del planeta Tierra*. Edición Grupo Editorial Iberoamérica. México. Pp. 27-39.

**Valcárcel M., and Luque de Castro M.D.** (1994). *Flow through (bio) chemical sensors*. In Elsevier Science B. V. Capítulo I. Pp. 32-55.

**Vázquez R.A.** (2011). *Sensores químicos y de parámetros físicos basados en fibra óptica*. Colección Jaguar. UNICACH. Pp. 163-188.

**Wolfbeis S. and Bernhard M. W.** (2006). *Fiber optic chemical sensors and biosensors. A view back, in optical chemical sensors*, sringer, Chap. 2. Pp. 95-111.