

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN

2.1 La importancia de la desinfección de agua

El agua es el recurso más abundante del planeta Tierra, cubre cerca del 71% de su superficie. No obstante sólo cerca del 3% del volumen total es agua dulce, y la mayor proporción está en los hielos polares y en mantos subterráneos profundos. La demanda total de agua ha crecido aceleradamente en las últimas décadas y la extracciones de agua para uso y consumo humano han incrementado considerablemente (López, 2003).

En muchas partes de México y del mundo, las aguas subterráneas constituyen una de las principales fuentes de suministro tanto para uso doméstico como para el riego de tierras agrícolas. En México alrededor del 9.0 % del agua que se usa en industria, 14.0% en abastecimiento publico y 77.0 % al sector agropecuario (CONAGUA, 2006).

En México, la sobre explotación de acuíferos está impactando negativamente en la salud de los usuarios del líquido vital pues la extracción excesiva de agua a la que se encuentran sometidos, los contamina con sales tóxicas del subsuelo y con intrusión de agua salina del mar, lo cual afecta significativamente su calidad al contener adicionalmente organismos patógenos, químicos y fármacos provenientes de fuentes agrícolas y urbanas que provocan una gran variedad de enfermedades (Angeles *et al.*, 2004).

Las enfermedades transmitidas por la contaminación de los acuíferos y de otras fuentes de abastecimientos son ya una preocupación en México, pues en muchos casos el agua que de ellos se extrae no cumple con los límites que marca la norma de salud ambiental mexicana NOM 127-SSA1-1994. Por este motivo, en la actualidad se tengan registrados más de 20 padecimientos en los que el líquido vital actúa directa o indirectamente en su aparición, algunos con alto impacto en términos de morbilidad y mortalidad (Angeles *et al.*, 2004).

Tabla 2.1 Límites permisibles de características bacteriológicas y límites permisibles de características físicas y organolépticas

CARACTERISTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Fuente: Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994

Las aguas utilizadas en los procesos productivos retornan contaminadas a los cuerpos de agua. En la mayoría de los casos se deteriora su calidad para usos posteriores, inclusive la irrigación. Dependiendo del grado de contaminación, el agua residual puede ser nociva para la vida, causando por ejemplo, la mortandad de peces. También puede producirse una liberación de compuestos volátiles, que provocan mal olor y sabor acentuado, y que podrían traer problemas en una nueva operación de purificación y tratamiento del agua (Guimaraes *et al.*2001).

La remoción e inactivación de agentes patógenos microbianos en el agua potable es esencial para proteger la salud pública. Se estima que el 80% de las enfermedades y más de un tercio de las defunciones en los países en desarrollo están asociados con el uso y consumo de agua contaminada. El impacto de las enfermedades relacionadas con el agua es importante; todos los años gran número de individuos se enferman y mueren de estas enfermedades (Guimaraes *et al.*2001).

Tabla 2.2 Tasas mundiales de morbilidad y mortalidad de las principales enfermedades relacionadas con el agua.

Enfermedad	Número / Año	
	Casos de enfermedad	Defunciones
Cólera	297,000	4971
Fiebre tifoidea	500,000	25,000
Giardiasis	500,000	bajo
Amibiasis	48.000,000	110,000
Enfermedades diarreica(menos de 5 años)	1.600.000,000	3.200,000
Dracontiasis (gusano de Guinea)	2.600,000	-
Esquitosomiasis	200.000,000	200,000

Fuente: Gunther *et al.*, 1996

2.2 Procesos tradicionales de desinfección de agua

El proceso de desinfección de agua es el encargado de remoción y/o inactivar microorganismos patógenos presentes en el medio, minimizando la probabilidad de transmisión de enfermedades. En un proceso de desinfección tradicionalmente se utilizan compuestos químicos oxidantes, relativamente estables, los cuales se denominan desinfectantes (Herrera, 2006). Los desinfectantes químicos más comúnmente usados son el cloro libre, cloraminas, dióxido de titanio, dióxido de cloro y ozono. Otros desinfectantes como radiación UV, bromo, yodo y plata no se han empleado en forma generalizada. Cada uno de los desinfectantes que se emplean comúnmente tiene sus ventajas e inconvenientes

en función de su costo, eficacia, estabilidad, facilidad con que se aplique y formación de productos secundarios de la desinfección (Gunther *et al.*, 1996).

Entre los agentes químicos de desinfección más utilizados, se destacan el cloro libre (HOCl/OCl⁻), la mezcla de cloro con amoníaco (Cl₂/NH₃) que forman cloraminas, el dióxido de cloro (ClO₂) y el ozono (O₃). (Guther *et al.*, 1996).

2.2.1 Cloro libre

El cloro es el desinfectante de agua potable más comúnmente usado. Cuando se agrega al agua en forma de gas se produce la siguiente reacción:

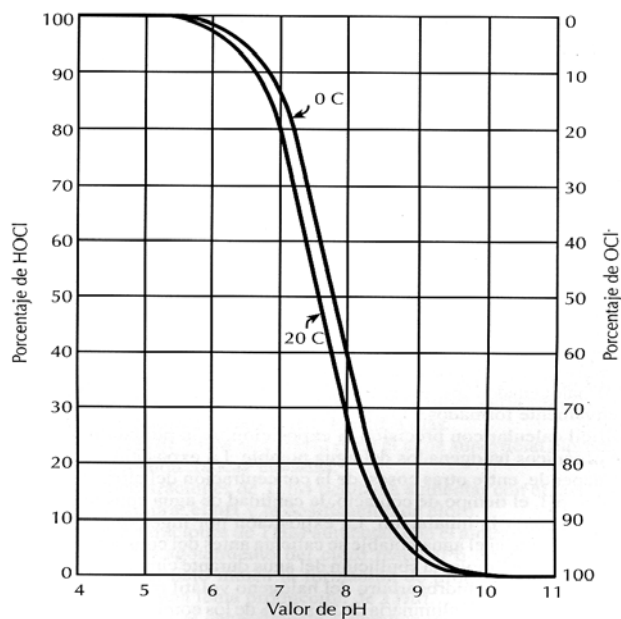
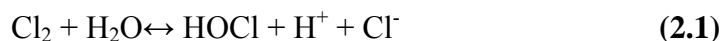
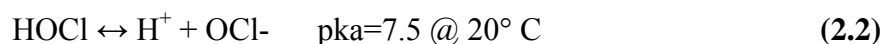


Figura 2.1 Distribución del ácido hipocloroso y del ion hipoclorito en el agua, a diferentes valores de pH y temperaturas

El ácido hipocloroso es un ácido débil que se disocia parcialmente en el agua de acuerdo a la siguiente reacción:



Entre todos los desinfectantes, la química y toxicidad del cloro han sido las más ampliamente estudiadas. Desde el descubrimiento de la formación de haloformas, es decir trihalometanos y ácidos haloacéticos, durante la cloración del abastecimiento de agua de Róterdam (Rook, 1974), se han identificado numerosos compuestos halogenados en el agua potable clorada y se ha evaluado su toxicidad (Gunther *et al.*, 1996).

2.2.1.2 Trihalometanos

Durante la adición de cloro libre para desinfección de agua, pueden producirse algunos compuestos no deseados tales como los trihalometanos (THMs). Los THM's se forman por la cloración acuosa de sustancias orgánicas, es decir, compuestos solubles secretados de las algas y compuestos nitrogenados que aparecen naturalmente. Los THMs consisten fundamentalmente de cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo. Cuando el bromuro está presente en el agua potable, el cloro lo oxida en ácido hipobromico (Gunther *et al.*, 1996).



De la misma manera, la presencia de yoduro puede conducir a la formación de clorobromoyodometanos mezclados. Se pueden formular algunas afirmaciones generales con respecto a los THM's en el agua potable clorada (Gunther *et al.*, 1996).

Tabla 2.4 Efectos de THM'S

Después de haber terminado el proceso de cloración la concentración de THM's aumentan con el almacenamiento.
El cloroformo se presenta en un 90 % de la concentración total de los THM's
Si el agua cruda contiene bromuro, pueden predominar los THMs bromados e incluso el bromoformo.
La remoción de THMs después de su formación es difícil y exige procesos que requieren muchos recursos, tales como la adsorción de carbono activado.
Los THM's se presenta en mayor cantidad en agua superficial clorada que en las aguas subterráneas cloradas.
La concentración de THM's aumentan ante el incremento de la temperatura.
La formación de THMs se puede reducir al mínimo si se evita la pre-coloración.

Fuente: Gunther *et al.*, 1996

2.2.3 Concepto Cxt

Se puede definir como la inactivación de una especie de microorganismo patógeno que es función de la concentración del desinfectante (C) y su tiempo de contacto (T). Otros factores importantes son el tipo de desinfectante, temperatura, pH, viabilidad de los microorganismos y presencia de organismos suspendidos (Uscanga, 2006).

El concepto *Cxt* establece que la eficiencia germicida de un desinfectante esta en función directa de la concentración del mismo y del tiempo de contacto empleado. Quizás la forma más clara de ejemplificar este concepto es recurriendo a la expresión propuesta por chick-watson para denotar inactivación de un microorganismo con desinfección química:

$$\lambda \ln (N/N_0) = -k$$

En donde

$$k = C^n xt^m$$

k = constante de un microorganismo específico bajo la exposición de condiciones específicas

n = variable (tipo de microorganismo)

m = variable (tipo de desinfectante)

C =concentración de desinfectante, mg/L

t = tiempo de contacto requerido para inactivar un porcentaje específico de microorganismos, min.

El valor Cxt permanece constante cuando $n=1$, sea cual sea la concentración de desinfectante; también, la concentración y tiempo de contacto son de igual importancia. El valor n es determinado por análisis experimentales a una variedad de microorganismos donde el rango es 0.5-2.0.

Todos los desinfectantes químicos son influenciados por la temperatura del agua y se estima que la tasa de inactivación puede duplicarse por cada 10° C que incrementa la temperatura del agua. De los desinfectantes con cloro, el cloro libre es el más influenciado por el pH debido a la disociación de éste en HOCl y OCl⁻. El ácido hipocloroso (HOCl), es el más fuerte desinfectante de la especie, está presente en una proporción de 98% a pH 6 y los iones hipoclorito (OCl⁻), es el más débil, y está presente en una proporción de 99% a pH 10.0. En un valor intermedio de pH, las dos especies químicas están en equilibrio. En general, el orden de resistencia que presentan los microorganismos a los desinfectantes químicos de mayor a menor es: bacterias, virus, protozoarios y huevos de helmintos. Aún

cuando en la misma especie puede variar la resistencia entre los cultivados en el laboratorio y los encontrados en el ambiente (Uscanga, 2006).

2.2.4 Cloraminas

Las cloraminas son compuestos químicos que resultan de la combinación de cloro y amoníaco. La monocloramina (NH_2Cl) quizá es la cloramina más activa para la desinfección de agua potable. Además de su moderada eficiencia germicida, la monocloramina es estable en agua y por ello provee un efecto residual en la desinfección de agua potable previniendo el crecimiento biológico en tanques de almacenamiento y líneas de distribución. Adicionalmente, se ha observado que aquellos sistemas que emplean la cloraminación, la presencia de triclorometano es muy baja (Glenn *et al.*, 2004).

El cambio de desinfectantes de cloro libre a cloraminas es un esfuerzo para reducir las concentraciones de los "subproductos de desinfección" denominados trialometanos (THM) y ácidos haloacéticos (Herrera, 2006).

Este cambio fue una respuesta efectiva a los nuevos y más rigurosos estándares nacionales establecidos por la EPA en Estados Unidos de Norteamérica. Ello, a consecuencia de que la exposición crónica a altas concentraciones de dichos subproductos de desinfección se descubrió como potencialmente carcinogénica. Ya que el cloro libre en el agua potable es particularmente tóxico para los seres humanos, se han establecido un valor guía (VG) de 5 mg/litro para el cloro residual. Sobre la base del umbral de gusto y olor del cloro libre, es

sin embargo dudoso que los consumidores toleren un nivel de cloro tan alto (Agencia de Protección Ambiental, 1994).

El VG para el cloro en función de la salud no debe interpretarse como un nivel exigible, ni siquiera deseable, de la cloración. Por consiguiente, los servicios públicos de agua deben agregar sólo una apropiada concentración de cloro, que sea suficiente para inactivar los agentes patógenos transmitidos por el agua, teniendo en cuenta la fuente del agua, su temperatura y pH, y el tiempo de contacto (Agencia de Protección Ambiental, 1994).

Según el Manual para Desinfectantes y Oxidantes Alternativos de la US EPA, el límite máximo de contaminación (MCL) para cloro libre es de 4.0 mg/l. Tiene un bajo costo y un efecto residual controlable, que ayuda a mantener desinfectada el agua durante su almacenamiento y transporte. No obstante, observa la desventaja de la probable formación de compuestos orgánicos clorados (Agencia de protección Ambiental, 1994).

2.2.5 Dióxido de cloro

El dióxido de cloro (ClO_2) se genera a partir de la acidificación de una solución de NaOCl, produciendo un compuesto verde claro. No produce trihalometanos (THM's) pero a cambio genera cloritos (ClO_2^-) y cloratos (ClO_3^-), ambos subproductos causantes de anemia (Gunther *et al.*, 1996).

2.2.6 Ozono

El ozono (O_3) es un poderoso oxidante y eficiente bactericida, que se utiliza ampliamente como desinfectante de agua potable desde hace mucho tiempo. Su uso ha permitido un notable mejoramiento del sabor, color, características de filtración y biodegradabilidad de la misma. Este compuesto es muy eficiente en bajas concentraciones y más efectivo que el cloro y el dióxido de cloro para la inactivación de bacterias, protozoarios y virus. A pesar de que no produce trihalometanos, el ozono tiene la desventaja de formar compuestos bromados si el agua contiene bromuros, aldehídos o cetonas. Además su costo es más elevado que otros procesos ya que se necesita un equipo especializado para su inyección y absorción de agua. El uso de dos o más oxidantes combinados permite aprovechar los efectos sinérgicos entre ellos, lo que potencializa la destrucción de los contaminantes orgánicos y biológicos. Entre las posibles mezclas de agentes oxidantes, la combinación peróxido de hidrógeno y ozono es la más usada (Herrera, 2006)

2.3 Radiación solar

La radiación solar que incide sobre la superficie terrestre ha sido aprovechada doméstica e industrialmente por el ser humano, ya sea en el calentamiento de agua, en el secado de productos agrícolas, la climatización, calefacción de habitaciones, entre otras muchas aplicaciones. En México sería de gran beneficio la utilización de esta fuente de energía para el ahorro de hidrocarburos y debido a que es una zona de gran insolación teniendo un promedio diario de energía solar recibida al año de $5.5 \text{ kW h/m}^2 \cdot \text{día}$, que medida en

dimensiones de terreno, duplica a la recibida por los Estados Unidos (Herrera, 2006).

La radiación solar es la combinación de radiaciones de muy diversas energías: las más débiles son las de mayor longitud de onda (λ) (infrarroja), mientras que las más potentes tienen una longitud de onda pequeña (ultravioleta). De todo este intervalo, los ojos del ser humano sólo pueden percibir la fracción visible (400- 700 nm). En la Figura 2.2 se ilustra el espectro solar y su tres zonas: radiación UV ($\lambda < 400$ nm), espectro visible ($400 < \lambda < 700$ nm), y radiación infrarroja ($\lambda > 700$ nm) (Herrera, 2006).

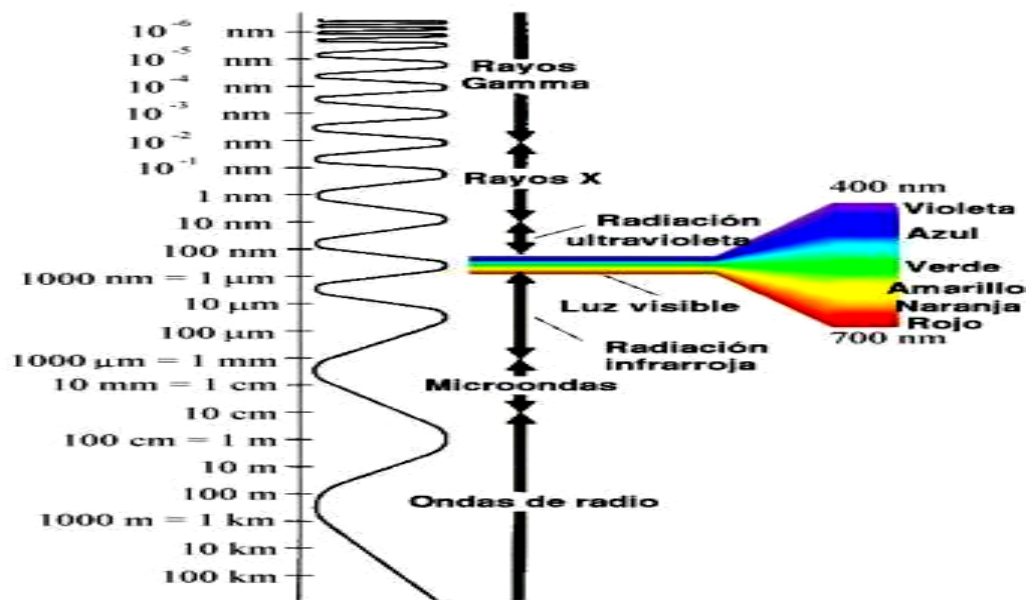


Figura 2.2 Espectro electromagnético para radiación solar (www.laeff.esa.es)

2.4 Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta, es emitida por el sol en las formas UV-A, UV-B y UV-C pero a causa de la absorción por parte de la atmósfera terrestre, el 99% de los rayos ultravioleta que llegan a la superficie de la Tierra son del tipo UV-A, que es la continuación de la radiación visible y es responsable del bronceado de la piel. Su longitud de onda varía entre 400 y 320 nm. El tipo UV-B llega a la Tierra muy atenuada por la capa de ozono, varía entre 280 y 320 nm y es muy peligrosa para la vida en general, ya que en caso de exposiciones prolongadas de la piel y los ojos pueden producir cáncer de piel, melanoma, cataratas o debilitamiento del sistema inmunológico. La radiación UV-B representa sólo el 5% de la UV y el 0.25% de toda la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra y finalmente el tipo UV-C es en teoría la más peligrosa para el hombre, pero afortunadamente es absorbida totalmente por la atmósfera, por lo tanto no produce daño. Una alternativa creciente para la desinfección de agua potable y residual es la radiación UV, siendo la más eficiente de estos métodos para la inactivación de bacterias, virus y protozoarios. No forma subproductos durante la desinfección, ni tiene efectos residuales en el agua por lo que ocasionalmente es necesario añadir al final otros desinfectantes clorados para evitar la reinfeción (Herrera, 2006).

2.5 Fotocatálisis y fotocátalisis heterogénea

La fotocátalisis es un proceso que utiliza la energía de la radiación solar para interrumpir los lazos químicos en los materiales al nivel atómico para acelerar una reacción química en el cual se encuentra presente un catalizador. El catalizador es una sustancia, compuesto o elemento capaz de acelerar (catalizador positivo) o retardar (catalizador negativo o inhibidor) una reacción química, permaneciendo él mismo inalterado es decir no se consume durante la reacción. La **fotocatálisis heterogénea** es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido (el fotocatalizador heterogéneo). Los catalizadores son materiales con propiedades idóneas para llevar acabo las reacciones fotosensibilizadas, por ejemplo el pigmento de dióxido de titanio TiO_2 , ZnO , CdS , óxidos de hierro, WO_3 , ZnS , entre otros. Estos compuestos son accesibles económicamente e incluso algunos participan en proceso químicos de la naturaleza. Además muchos pueden reaccionar absorbiendo la radiación del espectro solar que incide sobre la superficie terrestre, esto es, con radiación de longitud de onda mayor a 310 nm. Entre los catalizadores más estudiados y utilizados se encuentran los óxidos metálicos y, en especial el TiO_2 , el cual presenta una elevada estabilidad química lo que ayuda a trabajar con un amplio rango de pH (Doménech *et al.*, 2001).

Matsunaga y Okochi (1995) siguieron el uso de UV/ TiO_2 ya que es una técnica ambientalmente amigable (evita la formación de compuestos halogenados cancerígenos o mutagénicos y malolientes) barata y con capacidad germicida. El dióxido de titanio es abundante y de fácil recuperación. Siendo conveniente su instalación en zonas rurales y

remotas ya que no requiere suministro eléctrico de alto voltaje y puede ser utilizado con radiación solar (Guimaraes, *et al.*, 2001).

En las diversas investigaciones que se han hecho con fotocatalisis heterogénea empleando TiO_2 se puede observar que existen diversos factores que determinan la eficiencia del proceso. Entre estos factores se encuentran: la intensidad de radiación, concentraciones de catalizador, y concentración inicial de contaminantes. Estudios previos indican que la intensidad de luz es un importante determinante de estas reacciones. El TiO_2 en ausencia de luz no funciona como germicida, pero su combinación con radiación luminosa incrementa notablemente su efecto destructivo de contaminantes. Rincón y otros colaboradores (2000) observaron este efecto cuando intentaron inactivar células de *E.coli* con TiO_2 en presencia/ ausencia de radiación UV, se puede ver el comportamiento en la figura 2.5 (Rincón *et al.*, 2003).

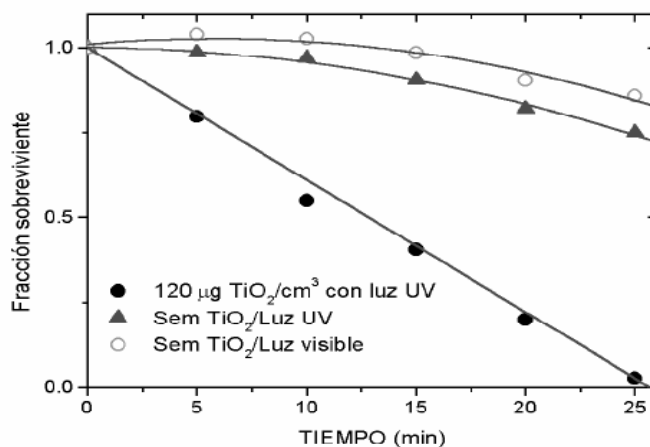


Figura 2.3 Efecto del TiO_2 en la inactivación de *E. coli* en Función del tiempo (Rincón *et al.*, 2000)

2.6 Definición del microorganismo en estudio *Bacillus subtilis*

Ciertas especies de bacterias tienen la capacidad de derivar estructuras internas sumamente resistentes a efectos ambientales adversos y se denominan endoesporas. Las endoesporas son células diferentes que son muy resistentes al calor y no pueden ser destruidas fácilmente, aun con sustancia química áspera. El descubrimiento de las endoesporas fue de una importancia inmensa para la microbiología porque el conocimiento de que esta forma de célula tiene una alta resistencia al calor fue esencial para el desarrollo de métodos adecuados de esterilización, no sólo en los diferentes medios de cultura sino también en la comida y otros productos perecederos (Madigan *et al.*, 1997).

2.6.1 Estructura de esporas

Aunque muchos organismos forman las esporas, la endoespora bacteriana es el único grado de endoesporas con una resistencia térmica, es también resistente a otros agentes dañinos tales como desinfectantes de la sequedad, de la radiación, de los ácidos y de los productos químicos, y puede seguir siendo inactivo por períodos del tiempo extremadamente largos. La estructura de la espora es mucho más compleja que la de la célula vegetativa porque tiene muchas capas, como se puede ver en la figura 2.6 la capa exterior es el *exosporium*, una cubierta hecha de proteínas, debajo de la capa continua la corteza, que consiste en *peptidoglycan* libremente reticulada, y el interior de la corteza está el *protoplasto* que es la base de la espora, que contiene el citoplasma generalmente de la membrana de la pared (Madigan *et al.*, 1997).

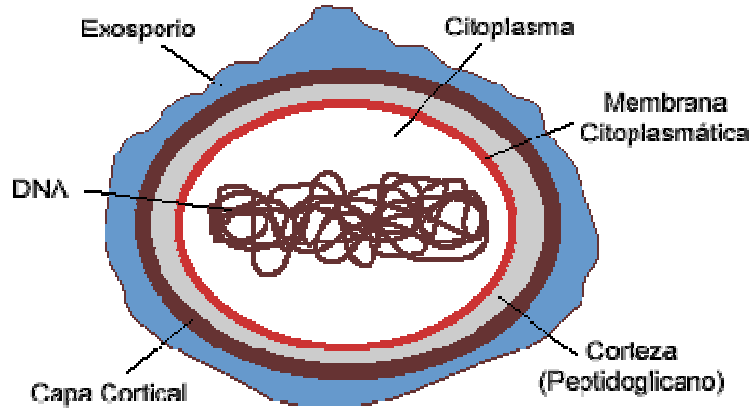


Figura 2.4 Capas de la endospora

2.6.2 Formación de la espora

La esporulación envuelve una serie de eventos complejos en la diferenciación celular. La exposición repentina de una colonia de bacterias vegetativas (con capacidad para formar endosporas) a una escasez de nutrientes o agotamiento de algunas sustancias metabólicas esenciales es la causa principal para iniciar su proceso de esporulación. La esporulación es tanto un tipo de reproducción mediante esporas, como el término utilizado para designar la formación (esporogénesis) y liberación de esporas. Muchos cambios genéticos en la célula son la base de la conversión de célula vegetal a espora. El proceso de esporulación se ilustra en la figura 2.7, el proceso se puede dividir en 7 etapas (Madigan *et al.*, 1997).



Figura 2.5 Fases en la formación de la endospora

Se puede observar que en la primera etapa la célula se encuentra en la etapa final de crecimiento exponencial y contiene dos cromosomas, en una etapa intermedia la membrana

más interna se transformará en la membrana citoplasmática de la espora de germinación y en la etapa final la endoespora es liberada por la célula.

2.6.2 Germinación

Una endoespora es capaz de permanecer inactiva por muchos años, pero puede convertirse de nuevo en una célula vegetal en un lapso de tiempo relativamente corto. Este proceso envuelve tres pasos: activación, germinación y explosión. La **activación** es lograda por calentamiento, formando algunas endosporas en algunos minutos en una temperatura sumamente elevada o almacenando las suspensiones de las espora a 4° C ó en temperatura ambiente. El proceso de **Germinación** es usualmente rápido y envuelve la pérdida de impermeabilidad en la espora, incrementando su habilidad para ser manchada por tintes y también pierde la resistencia al calor y a los químicos. La **explosión** implica la hinchazón debido a la respuesta de agua y la síntesis de nuevo RNA, proteínas y ADN. La célula surge de la capa rota que cubre a la espora y eventualmente comienza a dividirse. La célula permanece en crecimiento vegetativo hasta una señal en el ambiental que activa la esporulación de nuevo (Madigan *et al.*, 1997).