



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA SALUD ANIMAL**

**FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA**

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO (SEDEAA) PARA APOYAR EL  
DIAGNÓSTICO DE ALGUNAS ENFERMEDADES LETALES DE AVES  
ACUÁTICAS EN MÉXICO”**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRAO DE MAESTRO EN CIENCIAS PRESENTA:**

**ARTURO HERNÁNDEZ COLINA**

**TUTOR PRINCIPAL:**

**GERARDO SUZÁN AZPIRI**

**FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA, UNAM**

**COMITÉ TUTORAL:**

**MARISA MAZARI HIRIART**

**INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM**

**GARY GARCÍA ESPINOSA**

**FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA, UNAM**

**MÉXICO, D.F.**

**AGOSTO 2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## DEDICATORIA

La entrega constante de mi padre, junto con su sabiduría y su afecto por la familia; encuentran en el suave cariño, la atención y el cálido abrazo de mi madre, el complemento perfecto. Gracias a su esfuerzo he podido realizarme.

Compartir toda una vida con mis hermanos Emilio y Mario es y seguirá siendo una expedición fantástica y muy divertida.

Mis abuelos María “Gallo”, Judith, Marcelino y Vidal, han sido una enorme inspiración, porque a pesar de las dificultades de su tiempo persistieron para superarse, disfrutar de la vida y dejar un gran legado en mi corazón.

Las cosas bellas de la vida no podrían ser magníficas y las adversidades no podrían ser superadas, sin compañeros especiales como los que hemos encontrado mis padres y yo. Con Luiyo, Sarita, Panchito, Tía Silvia y Tío Marco; sus hijos Sarita, Alejandro, Alejandra, Anita y Marco, he disfrutado mucho desde que éramos cachorros. Después me encontré con Ivette, Lalo, Alex, Horacio, Ramón, Ariana, Neida, Isaac, Erika, Jorge... para seguir disfrutando.

La magia de la vida siempre está presente, es sencilla, un conjunto de destellos fugaces, con sus enseñanzas capaces de develar el Universo entero. Para sentirla, mis guías Alicia, Erika, Grettel, Paco... me han ayudado a despertar mis instintos, además de que me han regalado momentos inolvidables.

Todos los seres que he conocido, contemplado y admirado me han mostrado las maravillas del milagro de la vida: la perfección, la unión y la armonía; en un bello latir imperecedero. Por defender el milagro vale la pena luchar.

A todos les dedico afectuosamente un logro más; con inmensa gratitud por las sabias enseñanzas, los grandes instantes, las emocionantes aventuras, la felicidad compartida y por lo que aún nos espera en el camino.

## AGRADECIMIENTOS

La gran experiencia y los vastos conocimientos de mis tutores Gerardo Suzán, Marisa Mazari y Gary García, fueron indispensables; me orientaron en muchos sentidos y gracias a su asesoría me fue posible disfrutar y concluir este proyecto. Además de que siempre me brindaron su ayuda y me alentaron a realizar el mejor esfuerzo.

El doctor Kemper Valverde es un experto en sistemas expertos y con su participación desde el inicio, aportó un rumbo a seguir, muchas directrices y las herramientas imprescindibles para realizar este trabajo.

La perspectiva, creatividad e inventiva del Flaco son simplemente admirables. Hace varios años pensó en realizar una herramienta para ayudar en el diagnóstico de las enfermedades de las aves acuáticas, ahora se ha concretado. Sin su visión, esta labor no hubiera sido concebida. Él junto con Edgar Cuevas, me dieron su apoyo.

Con Marcela Araiza emprendí el viaje para explorar la situación real de las enfermedades de las aves acuáticas en nuestro país. Mencionar que fue increíblemente entusiasta, generosa y solidaria no es suficiente.

El jurado que realizó la evaluación final se conformó por los doctores Ariel Ortiz, Jorge Francisco Monroy, Gerardo Suzán, Nicolás Kemper y Carlos Fernando Esponda. Ellos señalaron los puntos clave para mejorar el resultado y con sus aportaciones, enaltecieron la calidad de este trabajo.

Al transitar un periodo más en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM, continué aprovechando la excelencia de los recursos institucionales y académicos que estuvieron a mi disposición. Dedicarme a esta empresa no me hubiera sido posible sin el apoyo del CONACYT.

Les entrego mi sincero agradecimiento por esta oportunidad de aprendizaje y superación profesional, por todos los conocimientos y la experiencia compartidos, por el apoyo y por el compañerismo.

## RESUMEN

Los humedales son ecosistemas fundamentales que proveen diversos bienes y servicios, y las aves acuáticas son las que dependen de ellos. Estas aves son relevantes por sus funciones ecológicas y diversidad, pero son vulnerables a enfermedades infecciosas e intoxicaciones y han muerto desde miles a millones de individuos en una sola epidemia. El diagnóstico de estas enfermedades es difícil por la ausencia de evidencias concretas y la falta del personal necesario. Por otro lado, los sistemas expertos son programas de cómputo capaces de resolver problemas complejos que requieren la intervención de un experto y son útiles en muchos dominios del conocimiento. Son fáciles de transferir y ayudan a tomar decisiones como si se recibiera asesoría de un experto. Debido a la dificultad de diagnóstico y atención de las enfermedades en aves acuáticas, este proyecto consistió en elaborar un sistema experto para apoyar a los veterinarios en esta labor. Se incluyeron las enfermedades letales más importantes en aves silvestres: cólera aviar, botulismo aviar e intoxicación con plomo. Se recopiló y analizó la información sobre estas, para elaborar diagramas de dependencia causal, que permiten identificar factores clave. Se hicieron tablas de decisión a partir de las cuales se extrajeron las reglas de producción. Las reglas son la forma de representación que conforma la base de conocimiento, con la que el sistema puede proporcionar resultados. Posteriormente se diseñaron las pantallas de la interfaz gráfica para el usuario y se planteó la validación con pruebas de campo en tres humedales del estado de Guanajuato. El sistema experto, llamado SEDEAA (Sistema Experto para el Diagnóstico de Enfermedades en Aves Acuáticas), es una herramienta confiable y eficiente que apoya el diagnóstico de estas enfermedades, ayudando significativamente en la atención de contingencias y contribuye así a la conservación de las aves acuáticas y sus hábitats en México.

Palabras clave: *Anseriformes*, epidemiología, humedal, inteligencia artificial, medicina de la conservación, una salud.

## ABSTRACT

Wetlands are fundamental ecosystems which provide diverse goods and services, and aquatic birds are those who depend on them. These birds are relevant because of their ecologic functions and diversity, but are vulnerable to infectious diseases and intoxications, and thousands to millions have died in a single epidemic. Diagnostic of those diseases is difficult because there are no solid evidences and the necessary personnel is lacking. On the other side, expert systems are computational programs that can solve complex problems that require an expert intervention and are useful in many knowledge domains. They are easy to transfer and help in decision making as if an expert was giving advice. Due to the diagnostic and management difficulties of aquatic bird's diseases, this project consisted on making an expert system to support veterinarians in this task. Avian cholera, avian botulism and lead intoxication were identified as the most important lethal diseases in wild birds, and were included in the system. The information about these diseases was gathered and analyzed to create causal-dependency diagrams that allow identifying key factors. Decision tables were created and from them the production rules were obtained. The rules are the representation of knowledge which conforms the knowledge base that the program uses to give results. Afterwards, the screens of the graphic interface for the user were designed and the validation was proposed with field tests in tree Guanajuato state wetlands. The expert system called SEDEAA (Expert System for Aquatic Birds Diseases Diagnostic), is a reliable and efficient tool that supports this diseases diagnostic, helping significantly in contingence managment and in this way it contributes to aquatic bird and wetlands conservation in Mexico.

Key words: *Anseriformes*, epidemiology, wetland, artificial intelligence, conservation medicine, one health.

## CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN .....	IV
ABSTRACT .....	V
Lista de Cuadros .....	VIII
Lista de Figuras .....	IX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.1.1 Ecología de Enfermedades .....	2
1.1.2 El Razonamiento Médico y el Diagnóstico .....	6
1.1.3 Sistemas Expertos .....	7
1.1.4 Elaboración de un Sistema Experto .....	9
1.1.5 Ejemplos de sistemas expertos .....	12
1.2 Justificación .....	14
2. OBJETIVOS .....	16
2.1 Objetivo General .....	16
2.2 Objetivos Particulares .....	16
3. METODOLOGÍA .....	17
3.1 Elección de las Enfermedades Incluidas .....	17
3.2 Elaboración del Sistema Experto .....	18
3.2.1 Conformación de la base de dato .....	18
3.2.2 Análisis de la información .....	18
3.2.3 Interfaz para el usuario .....	20
3.2.4 Validación .....	20
4. RESULTADOS .....	21
4.1 Selección de Enfermedades para el Sistema .....	21
4.2 Información sobre las Enfermedades Incluidas en el Sistema Experto .....	23
4.3 Elaboración de los Diagramas de Dependencia-Causal .....	31
4.3.1 Cólera aviar .....	31
4.3.2 Botulismo aviar .....	34
4.3.3 Intoxicación con plomo .....	36
4.4 Elaboración de las Tablas de Decisión .....	38
4.4.1 Cólera aviar .....	39
4.4.2 Botulismo aviar .....	44
4.4.3 Intoxicación con plomo .....	48
4.5 Elaboración de las Reglas de Producción .....	52
4.6 Estructuración de la Interfaz Gráfica del Sistema Experto .....	55
4.7 Validación del Sistema Experto .....	62
5. DISCUSIÓN .....	67

5.1 Conclusiones .....	78
6. LITERATURA CITADA .....	79
7. ANEXO 1. SELECCIÓN DE ENFERMEDADES PARA EL SISTEMA EXPERTO .....	94
7.1 Bacterianas .....	94
7.1.1 Clamidiosis .....	94
7.1.2 Cólera Aviar .....	95
7.1.3 Erisipelosis .....	96
7.1.4 Salmonelosis .....	96
7.1.5 Tuberculosis Aviar .....	97
7.1.6 Otras .....	97
7.2 Fúngicas .....	98
7.2.1 Aspergilosis .....	98
7.2.2 Otras .....	99
7.3 Parasitarias .....	99
7.3.1 Coccidiosi .....	99
7.3.2 Estrongiloidosis .....	99
7.3.3 Hemosporidiosis .....	100
7.3.4 Sarcosporidiosis .....	100
7.3.5 Trematodiasis .....	101
7.3.6 Otras .....	101
7.4 Virales .....	102
7.4.1 Enfermedad de Newcastle .....	102
7.4.2 Infección por Adenovirus .....	103
7.4.3 Infección por Arbovirus .....	103
7.4.4 Infección por Circovirus .....	105
7.4.5 Infección por Ortoreovirus .....	105
7.4.6 Influenza Aviar .....	105
7.4.7 Peste del Pato .....	106
7.4.8 Viruela aviar .....	107
7.4.9 Otras .....	108
7.5 Biotoxinas .....	108
7.5.1 Botulismo Aviar .....	108
7.5.2 Ficotoxicosis .....	109
7.5.3 Micotoxicosis .....	110
7.5.4 Mielinopatía Vacuolar de las Aves .....	111
7.6 Toxinas Químicas .....	111
7.6.1 Organoclorados .....	111
7.6.2 Organofosforados y Carbamatos .....	112
7.6.3 Plomo .....	113
7.6.4 Otras .....	114
8. ANEXO 2. INFORMACIÓN SOBRE LAS ENFERMEDADES INCLUIDAS EN EL SISTEMA EXPERTO .....	115



8.1 Cólera Aviar .....	115
8.1.1 Agente .....	115
8.1.2 Hospedero .....	116
8.1.3 Ambiente .....	117
8.1.4 Epidemiología .....	118
8.1.5 Diagnóstico .....	123
8.1.6 Tratamiento .....	123
8.1.7 Control .....	124
8.1.8 Prevención .....	125
8.2 Botulismo Aviar .....	126
8.2.1 Agente .....	126
8.2.2 Hospedero .....	127
8.2.3 Ambiente .....	128
8.2.4 Epidemiología .....	130
8.2.5 Diagnóstico .....	132
8.2.6 Tratamiento .....	133
8.2.7 Control .....	134
8.2.8 Prevención .....	135
8.3 Intoxicación con Plomo .....	136
8.3.1 Agente .....	136
8.3.2 Hospedero .....	137
8.3.3 Ambiente .....	137
8.3.4 Epidemiología .....	138
8.3.5 Diagnóstico .....	140
8.3.6 Tratamiento .....	141
8.3.7 Control .....	141
8.3.8 Prevención .....	142

## Lista de Cuadros

	Página
Cuadro 1. Satisfacción de los criterios de selección .....	22
Cuadro 2. Aspectos relevantes sobre el cólera aviar .....	24
Cuadro 3. Aspectos relevantes sobre el botulismo aviar .....	27
Cuadro 4. Aspectos relevantes sobre la intoxicación con plomo .....	29
Cuadro 5. Tabla de decisión de la dependencia 1-Ambiente (Fig.1) .....	40
Cuadro 6. Tabla de decisión de la dependencia 2-Signos y lesiones (Fig. 2) .....	42
Cuadro 7. Tabla de decisión de la dependencia 3-Hospedero (Fig.2) .....	43
Cuadro 8. Tabla de decisión de la dependencia 4-Riesgo de cólera aviar (Fig.3) .....	44
Cuadro 9. Tabla de decisión de la dependencia 5-Ambiente (Fig.4) .....	45
Cuadro 10. Tabla de decisión de la dependencia 6-Signos (Fig.5) .....	46
Cuadro 11. Tabla de decisión de la dependencia 7-Hospedero (Fig.5) .....	47

Cuadro 12. Tabla de decisión de la dependencia 8-Riesgo de botulismo aviar (Fig.6)···	48
Cuadro 13. Tabla de decisión de la dependencia 9-Ambiente (Fig.7) ·········	49
Cuadro 14. Tabla de decisión de la dependencia 10-Signos y lesiones (Fig.8) ·······	50
Cuadro 15. Tabla de decisión de la dependencia 11-Hospedero (Fig.8) ·········	51
Cuadro 16. Tabla de decisión de la dependencia12-Riesgo de intoxicación con plomo (Fig. 9) ···	52

## Lista de Figuras

	Página
Figura 1. Diagrama de dependencia-causal del ambiente para cólera aviar ·········	32
Figura 2. Diagrama de dependencia-causal del hospedero de cólera aviar ·········	33
Figura 3. Diagrama de dependencia-causal del riesgo de cólera aviar ·········	34
Figura 4. Diagrama de dependencia-causal del ambiente para botulismo aviar ·······	34
Figura 5. Diagrama de dependencia-causal del hospedero de botulismo aviar ·······	35
Figura 6. Diagrama de dependencia-causal de riesgo de botulismo aviar ·········	36
Figura 7. Diagrama de dependencia-causal del ambiente para la intoxicación con plomo ···	36
Figura 8. Diagrama de dependencia-causal del hospedero de la intoxicación con plomo ···	37
Figura 9. Diagrama de dependencia-causal del riesgo de la intoxicación con plomo ···	38
Figura 10. Pantalla principal del sistema experto ·······························	56
Figura 11. Pantalla de instrucciones del sistema experto ·······················	57
Figura 12. Pantalla de nueva consulta del sistema experto, en la parte de datos generales ···	58
Figura 13. Pantalla de nueva consulta del sistema experto, en la parte de humedal y hospedero ···	59
Figura 14. Pantalla de resultados del sistema experto, en la parte de ambiente ·····	60
Figura 15. Pantalla de resultados del sistema experto, en la parte de hospedero y riesgo de la enfermedad ·····························	61

## 1. INTRODUCCIÓN

Los humedales representan hábitats para una gran diversidad de organismos y cumplen funciones muy importantes, ya que proporcionan servicios ecosistémicos como generación de oxígeno, absorción de carbono, almacenamiento y purificación de agua, y regulación de inundaciones y del clima.<sup>1, 2</sup> Proveen recursos vegetales, peces y aves para el consumo humano, agua para el riego de cultivos y un medio para la agricultura y ganadería; además poseen una belleza escénica que atrae actividades no extractivas como la observación de aves y el ecoturismo.<sup>1</sup>

Los humedales se definen como ecosistemas cuyo sustrato está cubierto por agua temporal o permanentemente, ya sean de agua estancada o corriente, de agua dulce, salobre o salada, de origen natural o artificial; incluyendo las extensiones de agua marina que en marea baja no tienen más de seis metros de profundidad.<sup>3, 4</sup> Se estima que en las costas de México existen 1.6 millones de hectáreas de humedales.<sup>2</sup>

Las aves acuáticas son aquellas que dependen de los humedales para completar al menos parte de sus ciclos de vida.<sup>3, 4</sup> En México habita una gran diversidad de aves acuáticas; muchas de ellas son migratorias,<sup>1</sup> por lo que constituyen un recurso y una responsabilidad compartida entre los países en los que se distribuyen.<sup>4</sup> Lamentablemente varias especies están consideradas en alguna categoría de riesgo o en peligro de extinción, lo cual se debe principalmente a la alteración de su hábitat, a la cacería y a la contaminación con plaguicidas.<sup>1</sup>

Como todos los organismos, las aves acuáticas son susceptibles a diversas enfermedades, pero los brotes de algunas de éstas causan tasas elevadas de morbilidad y mortalidad, afectando a miles de individuos en breves lapsos; lo que impacta severamente en sus poblaciones y en los humedales.<sup>5, 6</sup> Así mismo, las aves silvestres tienen el potencial de transportar y dispersar ciertos patógenos y existe una gran preocupación de que esto suceda particularmente por los desplazamientos de las aves migratorias; por lo cual se ha aumentado la vigilancia en este sentido.<sup>6</sup>

Existen diversos factores relacionados con los cambios en los ecosistemas que alteran la ecología de las enfermedades en las aves acuáticas.<sup>5</sup> Normalmente, las aves migratorias se congregan en sitios particulares, lo que favorece la transmisión horizontal

de agentes infecciosos, por los contactos frecuentes entre individuos y especies.<sup>6</sup> Asociado a esto, la alteración de los ecosistemas produce que grandes cantidades de aves se encuentren en los humedales y permanezcan mayor tiempo en estos, aumentando la densidad de los individuos;<sup>6</sup> lo cual facilita la transmisión de las enfermedades de ciclo directo.<sup>5</sup>

El cambio en la calidad del agua de los humedales y en su manejo puede favorecer la producción de biotoxinas o la acumulación de las toxinas químicas. También se pueden observar cambios en las comunidades de aves, algunas poblaciones han dejado de migrar y se han establecido poblaciones de especies exóticas; lo que puede influir en la persistencia, en la introducción y en la transmisión interespecífica de patógenos.<sup>5, 7</sup>

Ha aumentado la cantidad de reportes sobre mortandades significativas en aves acuáticas, que se atribuyen a enfermedades infecciosas o intoxicaciones agudas, y en algunos casos las poblaciones han disminuido y la diversidad de las especies se ha visto amenazada.<sup>6</sup> Entre las enfermedades que afectan más severamente a las aves acuáticas se pueden mencionar el cólera aviar, el botulismo aviar y las intoxicaciones con plaguicidas y con metales pesados.<sup>8</sup>

## **1.1 Antecedentes**

### *1.1.1. Ecología de Enfermedades*

En términos generales, los agentes patógenos (aquellos capaces de producir enfermedades) se pueden clasificar en infecciosos y no infecciosos. Los infecciosos tienen un proceso reproductivo y abarcan a los parásitos (macroparásitos y microparásitos); los no infecciosos no se reproducen e incluye a las toxinas (biotoxinas y toxinas químicas).

De una forma u otra, los parásitos constituyen la mayor parte de los organismos y están íntimamente ligados a sus hospederos mediante una interacción trófica. Esta interacción varía temporalmente desde la infección de un individuo o el surgimiento de un brote, hasta la presencia endémica que lleva a la coexistencia y coevolución.<sup>9</sup>

Los macroparásitos se transmiten normalmente mediante estadios en vida libre, de un hospedero a otro y es raro que todo su ciclo de vida se dé en el hospedero definitivo.<sup>9</sup> En comparación con los microparásitos, son más grandes, tiene intervalos generacionales más prolongados, y poseen una gran cantidad de antígenos, lo que genera una inmunidad transitoria.<sup>9</sup> Los macroparásitos se congregan, encontrándose la mayor parte en la minoría de la población de su hospedero.<sup>10</sup> En este grupo se incluyen los helmintos y artrópodos.<sup>9</sup>

Los microparásitos suelen tener una reproducción rápida en el hospedero, sus intervalos generacionales son cortos, lo que puede ocasionar un rápido aumento de su población y someter al hospedero a una crisis en la que desarrolla inmunidad o muere.<sup>9</sup> Los antígenos suelen ser sencillos y la inmunidad puede ser prolongada.<sup>9</sup> Los microparásitos incluyen a las bacterias, virus, protozoarios y hongos.<sup>9</sup>

Convencionalmente se consideraba que los parásitos eran organismos especializados que vivían en equilibrio con sus hospederos y los brotes de enfermedades que causaban mortalidades masivas eran exclusivamente la manifestación de perturbaciones a ese delicado equilibrio.<sup>11</sup> Esto se justificaba debido a que si el parásito alterara la dinámica de la población de su hospedero o causara su muerte, la supervivencia del propio parásito estaría en riesgo.<sup>11</sup> Los virus de influenza aviar han co-evolucionado con las aves silvestres y son un ejemplo de esto, ya que su supervivencia y dispersión depende de la supervivencia del hospedero; si lo mataran rápidamente, afectarían la capacidad para migrar o lo hicieran más susceptible a la depredación, los virus no podrían persistir en las poblaciones.<sup>12</sup> Por lo tanto, estos virus evolucionaron para ser de baja patogenicidad en las aves acuáticas silvestres.<sup>12</sup>

Actualmente se cuenta con evidencia que sobrepasa ese argumento, ya que el éxito de los parásitos no depende sólo de su supervivencia, sino de las interacciones entre la supervivencia, la reproducción y la transmisión; lo cual determina la capacidad del parásito para establecerse en nuevos hospederos.<sup>11</sup> De cualquier manera, en muchas asociaciones de hospedero y parásito la patogénesis relacionada a la infección debilita de alguna forma al individuo infectado.<sup>12</sup>

Las infecciones parasitarias en las poblaciones silvestres pueden ocurrir como brotes epizooticos, lo cual se da cuando tienen una dispersión rápida, o un aumento en la prevalencia o en la intensidad; o pueden permanecer endémicas, es decir, cuando la prevalencia no tiene fluctuaciones amplias temporalmente.<sup>11</sup>

Los parásitos son componentes importantes de los ecosistemas que pueden ejercer presiones de selección y afectar la dinámica de las poblaciones e incluso llevar a la extinción a ciertas especies; por lo tanto, pueden influir en la evolución de la biodiversidad y también constituir una amenaza para esta.<sup>9</sup>

La otra parte de la ecuación de las enfermedades en vida silvestre está representada por las toxinas (biotoxinas y toxinas químicas). En el ambiente existen muchos elementos y compuestos que pueden afectar a la vida silvestre, algunos son componentes naturales del medio pero muchos son contaminantes derivados o concentrados por las actividades humanas.<sup>5, 13</sup>

La diversidad de toxinas a las que puede estar expuesta la vida silvestre es muy basta, y la determinación del químico responsable de algún trastorno se complica por la variabilidad de la respuesta biológica, la ausencia de residuos y la ausencia de cambios patológicos específicos, de algunos tóxicos; sin embargo, se puede facilitar mediante las observaciones de campo, los antecedentes, registros y muestras adecuadas.<sup>5</sup>

Algunas toxinas pueden causar el envenenamiento directo, el cual involucra a todos los sistemas del organismo, causa disfunción crónica o aguda y normalmente provoca lesiones, malformaciones y muerte.<sup>13, 14</sup> Así mismo, perjudican la homeostasis de los sistemas del organismo (el reproductor y el inmunológico son perjudicados usualmente)<sup>5</sup> y también pueden afectar el sistema inmunológico aumentando la vulnerabilidad a enfermedades infecciosas.<sup>14</sup> El efecto que una toxina tiene en un organismo depende en muchas ocasiones de la cantidad que haya ingresado al individuo; por lo que en una comunidad se pueden observar efectos diversos en diferentes especies e individuos que hayan tenido distintos grados de exposición.<sup>13</sup>

Las mayores repercusiones ocasionadas por las toxinas ocurren cuando son ingeridas.<sup>5</sup> En los ecosistemas las toxinas tienden a acumularse en los organismos: el aumento de una toxina en un animal se denomina bioacumulación, y cuando hay una mayor

concentración de la toxina conforme el nivel en la red trófica es más alto, se habla de bioconcentración.<sup>14</sup>

Las biotoxinas son producidas por células o derivan de secreciones de una gran diversidad de organismos, principalmente plantas, bacterias y hongos.<sup>5</sup>

Las principales toxinas químicas que perjudican a la fauna silvestre se pueden agrupar en plaguicidas y metales. Los plaguicidas son las sustancias usadas para matar o repeler especies indeseables, muchas veces consideradas como plagas o causas de enfermedades.<sup>5</sup> Los metales pueden ser componentes de los plaguicidas pero también pueden provenir de otras fuentes como los agroquímicos y los desechos de la industria y la minería.<sup>5, 13</sup> Hay que considerar que existen muchas otras toxinas de diferente índole que no pertenecen a estos grupos.<sup>5</sup>

Las toxinas, al igual que los parásitos, pueden ejercer presiones en las comunidades bióticas, y son capaces de influir en la dinámica de las poblaciones y determinar la distribución de las especies.<sup>5, 13</sup> Debido a que actúan de manera denso-independiente, pueden aumentar el riesgo de extinción de las especies o poblaciones vulnerables, directamente por envenenamiento, o indirectamente por la alteración de la reproducción, el aumento a la susceptibilidad a otros factores, o la alteración las redes tróficas. Como se ha visto con el uso indiscriminado de algunos plaguicidas y agroquímicos, que además de afectar a las aves acuáticas pueden perjudicar la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos.<sup>16</sup>

El reconocimiento de la asociación entre las enfermedades y las variables ambientales ha permitido entender la distribución de los patógenos y pasar de acciones retrospectivas de corrección a acciones prospectivas de prevención.<sup>17</sup> Empezar las acciones preventivas suele requerir más información de la que está disponible, por lo que el primer paso es obtener datos de campo a través la vigilancia de los patógenos y el seguimiento de las presentaciones de las enfermedades.<sup>5,7</sup> Esto se justifica fácilmente porque los costos de la vigilancia, seguimiento y la prevención son relativamente menores, comparados con los costos de atención cuando las enfermedades se convierten en contingencias.<sup>7</sup>

### *1.1.2 El Razonamiento Médico y el Diagnóstico*

Ante los múltiples problemas de salud que se enfrentan actualmente, el paso más relevante que se debe realizar para poder implementar las medidas de control, solución o remediación adecuadas; es el diagnóstico del problema, es decir, determinar cuál es la causa. Esto no significa que no se puedan realizar acciones generales de control previamente a la obtención del diagnóstico; hay situaciones que se desarrollan tan rápido que no es posible esperar a contar con toda la información adecuada y las acciones iniciales suelen determinar la resolución de la situación.

El diagnóstico en medicina se refiere al proceso de clasificar el grupo de signos del paciente en la categoría apropiada de enfermedad.<sup>18, 19</sup> Esto implica elegir la hipótesis más adecuada dentro de una gama de posibilidades.<sup>18</sup>

La enfermedad es la suma de fenómenos anormales que manifiesta un organismo o un grupo de organismos, en asociación con una característica o grupo de características por las cuales difieren de la norma de la especie de tal manera que se encuentran en una desventaja biológica.<sup>18</sup>

Previamente al desarrollo del método científico, los conocimientos eran puramente empíricos, adquiridos principalmente mediante la observación de los fenómenos de la naturaleza y experimentando con acciones para alterarlos, como el tratamiento de las enfermedades. El hecho de que no todos estos conocimientos hayan sido evaluados rigurosamente no implica que sean inválidos.

Actualmente se han desarrollado métodos precisos para obtener un diagnóstico más confiable. El proceso moderno comienza con la evidencia de la enfermedad presente y consiste en un razonamiento hipotético-deductivo en el que se utilizan la deducción y la inducción.<sup>18</sup>

La adquisición y análisis de la información sobre el paciente y su problema permiten proponer las enfermedades que incluyen todos los signos, la mayoría o al más importante. Se establecen la enfermedad principal (diagnóstico presuntivo) y las alternativas (diagnósticos diferenciales) y de esta manera es posible obtener información específica para confirmar la causa del problema (diagnóstico definitivo).<sup>18</sup>



Con este procedimiento se puede obtener un diagnóstico confiable, abordar la enfermedad en cuestión de la forma adecuada y ampliar la experiencia y conocimientos del médico; pero puede ser tardado y en ocasiones el tiempo es crítico. Es por esto que se ha buscado automatizar el proceso de diagnóstico mediante la incorporación de las ciencias matemáticas y de la computación; aunado a lo complejo que puede resultar, así como a la gran cantidad de conocimiento necesario.

Un aporte fundamental de la matemática es la representación abstracta de las enfermedades con lógica simbólica y teoría de conjuntos (diagramas de Venn y álgebra Booleana). En cuanto a la teoría de conjuntos y los diagramas de Venn, las enfermedades se encuentran en la intersección de sus manifestaciones particulares, es decir, donde gráficamente convergen los signos y lesiones característicos. Esto se puede simplificar mediante algebra Booleana con operaciones del tipo:  $A \cap B \cap C = X$  (donde A, B y C son los signos, y X la enfermedad).<sup>18</sup>

Por su parte, las ciencias de la computación, integrando estas representaciones y otros instrumentos (como los algoritmos médicos y los procedimientos de búsqueda), han sido capaces de desarrollar herramientas concretas que en general se pueden denominar sistemas de apoyo a las decisiones.<sup>18</sup> Los cuales son programas para el procesamiento y acceso a la información, que proporcionan cursos de acción recomendados.<sup>19</sup> Estos sistemas ayudan al médico en alguno de los pasos de diagnóstico, aumentando la precisión y eficiencia de este último.<sup>18</sup> De igual manera, hay programas que asisten al médico en el tratamiento, registro y vigilancia de las enfermedades.<sup>20</sup> Adicionalmente se ha tenido un gran avance en la disponibilidad de la información y en las herramientas para la enseñanza de la medicina veterinaria.<sup>20</sup>

### *1.1.3 Sistemas Expertos*

El aumento en la complejidad y magnitud de los problemas humanos demanda una mayor cantidad de expertos capaces de resolverlos; sin embargo, esta demanda no puede satisfacerse.<sup>19</sup> Aunado a que la pericia humana es costosa, escasa, varía ampliamente y es influenciada significativamente por el juicio, la intuición y la

experiencia; el uso de los sistemas expertos es una alternativa usada ampliamente que vuelve más accesible el conocimiento experto.<sup>19, 21</sup>

Un sistema experto es un programa de computadora que posee conocimiento especializado y es capaz de solucionar problemas complejos de un dominio específico del conocimiento, de forma comparable con un experto humano.<sup>19, 21</sup>

Los sistemas expertos pueden resolver problemas complejos con un alto grado de confiabilidad.<sup>21</sup> Se ha desarrollado una gran cantidad de sistemas expertos, diseñados para resolver problemas en disciplinas muy diversas, desde la asesoría de mercados hasta el diagnóstico de fallas y mantenimiento de maquinaria compleja, siendo útiles dondequiera que se necesite de un experto.<sup>19</sup> Por lo que son una de las aplicaciones más empleadas y exitosas de la inteligencia artificial.<sup>21</sup>

Los problemas que pueden ser resueltos mediante sistemas expertos poseen los siguientes atributos:

- Las conclusiones de un experto deben ser significativamente diferentes a las realizadas por alguien que no es experto.<sup>19</sup>
- Hay una carencia de pericia disponible para enfrentar el problema y es costoso preparar a nuevos expertos.<sup>19</sup>
- Debe existir la pericia, ya sea en un experto o en documentos.<sup>19</sup>
- El dominio de la pericia debe ser relativamente limitado y estable.<sup>19</sup>
- Puede existir una necesidad de tomar decisiones con información incompleta.<sup>19</sup>

Los sistemas expertos poseen elementos básicos que los caracterizan y es necesario mencionarlos para posteriormente comprender cuestiones sobre su funcionamiento y elaboración.

- Base de conocimientos: es donde se almacena el conocimiento del sistema en forma de hechos sobre el dominio específico y puede ser usada por varias técnicas de razonamiento deductivo para generar soluciones.<sup>19, 21</sup>
- Base de hechos: también se denomina memoria de trabajo y está conformada por los hechos de la situación que se esté consultando y las inferencias generadas a partir de estos hechos.<sup>19</sup>

- Motor de inferencia: es el componente que se encarga del procesamiento del conocimiento, uniendo los hechos con las reglas o infiriendo nuevos hechos.<sup>19, 22</sup>
- Interfaz: es la parte que maneja las entradas y salidas del sistema.<sup>21</sup> Permite la comunicación con el ingeniero del conocimiento durante el desarrollo del sistema y con el usuario al terminarlo.<sup>19</sup>
- Módulo de explicaciones: es una parte del sistema que muestra las razones que lo llevaron a determinadas conclusiones y es una de las ventajas de los sistemas expertos sobre otras herramientas.<sup>19, 21</sup>

El conocimiento que posee un sistema experto es de dos tipos: conocimiento *a priori* (los hechos y reglas sobre el dominio, que se tienen antes de la consulta) y conocimiento inferido (los nuevos hechos o conclusiones de un caso específico, derivados durante y al finalizar una consulta). La base de conocimientos posee conocimiento del primer tipo y la base de hechos, del segundo.<sup>19</sup>

Para que un programa de computadora sea considerado un sistema experto, es necesario que el conocimiento se integre en una base de conocimiento y esté separado del mecanismo de control (motor de inferencia); debe tener la capacidad para manejar cierto grado de incertidumbre, de proporcionar explicaciones y contar con herramientas de adquisición del conocimiento e interfaces para el usuario.<sup>21</sup>

#### 1.1.4 Elaboración de un Sistema Experto

El término ingeniería del conocimiento se emplea para referirse a la elaboración de sistemas expertos y a continuación se presentan los aspectos más notables de este proceso.<sup>21</sup> Los pasos principales son: la adquisición del conocimiento, representación del conocimiento y validación del sistema.<sup>19</sup>

Una vez que se ha evaluado el problema y se ha determinado que se puede resolver con un sistema experto, se inicia la adquisición del conocimiento. En la cual se identifican las reglas y los hechos que conforman la base de conocimiento y permiten resolver los problemas del dominio.<sup>19, 21</sup> Se puede lograr a partir de uno o varios expertos, de registros históricos o por métodos de adquisición automática del conocimiento.<sup>19, 21</sup> La desventaja de entrevistar a los expertos es que en ocasiones, ellos no expresan correcta

o completamente el conocimiento, además de que el proceso está sujeto a sesgos.<sup>22</sup> Independientemente del medio por el que se obtenga el conocimiento, es necesario organizarlo, refinarlo y estandarizarlo para facilitar su manejo.<sup>22</sup>

Para poder transferir el conocimiento al sistema experto es necesario transformarlo en un formato que la computadora pueda manejar y de preferencia que corresponda lo más posible con la formulación hecha por el experto y así, sea fácil de comprender y modificar.<sup>19, 21</sup>

Se han propuesto varios modelos de representación del conocimiento y se pueden mencionar por ejemplo los tripletes OAV (objeto-atributo-valor) que son la base de las otras formas de representación del conocimiento. Estos tripletes se componen por el objeto que es una entidad específica, el atributo que es una característica del objeto y el valor que es una variable numérica o simbólica del atributo.<sup>19</sup> Otros métodos son las redes semánticas, marcos y la lógica de predicados; la elección depende de la naturaleza del problema y de los usuarios.<sup>22</sup>

El método de representación de conocimiento más empleado es el de las reglas, también llamadas reglas de producción. Las reglas son un modo natural de representación de conocimiento por lo que el tiempo para realizar bases de reglas es menor que con otros modelos. Las reglas son más transparentes que otros métodos; es decir, que son más fáciles de leer y entender por los humanos; también es más fácil modificar y verificar su consistencia e integridad.<sup>19</sup> Los sistemas en los que se usan, se denominan sistemas expertos basados en reglas.<sup>21</sup> Cuando sólo una regla es aplicable bajo ciertas circunstancias, el sistema es determinista; pero si más de una regla se puede activar, el sistema es no determinista.<sup>22</sup>

Las reglas de producción son del tipo *Si-Entonces* y pueden tener múltiples cláusulas unidas por una conjunción copulativa (y) o disyuntiva (o).<sup>19, 22</sup> Por ejemplo: “*Si el paciente es juvenil y muestra los signos: anorexia y vómito o diarrea sanguinolenta; entonces tiene la enfermedad X*”.

La inferencia es el proceso de llegar a una conclusión mediante un conjunto de reglas a partir de un grupo determinado de hechos; por lo que es el elemento de procesamiento del conocimiento del sistema.<sup>19</sup> *Modus ponens* es la forma de inferencia más

comúnmente usada en los sistemas expertos y establece que si las premisas son verdaderas, entonces la conclusión también es verdadera.<sup>19</sup>

El motor de inferencia, al igual que la base de conocimiento, posee reglas y hechos, pero pertenecen a la estrategia y control general de la búsqueda de la solución.<sup>19, 21</sup> Una característica de los sistemas expertos es que las reglas y hechos del motor de inferencia están separados de las reglas y hechos de la base de conocimiento y por lo general no dependen del dominio; lo que permite la modificación de un grupo, sin alterar al otro.<sup>19,21</sup>

En la resolución de muchos problemas complejos se tiene que lidiar con algún grado de incertidumbre, imprecisión y falta de completitud, en el conocimiento.<sup>21</sup> La incertidumbre es una estimación subjetiva de la validez de un valor, de una regla de la base de conocimiento o de una respuesta del usuario. Para manejar la incertidumbre pueden emplearse varios recursos como los factores de certeza, los cuales son valores numéricos que reflejan la confianza subjetiva en que la regla se cumpla.<sup>19, 21</sup>

La validación es un paso fundamental que consiste en comparar el sistema experto con un sistema ideal como el experto humano;<sup>22</sup> debe planearse desde que se decide hacer el sistema y se lleva a cabo durante la elaboración del sistema y al concluirlo.<sup>21</sup> Consta de tres fases: la justificación de utilizar un sistema experto, la validación de la consistencia e integridad de las reglas en la base de conocimiento y la verificación del desempeño del sistema.<sup>19, 21</sup>

La justificación se basa en la importancia del problema, en las ventajas de realizar el sistema y en la disponibilidad de recursos para hacerlo.<sup>19</sup>

La consistencia de las reglas se debe evaluar, asegurándose de que no existan reglas redundantes, conflictos entre reglas, reglas subsumidas, reglas innecesarias, cláusulas innecesarias en las premisas o cadenas circulares de reglas.<sup>19, 21, 22</sup> El otro punto a evaluar es la integridad de las reglas, el cual consiste en buscar que no haya valores sin referencia de atributos, valores ilegales de atributos; o conclusiones intermedias, conclusiones finales o premisas inalcanzables.<sup>19, 22</sup> De tal manera que las soluciones proporcionadas sean las correctas.<sup>21</sup>

Al verificar el desempeño del sistema experto se debe evaluar si satisface el objetivo para el cual fue creado, si la representación del conocimiento es la apropiada y si el funcionamiento de la interfaz y los módulos de explicaciones es óptimo.<sup>21</sup> Luego se pueden seleccionar indicadores de desempeño como el impacto en la resolución del problema (en el caso del diagnóstico puede ser su precisión, mejoramiento del proceso, reducción del tiempo, la facilidad de uso, revisión y actualización del sistema), el impacto en las instituciones encargadas de resolver el problema (ahorro de costos de monitoreo y atención a contingencias) e impacto en el personal (mejoramiento de las capacidades profesionales). Posteriormente se debe utilizar el sistema repetidamente para evaluarlo con base en estos indicadores.<sup>19</sup>

La información para la validación puede obtenerse a partir de registros anteriores del dominio para el que se desarrolló el sistema experto; se pueden realizar casos de prueba dirigidos por el experto; o se puede correr el sistema experto ante una situación presente, simultáneamente al procedimiento convencional para poder comparar ambas técnicas.<sup>19, 21</sup>

### *1.1.5 Ejemplos de sistemas expertos*

Se considera que el primer sistema experto fue DENTRAL. Se comenzó a desarrollar a mediados de los años sesentas y se volvió operacional a principios de los setentas. Su propósito es la identificación de la estructura molecular de compuestos desconocidos y ha sido tan aceptado que se considera capaz de realizar algunas tareas mejor que cualquier experto humano a pesar de que no genera explicaciones.<sup>19, 21</sup>

INTERNIST fue un proyecto que inició en los setentas y continuó con el nombre de CADUCEUS. Su objetivo es diagnosticar la mayoría de las cientos de enfermedades relacionadas con la medicina interna, pero también considera todas las posibles combinaciones de enfermedades en el paciente y destaca la más probable.<sup>19, 21</sup>

Uno de los sistemas expertos más conocidos es MYCIN, el cual fue diseñado para apoyar el diagnóstico y tratamiento de enfermedades sanguíneas infecciosas. Su motor de inferencia usa un encadenamiento hacia atrás y sus reglas cuentan con factores de

certeza.<sup>21</sup> Se desarrolló como un esfuerzo de investigación para demostrar cómo se pueden construir los sistemas expertos para resolver problemas reales y complejos. Este sistema puede ser usado como una “concha” (llamada EMYCIN) al remover su base de conocimiento y reemplazarla por otra, dando origen a un sistema experto nuevo como PUFF; que interpreta parámetros de pruebas respiratorias, identifica desórdenes pulmonares y propone esquemas de tratamiento.<sup>19, 21</sup>

Otro sistema experto orientado al diagnóstico médico es QMR (Quick Medical Record). Este sistema ayuda a los médicos en el diagnóstico de enfermedades con base en los síntomas del paciente, los signos y las pruebas de laboratorio. Incluye cerca de cuatro mil posibles manifestaciones de enfermedades y su desempeño es comparable con el de un médico.<sup>19</sup>

En el ámbito pecuario se ha desarrollado un sistema experto para asesorar a los avicultores en la producción de huevo. Este sistema analiza datos del sistema de control ambiental de la caseta, como el consumo de agua y de alimento, la temperatura y humedad, y también utiliza datos productivos como la cantidad y el peso de los huevos, peso de las gallinas y mortalidad. Con esta información el sistema puede monitorear diariamente el proceso de producción y alertar sobre aberraciones en el ambiente de las casetas y posibles enfermedades.<sup>23</sup>

Un sistema experto desarrollado para resolver cuestiones en la clínica veterinaria es Vetstream Canis, el cual hace preguntas al usuario para diagnosticar síndromes.<sup>18</sup> Otro ejemplo es Canid, el cual proporciona información sobre la presentación clínica, opciones de tratamiento, diagnósticos diferenciales y manejo de enfermedades en perros. Bovid es semejante al anterior pero enfocado a la clínica en bovinos y asiste en el diagnóstico a través de las presentaciones clínicas, los hallazgos a la necropsia y ofrece pruebas confirmatorias; ayudado así en el tratamiento y prevención de enfermedades en el ganado.<sup>20</sup>

## 1.2 Justificación

Una de las características de las enfermedades en aves acuáticas es que muchos de los elementos asociados a ellas (factores ambientales, poblacionales, patológicos y epidemiológicos) no son distintivos. Por lo tanto, el diagnóstico en campo suele ser difícil y normalmente se establecen varios diagnósticos presuntivos que requieren de diversas pruebas de laboratorio para determinar el agente causal. Muchas veces, los brotes de estas enfermedades son tan repentinos y se propagan tan rápidamente que el diagnóstico suele ser tardío para implementar las medidas de control o erradicación necesarias. Un abordaje podría consistir en implementar un sistema de biovigilancia competente, integrado por técnicos de campo, expertos y el equipo necesarios para prevenir, atender y dar seguimiento a este tipo de contingencias. Esto podría tener ventajas cruciales como la facilidad de obtener información relevante para la investigación de las enfermedades en vida silvestre. Sin embargo, integrar un sistema de ese tipo es costoso en cuanto al tiempo y los recursos económicos que demanda su desarrollo y mantenimiento. Además un impedimento sustancial sería la falta de personal capacitado en el área, porque el diagnóstico de las enfermedades de las aves acuáticas requiere la intervención de varios expertos en las aves silvestres y en los humedales, como patólogos, epidemiólogos y biólogos. Otro enfoque consiste en utilizar herramientas, como los sistemas expertos, que sean fácilmente transferibles y que ayuden a solventar esta carencia de especialistas; lo cual requiere una menor inversión de trabajo y tiempo, y ofrece un amplio rango de aplicación. Esta alternativa no pretende suplir a un sistema de biovigilancia, sino que es una herramienta más que se puede integrar al mismo.

Como se puede apreciar, el diagnóstico de las enfermedades de las aves acuáticas posee las características de los problemas que se pueden abordar mediante sistemas expertos. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto fue realizar un sistema experto que ayude a optimizar el diagnóstico de estas enfermedades, para llevar a cabo, de manera oportuna, las medidas de prevención y control necesarias para manejar mejor este problema.

La metodología empleada consistió en usar cuatro criterios para seleccionar las enfermedades del sistema de acuerdo con su importancia, sobre todo en cuanto a la



cantidad de aves afectadas por brote y a la recurrencia de los mismos. Para elaborar el sistema experto se investigó la información relevante sobre las enfermedades incluidas y con ella se hicieron diagramas de dependencia causal, a partir de estos se realizaron las tablas de dependencia y finalmente, con ellas se hicieron las reglas de producción que son la forma más eficiente de representación del conocimiento y que se pueden transferir fácilmente a cualquiera de muchos ambientes de programación.

En la sección de resultados se muestra la revisión de las enfermedades reportadas en las aves acuáticas y se resume en un cuadro que muestra cuales se incluyeron en el sistema, estas fueron cólera aviar, botulismo aviar e intoxicación con plomo. Luego se presenta la información de esas enfermedades, los diagramas de dependencia, las tablas de decisión y algunos ejemplos de las reglas de producción. También se muestran las secciones y apartados de la interfaz gráfica, con sus elementos, que le permite al usuario realizar las consultas.

Posteriormente se discuten las ventajas y desventajas del sistema y se presentan alternativas de mejoría e integración para llevar el sistema a la práctica y obtener el mayor beneficio de él; permitiendo así, obtener un diagnóstico oportuno y emprender las medidas correctivas y preventivas más adecuadas, en beneficio de las aves acuáticas, de los humedales en los que habitan y de las personas que están relacionadas con ellos, directa o indirectamente.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 *Objetivo General*

Desarrollar un sistema experto que constituya una herramienta confiable y eficiente para el apoyo en el diagnóstico oportuno y prevención de brotes, de algunas enfermedades letales de las aves acuáticas en México.

### 2.2 *Objetivos Particulares*

1° Seleccionar las enfermedades de las aves acuáticas que son más relevantes en las poblaciones silvestres de México, para incluirlas en el sistema experto.

2° Conformar la base de datos que reúne la información sobre el ambiente, el hospedero y el agente de las enfermedades incluidas.

3° Elaborar la base de conocimiento del sistema experto con los hechos y las reglas de producción necesarias para diagnosticar las enfermedades incluidas.

4° Plantear los elementos, la estructuración y el funcionamiento del sistema experto.

5° Proponer la validación del sistema experto con base en los informes previos y datos disponibles sobre eventos de mortandad en aves acuáticas en México.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Elección de las Enfermedades Incluidas

El primer paso para elaborar el sistema experto consiste en definir su campo de acción y el problema específico que debe resolver; en este caso se trata de las enfermedades que debe manejar el sistema. Para definir las se consideró que fueran relevantes y representaran un problema de salud para las aves silvestres. Lo cual se estableció con los siguientes criterios de inclusión:

a) **Alto impacto:** la enfermedad en cuestión debe ocasionar tasas altas de morbilidad o mortalidad en las aves acuáticas silvestres, durante un corto periodo de tiempo (que se considere como un solo evento) o constantemente, y por lo tanto debe ser considerada como relevante para la salud de las aves silvestres en la literatura científica.

b) **Recurrencia de la enfermedad:** se debe tratar de una enfermedad que haya afectado a más de mil individuos de la población o poblaciones susceptibles en más de veinte ocasiones, o que cause mortandades con regularidad o anualmente; y no que solamente se haya presentado en uno o pocos eventos.

c) **Presencia en México:** se debe contar con registros de la presencia de la enfermedad, o de mortandades por la misma, o con evidencia indirecta de que pueda estar presente. Si se han encontrado evidencias del agente, aún en ausencia de la enfermedad, la ocurrencia se consideró como posible.

d) **Importancia reconocida:** se debe considerar como una enfermedad emergente o trascendental por fuentes científicas o instituciones competentes en el tema. Este punto fue adicional y ayudó a esclarecer los casos en los que no se encontró información precisa: si alguno de los otros criterios era incierto y la enfermedad posee una importancia reconocida, entonces se incluyó en el sistema.

Para determinar qué enfermedades cumplen con estos criterios, se realizó una revisión de los textos especializados y artículos científicos sobre las enfermedades de las aves acuáticas. Se revisaron también los registros cuatrimestrales de mortandades en Norteamérica, que se encuentran en la página en Internet del National Wildlife Health Center (NWHC), del United States Geological Survey (USGS), de Estados Unidos.<sup>24</sup> El

periodo de estos registros es de 1995 a 2012 y para seleccionar los eventos más severos, se consideraron sólo aquellos de mortandades mayores a mil aves acuáticas y cuya etiología fue diagnosticada con seguridad. Los brotes que abarcaron más de un registro, se consideraron solamente en el año en el que finalizaron, para evitar duplicar la información.

## **3.2 Elaboración del Sistema Experto**

### *3.2.1 Conformación de la base de datos*

Se investigaron los aspectos más significativos de las enfermedades seleccionadas y se agruparon en los apartados de agente, hospedero, ambiente, epidemiología, diagnóstico, tratamiento, control y prevención. En el primero se incluyen aspectos como el origen del agente, y las condiciones de crecimiento o de persistencia. En el apartado de hospedero se mencionan las especies susceptibles y los factores que las predisponen a enfermar. El ambiente se refiere a las condiciones en la que se dan los brotes, ya sean del humedal, o del ecosistema. La epidemiología abarca cuestiones de los brotes como estacionalidad, recurrencia, signos, lesiones, morbilidad y mortalidad. El siguiente apartado incluye las bases del diagnóstico presuntivo, los diagnósticos diferenciales y los medios para obtener el diagnóstico definitivo. El tratamiento se refiere a las medidas para curar la enfermedad a nivel individual y el control, a las medidas para disminuir la incidencia y las repercusiones en las poblaciones. Las medidas para prevenir la enfermedad se mencionan en el último apartado.

### *3.2.2 Análisis de la información*

Se revisó la información investigada para extraer los datos más significativos que por un lado contribuyen a establecer el diagnóstico oportuno (signos, lesiones y factores ambientales) y por el otro, favorecen los posibles brotes de las enfermedades (factores poblacionales y factores ambientales).

Para facilitar este paso se representó la información en un tipo de mapa de conocimiento denominado diagrama de dependencia-causal. Este diagrama se conforma de atributos, valores, dependencias y consecuentes. Los atributos son características del objeto, en este caso el objeto es el ambiente o el hospedero, los valores son las variables numéricas o simbólicas que puede tener el atributo y los consecuentes son los posibles resultados a los que conducen las combinaciones de los valores. Las dependencias muestran la relación entre los atributos y los consecuentes.

Los diagramas de dependencia-causal, permiten visualizar los atributos y sus valores, con relación a las soluciones a las que se pueden llegar, por lo que son una herramienta gráfica que permite la conceptualización y comprensión del problema, y de esta manera facilita la construcción de las tablas de decisión.

Diversos estudios en psicología cognitiva han determinado que existe un límite en la capacidad humana para almacenar y procesar información.<sup>25, 26</sup> A pesar de que ese límite no se puede definir con precisión, se estima que se encuentra entre tres y cinco unidades de información.<sup>26</sup> Debido a esto, al elaborar los diagramas de dependencia-causal se buscó que no tuvieran más de cuatro consecuentes y así fueran más fáciles de interpretar.

A partir de los diagramas se realizaron tablas de decisión. Las cuales son cuadros que permiten representar las combinaciones de los valores de los atributos junto con sus consecuencias particulares; es decir, permiten apreciar las posibilidades que se pueden tener entre los valores y los consecuentes. Al organizar la información de esta manera se puede analizar la factibilidad de que ciertas situaciones se presenten y la importancia que pueden tener las combinaciones.

El método utilizado para la representación del conocimiento fue el de las reglas de producción. Las cuales son oraciones condicionales que sintetizan las combinaciones de los valores de los atributos y sus consecuencias. El formato general es: Si  $X = a$  y  $Y = b$ ; Entonces  $C$  ( $X$  y  $Y$  son los atributos,  $a$  y  $b$  son los valores y  $C$  es la conclusión). El valor de la realización de las reglas es que estas representan el conocimiento en un formato comprensible que se puede programar en la computadora.

Al terminar de elaborar las reglas de producción, se revisó su consistencia para evitar repeticiones, errores en las cláusulas de las reglas o con relación a las demás reglas y así, poder simplificarlas y facilitar el proceso de programación.

### *3.2.3 Interfaz para el usuario*

La estructuración de los componentes del sistema experto se realizó de acuerdo con la información necesaria para trabajar con estas enfermedades y con la que le es útil al usuario. La interfaz se conforma de una pantalla principal que permita el acceso a todas las secciones del sistema. Las secciones principales consideradas inicialmente fueron: *instrucciones, nueva consulta, glosario y créditos*. La interfaz fue diseñada con el programa Macromedia Flash®,<sup>27</sup> debido a que éste facilita la inclusión de imágenes y animaciones, haciéndola muy amigable para el usuario.

### *3.2.4 Validación*

Una vez concluida la elaboración del sistema experto, es necesario evaluar si las respuestas que genera son las correctas y si su funcionamiento es óptimo. La validación interna del sistema se realizó analizando las reglas de producción para detectar cualquier tipo de error y simplificarlas. En cuanto a la interfaz para el usuario se evaluó la funcionalidad de todos sus elementos (botones y pantallas). En 1998 se presentó un brote severo de botulismo en la Laguna de Yuriria, en el estado de Guanajuato, y se creó un comité antenderlo; como resultado de la investigación realizada, se publicó un informe que detalla el evento mostrando datos ecológicos, patológicos e hidrológicos.<sup>29</sup> Por lo tanto, fue posible realizar un ensayo de validación con dicho informe. Para la verificación del sistema lo ideal sería realizar ensayos con todas las enfermedades incluidas en el sistema, pero esto no es posible debido a la falta de información y registros sobre las condiciones necesarias para evaluar todos los elementos del sistema. No obstante, el botulismo aviar es una enfermedad que se ha presentado muchas ocasiones en México y en algunos lugares ocurre anualmente;<sup>28</sup> debido a esto, se propuso un proceso de validación en campo con esta enfermedad.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Selección de Enfermedades para el Sistema

Se investigó la información sobre las enfermedades de las aves acuáticas que se han presentado en América y se sintetizó en el Cuadro 1, que muestra si las enfermedades satisfacen o no los criterios de selección expuestos en la sección de metodología (alto impacto, recurrencia de la enfermedad, presencia en México e importancia reconocida).

La información completa sobre las enfermedades se describe en el Anexo 1; está organizada por grupos de agentes etiológicos y alfabéticamente, primero se presentan las infecciosas y luego las intoxicaciones. Algunas enfermedades han sido reportadas infrecuentemente, no han afectado severamente a las aves acuáticas o existe poca información disponible sobre ellas. Debido a esto, se agruparon en un apartado denominado “*otras*” en el que se muestra la información relevante, dentro del grupo de agentes correspondiente del Anexo 1. Estas enfermedades no se incluyen en el Cuadro 1. A continuación se enlistan las enfermedades investigadas:

- **Bacterianas:** clamidiosis, cólera aviar, erisipelosis, salmonelosis, tuberculosis aviar y otras (enteritis necrótica, estafilococosis y nueva enfermedad del pato).
- **Fúngicas:** aspergilosis y otras (candidiasis).
- **Parasitarias:** coccidiosis, estrongiloidosis, hemosporidiosis, sarcosporidiosis, trematodiasis y otras (tricomoniasis).
- **Virales:** enfermedad de Newcastle, infección por adenovirus, infección por arbovirus, infección por circovirus, infección por ortoreovirus, influenza aviar, peste del pato, viruela aviar y otras (enfermedad de cuerpos de inclusión de las grullas).
- **Biotoxinas:** botulismo aviar, ficotoxicosis, micotoxicosis, mielinopatía vacuolar de las aves.
- **Toxinas químicas:** organoclorados, organofosforados y carbamatos, plomo y otras (selenio, mercurio, cianuro, sal y petróleo).

Después de analizar la información con base en los criterios de selección, se concluyó que las enfermedades más trascendentales, y que por lo tanto se incluyeron en el sistema experto, son: cólera aviar, botulismo aviar e intoxicación con plomo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Satisfacción de los criterios de selección.

	Enfermedad	Criterios de selección			
		Alto	Recurrencia*	Presencia	Importancia
Bacterianas	Clamidiosis	No	1	Posible	No
	<i>Cólera aviar</i>	<i>Si</i>	<b>64</b>	<i>Posible</i>	<i>Si</i>
	Erisipelosis	No	1	Posible	No
	Salmonelosis	No	11	Posible	Si
	Tuberculosis aviar	No	0	Posible	No
Fúngicas	Aspergilosis	No	8	Posible	No
Parasitarias	Coccidiosis	No	4	Posible	No
	Estrongiloidosis	No	0	Posible	No
	Hemosporidiosis	No	0	Posible	No
	Sarcosporidiosis	No	0	Si	No
	Trematodiasis	Si	29	No	No
Virales	Enfermedad de Adenovirus	No	10	Posible	Si
	Arbovirus (VON)	Si	18	Posible	Si
	Circovirus	No	0	No	No
	Ortoreovirus	No	2	No	No
	Influenza aviar	Si	0	Si	Si
	Peste del pato	No	3	No	Si
	Viruela aviar	No	0	Si	Si
	<i>Botulismo</i>	<i>Si</i>	<b>104</b>	<i>Si</i>	<i>Si</i>
Biotoxinas	Ficotoxicosis	No	5	Si	No
	Micotoxinas	No	2	Posible	No
	Mielinopatía	No	0	No	Si
	Toxinas químicas	Organoclorados	No	0	Si
Organofosforados		No	0	Si	No
<i>Plomo</i>		<i>Si</i>	<b>2**</b>	<i>Si</i>	<i>Si</i>

Las enfermedades en letras cursivas satisfacen los criterios de selección.

\* La cantidad de brotes que afectaron a más de mil individuos en Norteamérica, se muestra en la columna de recurrencia de la enfermedad.

\*\* A pesar de que sólo causó dos mortandades mayores a los mil individuos, se presentó en casi todos los años del periodo de registros del NWHC (1995-2012), menos en el 2002.



## 4.2 Información sobre las Enfermedades Incluidas en el Sistema Experto

En el Anexo 2 se presenta la información fundamental sobre estas enfermedades en aves silvestres, la cual fue utilizada para realizar los diagramas de dependencia-causal, las tablas de decisión y las reglas de producción, y se incluyó en el sistema experto para la consulta del usuario. Se encuentra dividida en los apartados de agente, hospedero, ambiente, epidemiología, diagnóstico, tratamiento, control y prevención. En cuanto al agente, se menciona su clasificación y las variables que permiten que se presente. Del hospedero se mencionan las especies susceptibles y los factores predisponentes. En la sección de ambiente se mencionan las condiciones ambientales que influyen en la ocurrencia de la enfermedad. El apartado de epidemiología abarca la estacionalidad, recurrencia, transmisión, reservorio, signos, lesiones, mortalidad y morbilidad. En lo referente al diagnóstico se incluyen las cualidades del presuntivo y de los diferenciales, así como las pruebas para obtener el definitivo. Se mencionan también las medidas de tratamiento, control y prevención, bajo diferentes consideraciones. Algunos de estos apartados no aplican para todas las enfermedades, por ejemplo, no se habla de transmisión en las enfermedades no infecciosas, y hay algunos apartados particulares como el del ciclo cadáver-gusano del botulismo aviar.

En los siguientes cuadros se resumen las cuestiones más trascendentes del cólera aviar (Cuadro 2), del botulismo aviar (Cuadro 3) y de la intoxicación con plomo (Cuadro 4) (la información completa y referenciada se puede consultar en el Anexo 2).

**Cuadro 2.** Aspectos relevantes sobre el cólera aviar.

Aspecto	Características
<b>Agente</b>	El cólera aviar es causado por la infección de la bacteria <i>Pasteurella multocida</i> .
	En aves silvestres se ha encontrado más frecuentemente la subespecie <i>P. multocida multocida</i> , la cepa A y el serotipo 1, seguido por el 3 y 4.
	Los serotipos tienen una patogenicidad y virulencia variables, muchos no causan la enfermedad.
<b>Hospedero</b>	La mayoría de las aves se puede infectar pero la susceptibilidad varía ampliamente. Las especies más afectadas son gallaretas y anátidos.
	Si sobreviven a la infección desarrollan inmunidad temporal y se pueden volver portadores de por vida.
	Las especies en mayor riesgo son las que se agrupan en densidades elevadas y parvadas grandes.
<b>Ambiente</b>	Es predisponente: poco hábitat disponible, sequía, humedales con agua somera o estancada, clima desfavorable (temperaturas frías), niebla, cambios en el uso del suelo (plaguicidas o agricultura intensa), cercanía entre las poblaciones de aves silvestres y domésticas.
	Hay una relación positiva entre los aislamientos de la bacteria y la eutrofización de los humedales.
	La supervivencia en el agua es favorecida por materia orgánica de origen animal, temperaturas cálidas (18 a 20°C) y agua alcalina. Puede sobrevivir hasta cuatro meses en el substrato, treinta días en el agua y tres meses en cadáveres.
<b>Epidemiología</b>	Las principales epidemias se observan cuando hay mayor concentración de individuos (invernación o reproducción).
	Los brotes se ha reportado durante todo el año y hay sitios donde se presentan anualmente.

**Cuadro 2 (continuación).** Aspectos relevantes sobre el cólera aviar.

<b>Epidemiología</b>	<p>La transmisión se da por contacto directo, al ingerir la bacteria o por aerosoles. La bacteria entra al hospedero a través de las membranas mucosas o por heridas en la piel.</p>
	<p>Las descargas orales o nasales de la bacteria a partir de aves enfermas o muertas, son la fuente primaria de contaminación.</p>
	<p>La fuente común de infección más probable es el agua y los humedales son trascendentes en la transmisión a las aves susceptibles.</p>
	<p>Al parecer, las aves portadoras son el reservorio para que la enfermedad se presente anualmente (ganso nevado, <i>Chen caerulescens</i>).</p>
	<p>La mayoría de las aves no presenta signos. Puede observarse letargo, vuelo errático, convulsiones, caminar y nadar en círculos, opistótonos, descarga mucosa en narinas y cavidad oral y, en aves carroñeras, disnea y temores de la membrana nictitante.</p>
	<p>A la muerte, las aves tienen buena condición corporal y alimento en el esófago y proventrículo, sin lesiones.</p>
	<p>Puede haber petequias en el epicardio y en las membranas serosas, hemorragias en el miocardio, la banda coronaria y molleja; focos hemorrágicos y necróticos en hígado y bazo.</p>
	<p>Los pulmones pueden estar congestionados y edematosos. Los intestinos pueden contener fluido mucoso amarillento.</p>
	<p>En aves depredadoras o carroñeras puede encontrarse pericarditis fibrinosa, aerosaculitis, y neumonía focal.</p>
	<p>Las epidemias se presentan repentinamente y afectan a miles de individuos de manera aguda. La mortalidad disminuye al final de las epidemias.</p>

**Cuadro 2 (continuación).** Aspectos relevantes sobre el cólera aviar.

<b>Diagnóstico</b>	El presuntivo se sospecha cuando hay una mortalidad en poco tiempo, con pocos signos y las lesiones mencionadas. Se apoya si se observan muchos coco-bacilos en frotis de sangre del corazón o en la histopatología de diversos órganos.
	El diferencial se realiza con enfermedades que causan muertes agudas y masivas (peste del pato e intoxicaciones con plaguicidas).
	El definitivo se obtiene al aislar e identificar <i>P. multocida</i> .
<b>Tratamiento</b>	En casos leves se puede ofrecer terapia de soporte.
<b>Control</b>	Se deben considerar todos los aspectos del ecosistema afectado. Se conforma de la detección oportuna de los brotes y de medidas orientadas a evitar el contacto de los individuos susceptibles con las fuentes de infección (ahuyentar aves y remover cadáveres), evitando la dispersión de la enfermedad.
<b>Prevención</b>	La vacunación genera una inmunidad limitada pero resulta impráctico.
	La vigilancia y detección oportuna de los brotes en humedales con antecedentes, con grandes cantidades de aves y después de condiciones climáticas adversas.

**Cuadro 3.** Aspectos relevantes sobre el botulismo aviar.

Aspecto	Características
<b>Agente</b>	El botulismo aviar es causado por la ingestión de la toxina producida por la bacteria <i>Clostridium botulinum</i> .
	El tipo C es el que más se presenta en aves acuáticas. En algunos casos se diagnostica el tipo E, pero es menos frecuente.
	La distribución es amplia en el ambiente y forma esporas resistentes.
	La bacteria crece en anaerobiosis, a una temperatura entre 15 y 45°C y en un sustrato rico en proteína.
	La toxina se produce durante el estado vegetativo y requiere la infección por un bacteriófago.
<b>Hospedero</b>	Probablemente todas las aves son susceptibles, con la posible excepción de algunas carroñeras.
	Están en mayor riesgo la aves que se alimentan filtrando (patos de superficie) o sondeando (aves playeras) y las que lo hacen en aguas someras o que comen invertebrados.
<b>Ambiente</b>	Muchos brotes han ocurrido en humedales de agua dulce y alcalina, con sedimento lodoso, temperaturas elevadas y fluctuación en los niveles de agua.
	La materia orgánica necesaria para el desarrollo de la bacteria y los cadáveres de vertebrados permiten una gran producción de toxina; aunque algunos brotes se han presentado en ausencia de estos.
	El agua estancada, la contaminación con plaguicidas y la descarga de aguas residuales; favorecen los brotes.
	El riesgo es mayor si en el agua el pH es 7.5-9, el potencial redox está entre -200 y -300 y la temperatura es mayor a 25°C.
<b>Epidemiología</b>	Los brotes se han presentado durante todo el año y es probable que reincidan en los mismos sitios, pero no es determinante.

**Cuadro 3 (continuación).** Aspectos relevantes sobre el botulismo aviar.

<b>Epidemiología</b>	<p>Debido al ciclo cadáver-gusano, los brotes se pueden agravar y perpetuar; por lo tanto, la densidad de los cadáveres de vertebrados es importante.</p>
	<p>Si las aves mueren por cualquier causa, debido al ciclo cadáver-gusano puede emerger un brote.</p>
	<p>Los signos abarcan dificultades para despegar y acuatizar, aleteo débil, vuelan distancias cortas, incapacidad para volar, reman con sus alas, marcha inestable, postración, cuello flácido, pérdida del reflejo palpebral, midriasis, protrusión de la membrana nictitante y ocasionalmente, diarrea verde.</p>
	<p>Se pueden establecer tres categorías para el grado de intoxicación: en la primera las aves están responsivas pero no vuelan, en la segunda tienen problemas para caminar y conservar la cabeza en alto, y en la tercera están postradas y casi totalmente paralizadas.</p>
	<p>No hay lesiones evidentes, puede haber congestión o hiperemia en varios órganos y las aves suelen tener buena condición corporal. Por lo general no se encuentra alimento en el tracto digestivo superior; aunque se pueden hallar larvas. Los pulmones pueden presentar edema por ahogamiento.</p>
	<p>Los brotes pueden matar de cientos a miles de individuos y ser muy variables. Es la enfermedad más importante de las aves acuáticas en e mundo.</p>
<b>Diagnóstico</b>	<p>El presuntivo se basa en los signos y la falta de lesiones.</p>
	<p>Para el diferencial se deben considerar otras intoxicaciones.</p>
	<p>El definitivo se obtiene mediante la prueba positiva de bioensayo en ratón, con muestras frescas de sangre.</p>

**Cuadro 3 (continuación).** Aspectos relevantes sobre el botulismo aviar.

<b>Tratamiento</b>	En los casos leves se ofrece terapia de soporte, en los moderados o graves, se puede administrar la antitoxina. Al liberar a los individuos recuperados se debe evitar la re-exposición.
<b>Control</b>	Se recomienda la remoción de los cadáveres para disminuir la producción de la toxina y su disponibilidad a través de las larvas. También se pueden drenar o inundar los cuerpos de agua.
<b>Prevención</b>	Se debe disminuir la cantidad de materia orgánica, evitar fluctuaciones en el nivel de agua y la contaminación con residuos orgánicos.

**Cuadro 4.** Aspectos relevantes sobre la intoxicación con plomo.

<b>Aspecto</b>	<b>Características</b>
<b>Agente</b>	La intoxicación con plomo tiene lugar cuando este elemento se absorbe y alcanza niveles perjudiciales en el organismo.
	Los perdigones son la fuente más común de plomo para las aves acuáticas, y en segundo lugar, las plomadas de pesca.
	La intoxicación puede ser aguda o crónica dependiendo de la cantidad de plomo ingerida. Lo común es que sea crónica.
<b>Hospedero</b>	Se ha reportado en la mayoría de las aves acuáticas de Norteamérica. También afecta a las aves rapaces.
	Tienen mayor riesgo las aves que se alimentan filtrando.
	Las aves que consumen más granos en su dieta y los adultos están más predispuestas.
<b>Ambiente</b>	El plomo persiste y se acumula en el ambiente. Se degrada por oxidación durante décadas o cientos de años.
	Es necesario determinar los humedales que tienen cantidades problemáticas de plomo.

**Cuadro 4 (continuación).** Aspectos relevantes sobre la intoxicación con plomo.

	<p>La intoxicación puede ocurrir en cualquier momento pero es más probable después de la temporada de cacería (invierno).</p> <p>La intoxicación puede recurrir mientras exista una fuente de plomo en el ambiente (perdigones en el sedimento).</p> <p>Los signos incluyen: vuelo débil, irregular, de corta distancia y acuatizar de manera errática; aves aisladas, caminar inestable, vocalizaciones anormales, alas colgadas, secreción en el pico, diarrea verdosa en sitios de descanso y cerca de la cloaca.</p>
<b>Epidemiología</b>	<p>Las lesiones son: emaciación, grasa subcutánea y visceral ausente o escasa, músculos pectorales atrofiados, impactación, vesícula biliar aumentada, contenido de la molleja manchado de bilis, materiales de plomo en molleja o proventrículo y edema subcutáneo en la cabeza y cuello.</p> <p>Las pérdidas anuales de aves son severas y llegan a los millones de individuos.</p>
	<p>El presuntivo se sospecha con los signos, lesiones y la presencia de material de plomo en la molleja.</p> <p>Se deben considerar como diferenciales otras intoxicaciones y aves heridas por disparos.</p>
<b>Diagnóstico</b>	<p>El definitivo se obtiene con análisis toxicológicos, encontrar más de 6-8 ppm en base húmeda o 20-30 ppm en base seca es sugerente, pero se deben integrar todos los hallazgos.</p>
<b>Tratamiento</b>	<p>No se considera práctico y la tasa de éxito es baja.</p>
<b>Control</b>	<p>Se puede impedir el acceso de las aves al humedal contaminado, aumentar o disminuir el nivel del agua y eliminar los cadáveres.</p>
<b>Prevención</b>	<p>Se deben usar perdigones no tóxicos de acero o bismuto y reglamentar el tamaño mínimo de las pesas utilizadas en la pesca.</p>



### 4.3 Elaboración de los Diagramas de Dependencia-Causal

Los aspectos de las enfermedades incluidas se analizaron para determinar cuáles son las características más importantes que permiten realizar un diagnóstico o una prospección integrales de la ocurrencia de estas enfermedades. Las características fueron seleccionadas a partir de la información del Anexo 2 y son aquellas que aportan la mayor cantidad de información. Se buscó que fueran concisas y prácticas en cuanto a su obtención en campo. Estos datos se organizaron gráficamente en diagramas de dependencia-causal.

Las partes de los diagramas se representan de la siguiente manera: los atributos están en los rectángulos horizontales, los valores, sobre las líneas, las dependencias, en los triángulos y los consecuentes, en los rectángulos a la derecha de los triángulos. En algunos diagramas, los consecuentes son a su vez valores de un atributo para la siguiente dependencia y se muestran sobre la línea de dicho atributo. Las dependencias se identificaron con números consecutivos en los diagramas para facilitar el seguimiento del proceso.

#### 4.3.1 *Cólera aviar*

Se conformaron tres diagramas de dependencia: el del ambiente (Fig. 1), el del hospedero (Fig. 2) y el del riesgo de la enfermedad que conjunta los anteriores (Fig. 3).

Figura 1. Diagrama de dependencia-causal del ambiente para cólera aviar.

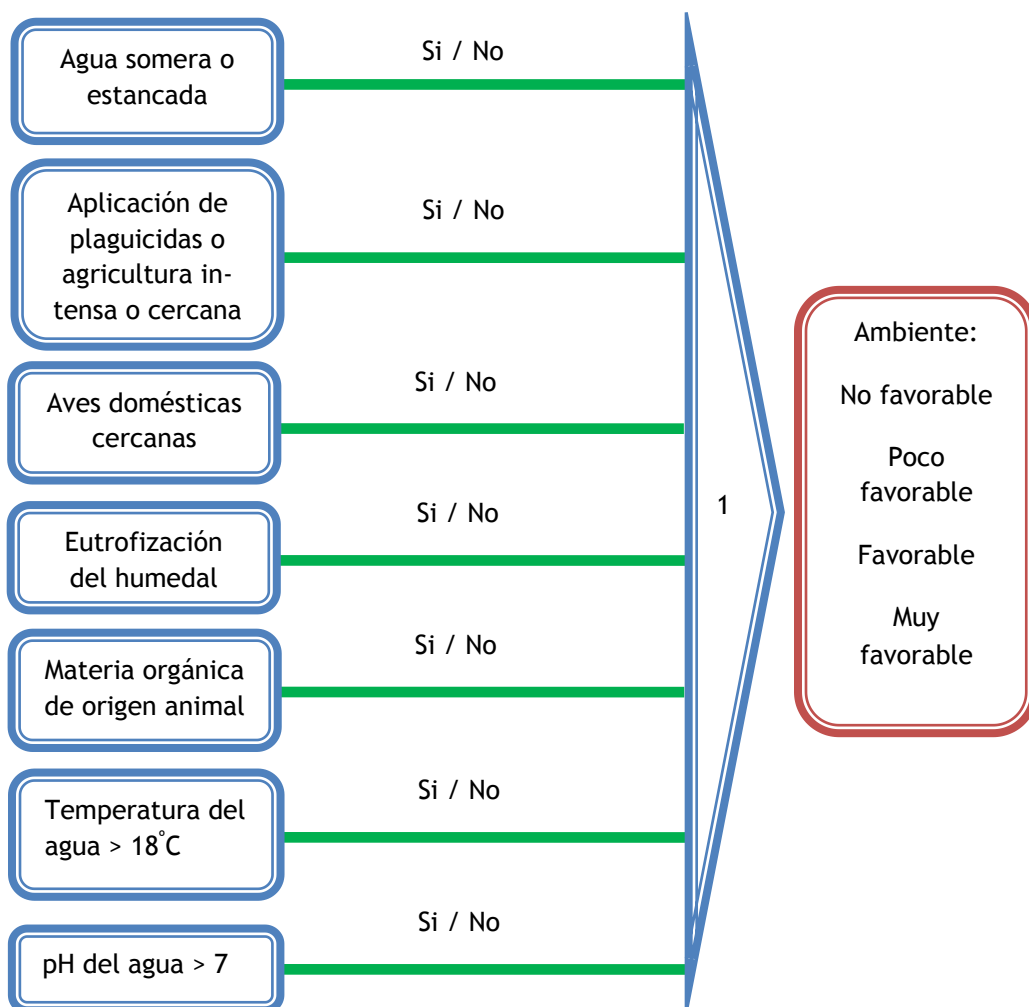
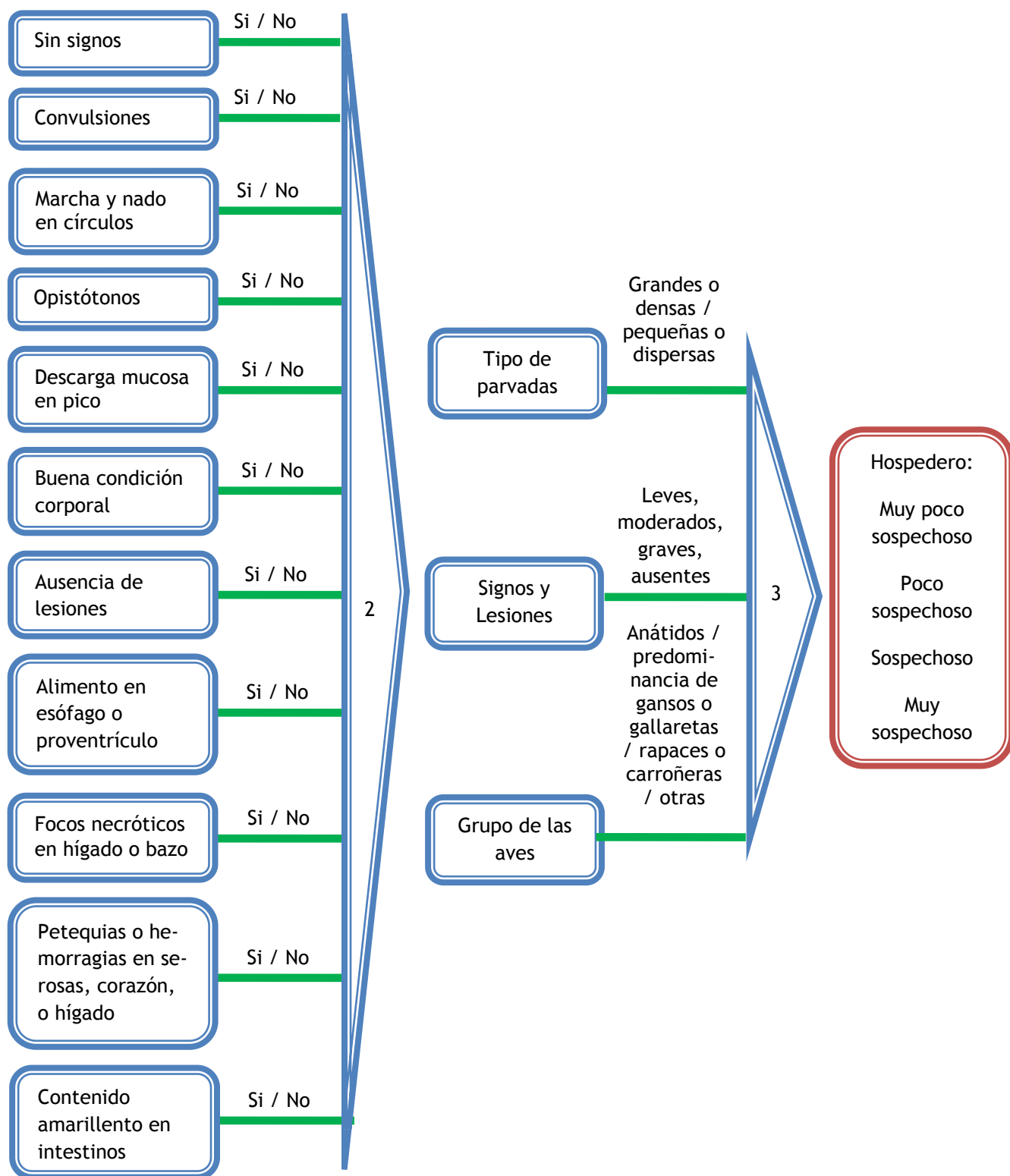
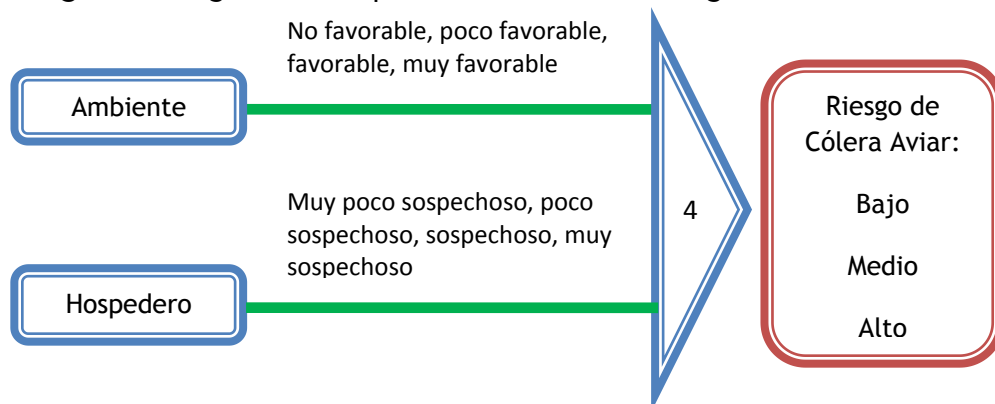


Figura 2. Diagrama de dependencia-causal del hospedero de cólera aviar.



**Figura 3.** Diagrama de dependencia-causal del riesgo de cólera aviar.



#### 4.3.2 Botulismo aviar

Se realizaron tres diagramas de dependencia, uno para el ambiente (Fig. 4), otro para el hospedero (Fig. 5) y el último para el riesgo de la enfermedad (Fig. 6). A continuación se muestran estos diagramas.

**Figura 4.** Diagrama de dependencia-causal del ambiente para botulismo aviar.

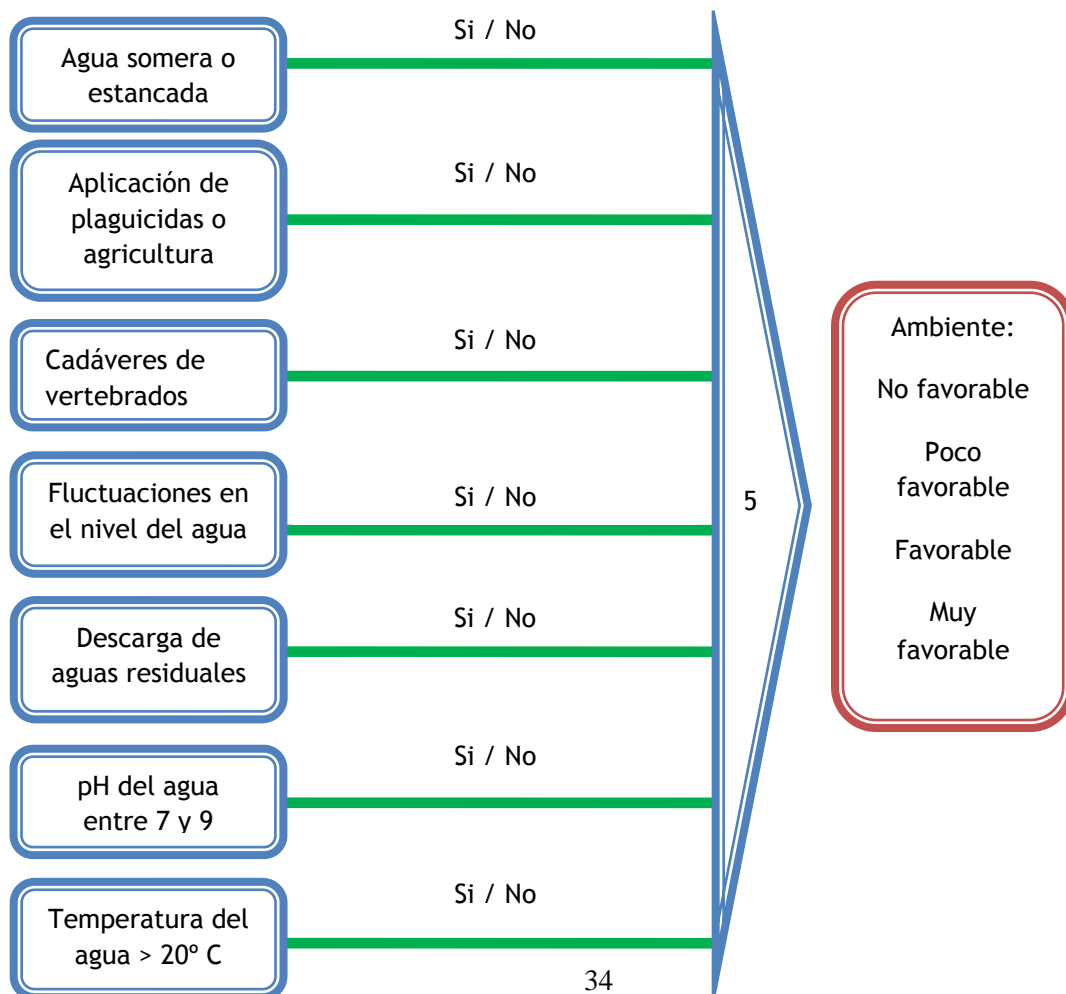
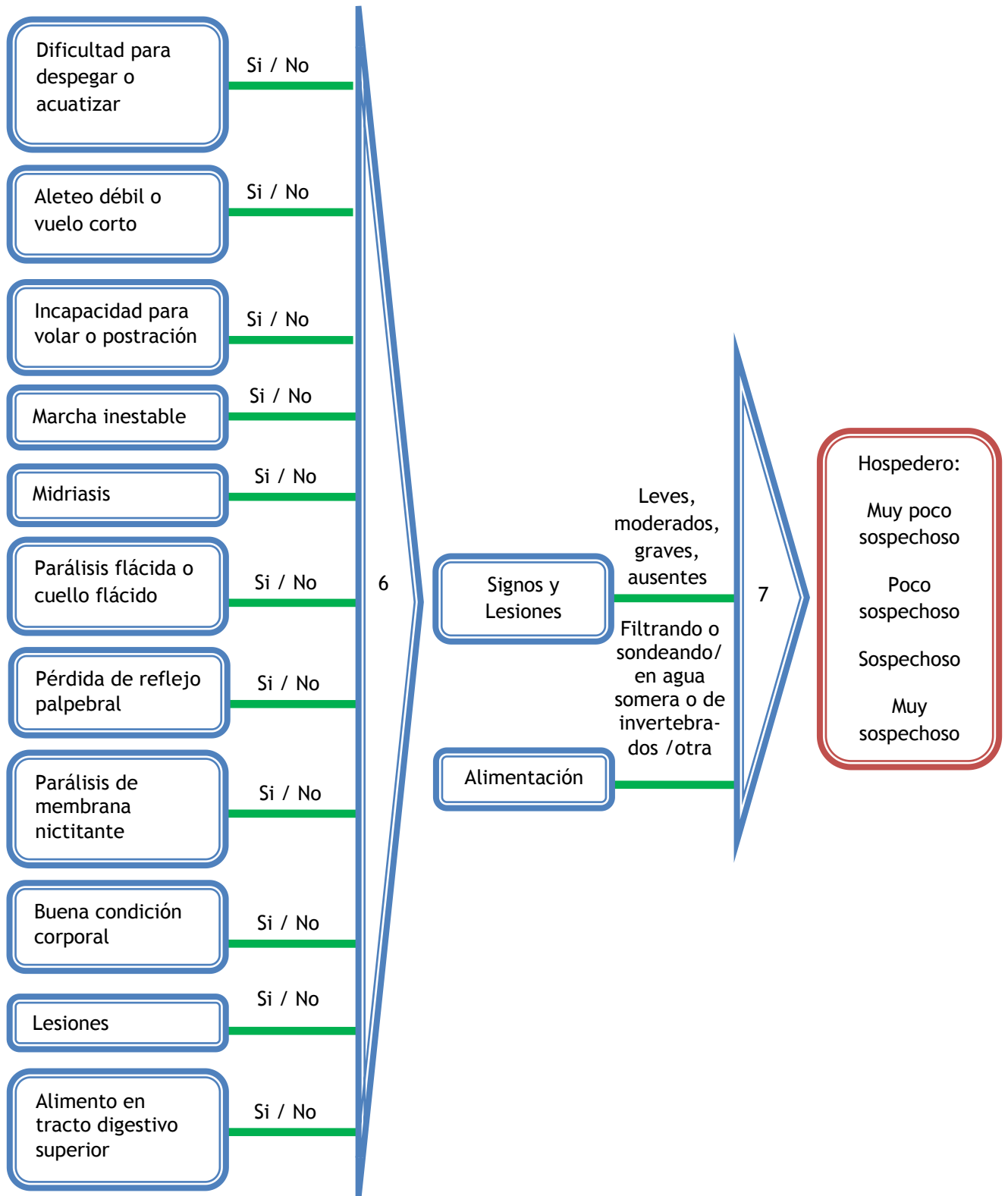
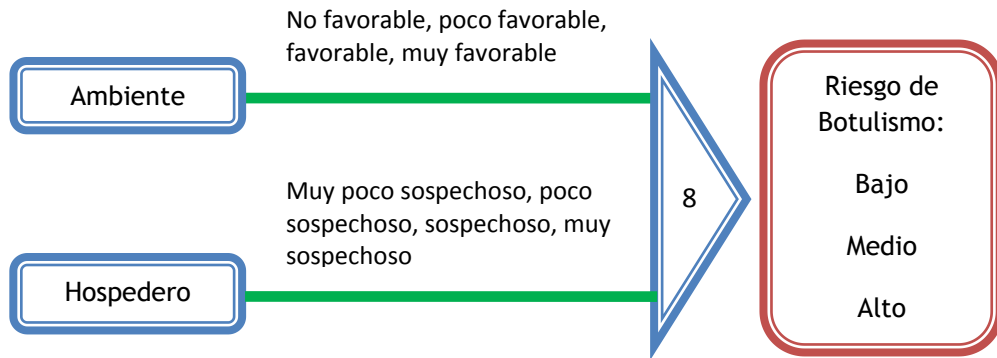


Figura 5. Diagrama de dependencia-causal del hospedero de botulismo aviar.



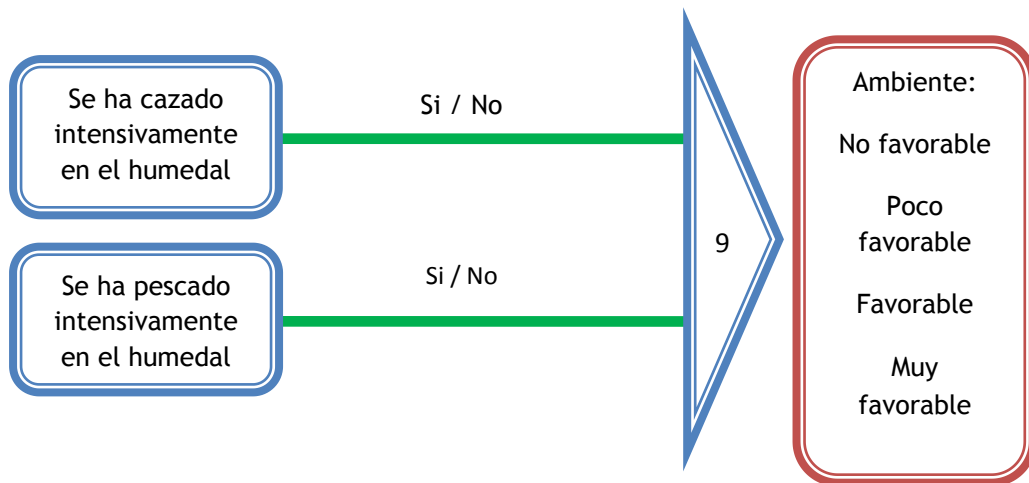
**Figura 6.** Diagrama de dependencia-causal del riesgo de botulismo aviar.



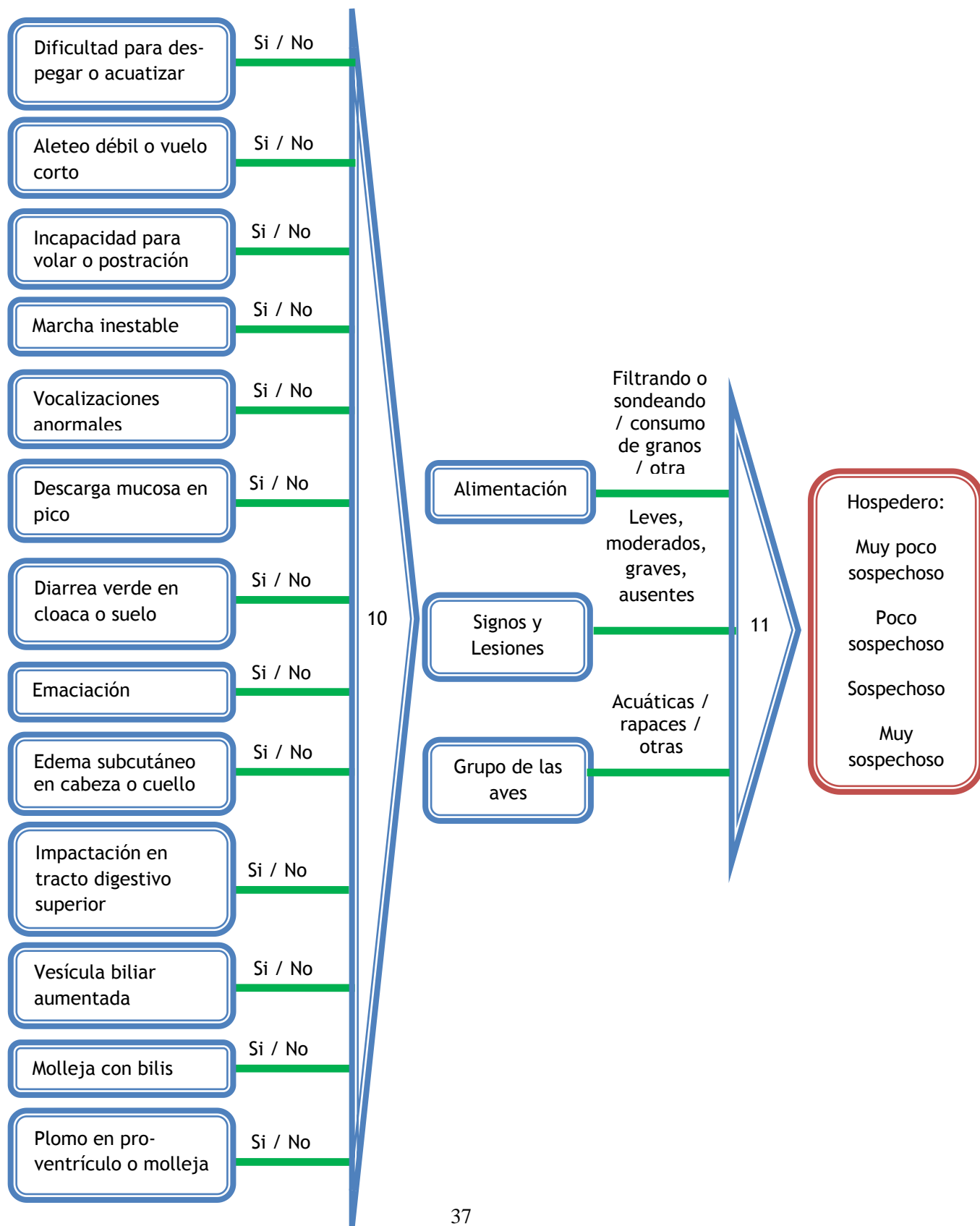
#### 4.3.3 Intoxicación con plomo

De igual manera que en las enfermedades anteriores, se integraron tres diagramas de dependencia que son: el del ambiente (Fig. 7), el del hospedero (Fig. 8) y el del riesgo que reúne los consecuentes de los anteriores (Fig. 9).

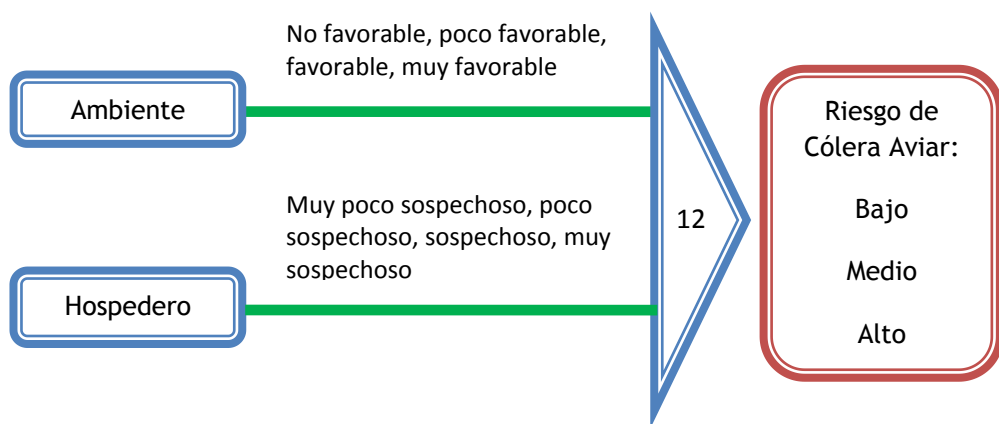
**Figura 7.** Diagrama de dependencia-causal del ambiente para la intoxicación con plomo.



**Figura 8.** Diagrama de dependencia-causal del hospedero de la intoxicación con plomo.



**Figura 9.** Diagrama de dependencia-causal del riesgo de la intoxicación con plomo.



#### 4.4 Elaboración de las Tablas de Decisión

De los diagramas de dependencia-causal, se analizaron los atributos para identificar aquellos reconocidos como los más significativos; sin embargo, en algunos casos no existe información suficiente para hacer esta diferenciación. También se buscó descartar los atributos que no son muy relevantes para el riesgo de presentación de las enfermedades; debido a que algunos están presentes en varias enfermedades, son relativos o son ambiguos. Otros atributos se agruparon por estar relacionados o tener la misma influencia en la ecología de la enfermedad, por ejemplo proveer el medio para el desarrollo bacteriano. Por último, algunos atributos tienen una causa o consecuencia común que se puede observar en campo y a su vez es otro atributo; por lo tanto, se consideraron en conjunto. Los atributos y los consecuentes se resaltan en el texto con letras cursivas. La información de este apartado se tomó del Anexo 2, en el cual se encuentra referenciada.

Para cada dependencia de los diagramas se realizó una tabla de decisión y en el encabezado de las tablas se menciona el número de la dependencia y de la figura en la que se encuentra el diagrama correspondiente. En los diagramas de dependencia y las tablas de decisión se tienen cuatro consecuentes para el ambiente (no favorable, poco favorable, favorable y muy favorable), cuatro para el hospedero (muy poco sospechoso,



poco sospechoso, sospechoso y muy sospechoso) y tres para el riesgo de presentación de la enfermedad (bajo, medio y alto).

#### 4.4.1 Cólera aviar

**Ambiente:** en el caso del cólera aviar sólo se mencionan factores ambientales predisponentes en general; por tal motivo, no es posible establecer algún tipo de jerarquía entre ellos, y se consideró únicamente que a mayor número de características presentes en un momento dado, más favorable sería el ambiente para la presentación de esta enfermedad. Algunas de estas características o atributos se pudieron agrupar por estar relacionadas.

El primer grupo está conformado por el *agua somera*, *agua estancada*, *eutrofización del humedal* y *presencia de materia orgánica de origen animal*. Estos atributos se unieron con una conjunción disyuntiva “o” para indicar que la presencia de cualquiera de ellos aporta el medio que favorece la persistencia de la bacteria en el agua y por lo tanto se facilita la transmisión.

Por la asociación que se presenta entre la *aplicación de plaguicidas* y la *agricultura intensa o cercana*, estos dos atributos también se unieron y se consideró que si se observa cualquiera de ellos se facilita la presentación de la enfermedad; ya sea por favorecer la presencia de materia orgánica o la eutrofización de los cuerpos de agua, o por ser factores estresantes para las aves que las vuelven más susceptibles a la infección.

La *temperatura* y el *pH* tienen un papel importante en la supervivencia de la bacteria fuera del hospedero; por lo que si ambos se encuentran en los valores adecuados, la bacteria persiste en el ambiente durante más tiempo y aumentan las posibilidades de transmisión.

La *cercanía con aves de corral* no se consideró en la tabla de decisión debido a que el riesgo que representan es muy relativo y difícil de evaluar; además de que se ha reportado en pocas ocasiones.

Si se presentan todos los atributos, el ambiente se consideró *muy favorable*, si hay dos, fue *favorable*, si se encuentra sólo uno, fue *poco favorable* y si no se presenta ninguno, se consideró *no favorable* (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Tabla de decisión de la dependencia 1-Ambiente (Fig.1).

Agua somera o estancada o eutrofización o presencia de materia orgánica de origen animal	Aplicación de plaguicidas o agricultura intensa o cercana	Temperatura > 18°C y pH > 7	Ambiente
Si	Si	Si	Muy favorable
Si	Si	No	Favorable
Si	No	Si	Favorable
No	Si	Si	Favorable
Si	No	No	Poco favorable
No	Si	No	Poco Favorable
No	No	Si	Poco Favorable
No	No	No	No favorable

**Signos y lesiones:** una situación similar se presenta con los signos y las lesiones reportadas para cólera aviar, ya que no se especifica si alguno es más característico o representativo de la enfermedad, salvo la *ausencia de signos*, la cual es relativamente común en los brotes de esta enfermedad. La *ausencia de signos* se consideró como un atributo independiente y con una mayor relevancia que la presencia de cualquiera de los otros signos.

Los signos importantes que se han reportado son *convulsiones*, *marcha o nado en círculos* y *opistótonos*, y debido a que son de tipo neurológico, fueron agrupados. Si se presenta cualquiera de ellos es sugerente de la enfermedad.

Puesto que esta enfermedad causa muerte súbita, es común encontrar individuos con *buena condición corporal* y *alimento en el tracto digestivo superior* (sin tratarse de

impactación). Estos hallazgos en conjunto ayudan a diferenciarla del botulismo aviar, ya que en éste las aves tienen buena condición corporal pero es raro que tengan alimento.

Las lesiones ocasionadas por *P. multocida* se agruparon debido a que son consecuencia de la septicemia y la endotoxina de la bacteria, y son distintas a las que se pueden encontrar en las otras enfermedades. Estas lesiones son: *petequias o hemorragias en serosas, hígado o corazón y necrosis focal en hígado o bazo*. Si alguna de ellas se presenta es más probable que las aves hayan muerto por la infección.

De los signos y lesiones que se han reportado, se excluyeron la *descarga nasal*, el *contenido amarillento en los intestinos* y la *ausencia de lesiones*; debido a que se han presentado en pocas ocasiones o son menos específicos.

Se consideró que a mayor número de signos y lesiones, el consecuente tiene mayor trascendencia, salvo por la ausencia de signos, lo cual es más importante que la presencia de signos. En este caso no se pueden presentar todos los atributos pues la *ausencia de signos* y los signos nerviosos son mutuamente excluyentes, por lo que si se presentan tres atributos los signos y lesiones se consideraron *graves*, al igual que si se presenta algún atributo en combinación con la ausencia de signos. A la combinación de dos de los demás atributos se le asignó el consecuente de *moderados*; si sólo se presentó un atributo fue *leves* y si no hubo alguno, fue *ausentes* (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Tabla de decisión de la dependencia 2-Signos y lesiones (Fig.2).

Sin signos	Convulsiones o marcha o nado en círculos, u opistótonos	Buena condición corporal y alimento en esófago o proventrículo	Petequias o hemorragias en serosas, hígado o corazón, o necrosis focal en hígado o bazo	Signos y lesiones
Si	No	Si	Si	Graves
No	Si	Si	Si	Graves
Si	No	Si	No	Graves
Si	No	No	Si	Graves
No	Si	Si	No	Moderados
No	Si	No	Si	Moderados
No	No	Si	Si	Moderados
Si	No	No	No	Leves
No	Si	No	No	Leves
No	No	Si	No	Leves
No	No	No	Si	Leves
No	No	No	No	Ausentes

**Hospedero:** los signos y lesiones son elementos primordiales para orientar el diagnóstico de esta enfermedad, pero también es necesario considerar el gregarismo de las aves y las especies involucradas. A pesar de que las *parvadas de aves densas o grandes* tienen más posibilidades de ser afectadas por el cólera aviar, esta característica también puede estar presente en brotes de botulismo o intoxicación con plomo; por lo tanto el tipo de parvada no ayuda a discernir las enfermedades y no se incluyó en la tabla de decisión. Las aves *rapaces, carroñeras* y los *anátidos* fueron excluidas porque también son susceptibles a las otras enfermedades y diferenciarlas en un brote no contribuye a diagnóstico.

Se ha observado que en algunos brotes de cólera aviar la mortandad en las poblaciones de *gallareta (Fulica americana)* y de *ganso nevado (Chen caerulescens)* excede a la de otras especies, por lo que este fenómeno puede ser indicativo de la enfermedad. No

obstante, calcular la mortalidad proporcional con precisión durante un brote puede ser difícil, además de que la bacteria tiene la capacidad de infectar a muchas especies. Por lo tanto, estos atributos no fueron considerados en la tabla de decisión y en esta dependencia sólo los signos y lesiones determinan que tan sospechoso es el hospedero. De tal manera que los consecuentes de los signos y lesiones corresponden directamente con los de la susceptibilidad del hospedero (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Tabla de decisión de la dependencia 3-Hospedero (Fig.2).

Signos y lesiones	Hospedero
Graves	Muy sospechoso
Moderados	Sospechoso
Leves	Poco sospechoso
Ausentes	Muy poco sospechoso

**Riesgo:** al conjuntar los consecuentes del ambiente con los del hospedero, se formó la tabla de dependencia del riesgo de presentación del cólera aviar. Para facilitar la asignación de los consecuentes del riesgo de cólera aviar, se asignaron pesos numéricos. El peso del ambiente *muy favorable*, y del hospedero *muy sospechoso*, fue de 4; el del ambiente *favorable* y del hospedero *sospechoso*, fue 3; el del ambiente *poco favorable* y del hospedero *poco sospechoso*, fue 2; y para el ambiente *no favorable* y el hospedero *muy poco sospechoso* fue 1.

Posteriormente, se sumaron los pesos de las combinaciones de los valores y si el resultado fue 7 u 8, el riesgo de cólera aviar se estableció como *alto*, si fue 5 o 6 el riesgo se determinó como *medio*, y si fue 2, 3 o 4 el riesgo correspondiente fue *bajo* (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Tabla de decisión de la dependencia 4-Riesgo de cólera aviar (Fig.3).

Ambiente	Hospedero	Riesgo de Cólera aviar
Muy favorable	Muy sospechoso	Alto
Muy favorable	Sospechoso	Alto
Muy favorable	Poco sospechoso	Medio
Muy favorable	Muy poco sospechoso	Medio
Favorable	Muy sospechoso	Alto
Favorable	Sospechoso	Medio
Favorable	Poco sospechoso	Medio
Favorable	Muy poco sospechoso	Bajo
Poco favorable	Muy sospechoso	Medio
Poco favorable	Sospechoso	Medio
Poco favorable	Poco sospechoso	Bajo
Poco favorable	Muy poco sospechoso	Bajo
No favorable	Muy sospechoso	Medio
No favorable	Sospechoso	Bajo
No favorable	Poco sospechoso	Bajo
No favorable	Muy poco sospechoso	Bajo

#### 4.4.2 Botulismo aviar

**Ambiente:** la presencia de materia orgánica es determinante para la ocurrencia de la enfermedad y se sabe que los *cadáveres de vertebrados* favorecen en gran medida la producción de la toxina, por lo que se consideró que este factor era más importante que las otras fuentes de materia orgánica.

Las *fluctuaciones en el nivel de agua, la contaminación con aguas residuales o plaguicidas, la actividad agrícola intensa y el agua somera o estancada*, aumentan la cantidad de materia orgánica para el desarrollo de la bacteria. Por lo tanto, se agruparon y se consideró que la presencia de cualquiera de ellos favorece la producción de la toxina.

Los demás atributos (*pH* y *temperatura*) no son estrictamente determinantes pero influyen conjuntamente en el riesgo de presentación del botulismo, por lo tanto se consideró que su trascendencia era menor.

La presencia de *cadáveres de vertebrados* por sí sola genera una ambiente *favorable* para la ocurrencia de la enfermedad y si adicionalmente hay otras fuentes de materia orgánica, el consecuente asignado fue *muy favorable*. Si se encuentran otras fuentes de materia orgánica y las condiciones propicias del agua, el ambiente es *favorable*; pero si solo se haya alguno de estos atributos, es *poco favorable* (Cuadro 9).

**Cuadro 9.** Tabla de decisión de la dependencia 5-Ambiente (Fig.4).

Cadáveres de vertebrados	Agua somera o estancada, o plaguicidas o agricultura, o fluctuaciones del nivel del agua, o descarga de aguas residuales	pH (7-9) y temperatura >20°C	Ambiente
Si	Si	Si	Muy favorable
Si	Si	No	Muy favorable
Si	No	Si	Favorable
No	Si	Si	Favorable
Si	No	No	Favorable
No	Si	No	Poco Favorable
No	No	Si	Poco Favorable
No	No	No	No favorable

**Signos y lesiones:** durante un brote de botulismo se pueden apreciar distintos signos en varios individuos, dependiendo del grado de la afectación y el momento de la observación; lo cual genera una gama amplia de combinaciones.

Los signos se agruparon de acuerdo con su gravedad o especificidad. En el grupo uno se encuentra los signos considerados leves o poco específicos (*dificultad para despegar y acuatizar, aleteo débil o vuelo corto*), en el dos los que son moderados (*incapacidad*

*para volar o marcha inestable*) y en el tres, los graves o más sugerentes (*postración, parálisis flácida o cuello flácido, pérdida de reflejo palpebral, midriasis, o parálisis de la membrana nictitante*).

La *buena condición corporal* y la *ausencia de alimento en el tracto digestivo superior* son hallazgos que orientan el diagnóstico, pero algo inespecíficos por lo que se incluyeron en el grupo dos (moderados). Por otra parte, la *ausencia de lesiones* es sugerente de botulismo pero puede encontrarse en otras intoxicaciones, por lo que se incluyó también en el grupo dos.

El estado general de los signos, que es el consecuente de esta dependencia, se definió en las mismas categorías que los grupos de los signos (*leves, moderados y graves*). Si se presentan sólo los signos de un grupo, el estado general es igual al tipo de grupo; si existen combinaciones entre los grupos, el estado general corresponde al tipo de más severo. Las posibles combinaciones de los grupos de signos y el estado general de los signos se observan en el Cuadro 10.

**Cuadro 10.** Tabla de decisión de la dependencia 6-Signos (Fig.5).

<b>1.- Dificultad para despegar y acuatizar o aleteo débil o vuelo corto</b>	<b>2.- Incapacidad para volar o marcha inestable, o buena condición corporal, o ausencia de alimento en el tracto digestivo superior, o ausencia de lesiones</b>	<b>3.- Postración, o parálisis flácida o cuello flácido, pérdida de reflejo palpebral, o midriasis, o parálisis de la membrana nictitante</b>	<b>Signos y lesiones</b>
Si	No	No	Leves
No	Si	No	Moderados
No	No	Si	Graves
Si	Si	No	Moderados
No	Si	Si	Graves
Si	No	Si	Graves
Si	Si	Si	Graves
No	No	No	Ausentes



**Hospedero:** los tipos de alimentación considerados predisponentes para la presentación de botulismo han sido *filtrando o sondeando, alimentación en agua somera o consumo de invertebrados*; sin embargo, la mayoría de las especies de aves acuáticas se alimentan de alguna de estas formas, con algunas excepciones como el grupo de las garzas. Además, las que lo hacen de estas maneras, también son las más susceptibles a las otras enfermedades; por esto, el tipo de alimentación se excluyó de la tabla de decisión.

En esta dependencia sólo los consecuentes de los signos y lesiones determinan que tan sospechoso puede ser un hospedero; por lo tanto, se relacionan directamente (Cuadro 11).

**Cuadro 11.** Tabla de decisión de la dependencia 7-Hospedero (Fig.5).

Signos y lesiones	Hospedero
Graves	Muy sospechoso
Moderados	Sospechoso
Leves	Poco sospechoso
Ausentes	Muy poco sospechoso

**Riesgo:** la integración de las condiciones del ambiente con el grado en el que el hospedero es sospechoso de la enfermedad, proporciona el riesgo general de la presencia de botulismo aviar. El cual se definió mediante pesos numéricos asignados a los valores de los atributos correspondientes. Para el valor del ambiente *muy favorable*, y para el hospedero *muy sospechoso*, el peso fue 4; para el ambiente *favorable* y el hospedero *sospechoso*, fue 3; para el ambiente *poco favorable* y el hospedero *poco sospechoso*, fue 2; y para el ambiente *no favorable* y el hospedero *muy poco sospechoso* fue 1.

Posteriormente se sumaron los pesos de las combinaciones de valores y si el resultado fue 7 u 8, el riesgo de botulismo se estableció como *alto*, si fue 5 o 6 el riesgo se

determinó el riesgo como *medio* y si fue 2, 3 o 4 el riesgo correspondiente fue *bajo* (Cuadro 12).

**Cuadro 12.** Tabla de decisión de la dependencia 8-Riesgo de Botulismo (Fig.6).

Ambiente	Hospedero	Riesgo de Botulismo
Muy favorable	Muy sospechoso	Alto
Muy favorable	Sospechoso	Alto
Muy favorable	Poco sospechoso	Moderado
Muy favorable	Muy poco sospechoso	Moderado
Favorable	Muy sospechoso	Alto
Favorable	Sospechoso	Moderado
Favorable	Poco sospechoso	Moderado
Favorable	Muy poco sospechoso	Bajo
Poco favorable	Muy sospechoso	Moderado
Poco favorable	Sospechoso	Moderado
Poco favorable	Poco sospechoso	Bajo
Poco favorable	Muy poco sospechoso	Bajo
No favorable	Muy sospechoso	Moderado
No favorable	Sospechoso	Bajo
No favorable	Poco sospechoso	Bajo
No favorable	Muy poco sospechoso	Bajo

#### 4.4.3 Intoxicación con plomo

**Ambiente:** se menciona que los factores predisponentes son las fuentes de contaminación. Los perdigones o postas provenientes de las actividades cinegéticas son la más determinante y en segundo lugar se consideran a las plomadas o pesos que se utilizan en los aparejos de pesca; otras fuentes del metal son menos frecuentes.

En la tabla de decisión (Cuadro13) se muestran las consecuencias para el ambiente: *no favorable, poco favorable, favorable y muy favorable*. Si en algún momento en un

humedal se caza y se pesca intensivamente, el ambiente resulta *muy favorable* para la presentación de la enfermedad, si sólo se caza es *favorable*, si sólo se pesca es *poco favorable* (debido a que los perdigones son más importantes que las pesas de pesca) y si no se realizan estas actividades, el ambiente es *no favorable*.

**Cuadro 13.** Tabla de decisión de la dependencia 9-Ambiente (Fig.7).

Se ha cazado intensivamente en el humedal	Se ha pescado intensivamente en el humedal	Ambiente
Si	Si	Muy favorable
Si	No	Favorable
No	Si	Poco favorable
No	No	No favorable

**Signos y lesiones:** a diferencia del botulismo, para la intoxicación con plomo no se encontró una clasificación de los signos y lesiones, pero si se menciona cuáles son los más distintivos y se pueden agrupar por su severidad y especificidad.

En el primer grupo se colocaron los signos poco indicativos de la enfermedad como la *dificultad para despegar o acuatizar y aleteo débil o vuelo corto*. Los signos y lesiones moderados fueron la *incapacidad para volar o postración, marcha inestable, diarrea verde, vesícula biliar aumentada de tamaño, molleja con bilis o plomo*. Se consideró que los signos graves y más específicos de la enfermedad son la *emaciación, edema subcutáneo en cabeza o cuello y la impactación del tracto digestivo superior*.

Las *vocalizaciones anormales* y la *descarga mucosa en el pico* se han reportado poco o no son muy específicas de la intoxicación, por lo que se descartaron.

Si se presentan los signos de algún grupo, el consecuente asignado fue el mismo del tipo de grupo (*leves, moderados y graves*), si se presentan combinaciones entre los grupos, el consecuente fue el del grupo más severo y si no están estos signos o lesiones, fue *ausentes*. (Cuadro 14).

**Cuadro 14.** Tabla de decisión de la dependencia 10-Signos y lesiones (Fig.8).

1.- Dificultad para despegar y acuatar o aleteo débil o vuelo corto	2.- Incapacidad para volar o postración, marcha inestable, diarrea verde, vesícula biliar aumentada, molleja con bilis o plomo	3.- Emaciación, edema subcutáneo en cabeza o cuello y la impactación del tracto digestivo superior	Signos y lesiones
Si	No	No	Leves
No	Si	No	Moderados
No	No	Si	Graves
Si	Si	No	Moderados
No	Si	Si	Graves
Si	No	Si	Graves
Si	Si	Si	Graves
No	No	No	Ausentes

**Hospedero:** además de los signos y lesiones, el grupo de las aves en cuestión y sus preferencias alimenticias son elementos que influyen en la presentación de la enfermedad. Se sabe que hay grupos más vulnerables a la intoxicación con plomo y en primer lugar están las aves acuáticas, seguidas por las rapaces; pero debido a que el sistema está enfocado a las aves acuáticas y estas son vulnerables a las otras enfermedades, no se puede hacer una distinción útil.

La toxicidad del plomo puede aumentar por el consumo de granos, especialmente el maíz y las aves que buscan su alimento filtrando o sondeando están en mayor riesgo. No obstante, muchas de las especies de aves acuáticas tienen alguno de estos comportamientos, por lo que estos atributos no se incluyeron en la tabla de decisión.

Al igual que en las otras enfermedades, solamente los consecuentes de los signos y lesiones definen que tan sospechoso puede ser un hospedero, y por esto la relación fue directa (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** Tabla de decisión de la dependencia 11-Hospedero (Fig.8).

Signos y lesiones	Hospedero
Graves	Muy sospechoso
Moderados	Sospechoso
Leves	Poco sospechoso
Ausentes	Muy poco sospechoso

**Riesgo:** se realizó una tabla de decisión a partir de las consecuencias de las tablas del ambiente y del hospedero. La asignación de los consecuentes de esta tabla se realizó de igual manera que para las enfermedades anteriores, asignando pesos numéricos a los valores. El peso del ambiente *muy favorable*, y del hospedero *muy sospechoso*, fue de 4; el del ambiente *favorable* y del hospedero *sospechoso*, fue 3; el del ambiente *poco favorable* y del hospedero *poco sospechoso*, fue 2; y para el ambiente *no favorable* y el hospedero *muy poco sospechoso* fue 1. Si el resultado de las suma de los pesos fue 7 u 8, el riesgo determinó como *alto*, si fue 5 o 6 se asignó el riesgo *moderado* y si fue 2, 3 o 4 el riesgo correspondiente fue *bajo* (Cuadro 16).

**Cuadro 16.** Tabla de decisión de la dependencia 12-Riesgo de intoxicación con plomo (Fig.9).

Ambiente	Hospedero	Riesgo de Intoxicación con plomo
Muy favorable	Muy sospechoso	Alto
Muy favorable	Sospechoso	Alto
Muy favorable	Poco sospechoso	Moderado
Muy favorable	Muy poco sospechoso	Moderado
Favorable	Muy sospechoso	Alto
Favorable	Sospechoso	Moderado
Favorable	Poco sospechoso	Moderado
Favorable	Muy poco sospechoso	Bajo
Poco favorable	Muy sospechoso	Moderado
Poco favorable	Sospechoso	Moderado
Poco favorable	Poco sospechoso	Bajo
Poco favorable	Muy poco sospechoso	Bajo
No favorable	Muy sospechoso	Moderado
No favorable	Sospechoso	Bajo
No favorable	Poco sospechoso	Bajo
No favorable	Muy poco sospechoso	Bajo

#### 4.5 Elaboración de las Reglas de Producción

Las reglas de producción se realizaron a partir de las relaciones mostradas en las tablas de decisión, entre los valores de los atributos y las consecuencias posibles. Su estructura consiste en las cláusulas condicionales que se unen para generar una conclusión. Debido a que se unieron varios atributos por grupos y se consideró que la presencia de cualquiera de ellos representa la misma posibilidad en cuanto a la característica de la enfermedad, estos se unieron con conjunciones disyuntivas “o”. Cada grupo de atributos se unió con los otros grupos con conjunciones copulativas “y”, en los casos en los que se necesitaban presentar dichos grupos para generar el consecuente. A continuación se

mencionan algunos ejemplos de las reglas; en negritas se resaltan el condicional (si), la conjunción de los grupos de atributos (y, o) y el consecuente (entonces); en cursivas se encuentran los atributos y el nombre de la regla se indica con la letra “R” y su número correspondiente.

La forma general de las reglas es como en la primera regla para el ambiente de cólera aviar:

**R1:** *Si agua somera o estancada o eutrofización o presencia de materia orgánica de origen animal = Si, Y aplicación de plaguicidas o agricultura intensa = Si, Y temperatura > 18°C y pH > 7 = Si; Entonces ambiente = muy favorable.*

En la mayoría de las tablas de decisión el valor de los atributos se refiere a su presencia o ausencia, es decir que son “Si” o “No”. En el caso del diagnóstico, lo que se busca principalmente es encontrar evidencia que señale hacia una u otra enfermedad; por lo tanto, las reglas de producción se integraron sólo con los atributos cuyos valores son afirmativos. Por ejemplo, la primera regla para los signos y lesiones de cólera aviar es de la siguiente manera:

**R9:** *Si sin signos = Si, Y buena condición corporal y alimento en esófago o proventrículo = Si, Y petequias o hemorragias en serosas, hígado o corazón, o necrosis focal en hígado o bazo = Si; Entonces signos y lesiones = graves.*

En la regla anterior no es necesario incluir otra cláusula que estipule: “*convulsiones o marcha o nado en círculos, u opistótonos = No*”. Empero, es necesario conservar las reglas en las que todas las cláusulas son negativas, como las de las tablas de decisión de ambiente y, signos y lesiones; porque aportan un consecuente único (*no favorable o ausentes*) que es utilizado por las reglas de las tablas de decisión del hospedero y las del riesgo de las enfermedades.

En un principio, este procedimiento permitió incluir todas las combinaciones que en total representan 108 reglas. Pero posteriormente, al realizar la validación y revisar su consistencia, fue posible simplificarlas y eliminar las repetidas y algunas que no aportaban utilidad al sistema. Por ejemplo las reglas R41 y R42 del ambiente para el botulismo aviar tienen diferentes valores para el atributo de *temperatura* y *pH* pero el

consecuente es el mismo (ambiente muy favorable); por lo tanto este atributo no aporta utilidad al sistema y al eliminarlo, se reducen estas dos reglas en una (R41 y R42):

**R41:** Si *cadáveres de vertebrados* = Si, Y *agua somera o estancada, o plaguicidas o agricultura, o fluctuaciones del nivel del agua, o descarga de aguas residuales* = Si, Y *pH (7-9) y temperatura >20°C* = Si; **Entonces ambiente = muy favorable.**

**R42:** Si *cadáveres de vertebrados* = Si, Y *agua somera o estancada, o plaguicidas o agricultura, o fluctuaciones del nivel del agua, o descarga de aguas residuales* = Si, Y *pH (7-9) y temperatura >20°C* = No; **Entonces ambiente = muy favorable.**

**R41 y R42:** Si *cadáveres de vertebrados* = Si, Y *agua somera o estancada, o plaguicidas o agricultura, o fluctuaciones del nivel del agua, o descarga de aguas residuales* = Si; **Entonces ambiente = muy favorable.**

Otra situación que se presentó fue que cuando varios atributos tienen un valor afirmativo y el consecuente es el mismo para todos. En este caso las reglas se unieron con conjunciones disyuntivas para simplificarlas. Se pueden mencionar las reglas R16 a R 19 de los signos y lesiones del cólera aviar, inicialmente tenían la siguiente forma:

**R16:** Si *sin signos* = Si; **Entonces signos y lesiones = leves.**

**R17:** Si *convulsiones o marcha o nado en círculos, u opistótonos* = Si; **Entonces signos y lesiones = leves.**

**R18:** Si *buena condición corporal y alimento en esófago o proventrículo* = Si; **Entonces signos y lesiones = leves.**

**R19:** Si *petequias o hemorragias en serosas, hígado o corazón, o necrosis focal en hígado o bazo* = Si; **Entonces signos y lesiones = leves.**

Estas reglas se unieron resultando en una forma más simple:

**R16, R17, R18 y R19:** Si *sin signos* = Si, O *convulsiones o marcha o nado en círculos, u opistótonos* = Si, O *buena condición corporal y alimento en esófago o proventrículo* = Si, O *petequias o hemorragias en serosas, hígado o corazón, o necrosis focal en hígado o bazo* = Si; **Entonces signos y lesiones = leves.**



En los casos en los que un atributo tiene el mismo valor en dos reglas, otro atributo tiene valores diferentes y el consecuente es el mismo; ambas reglas también se simplificaron con una conjunción disyuntiva que une los valores diferentes del atributo. Esto se observa en las reglas R25 y R26 del riesgo de presentación de cólera aviar:

**R25:** Si *ambiente* = muy favorable Y *hospedero* = muy sospechoso; **Entonces** riesgo de cólera aviar = **alto**.

**R26:** Si *ambiente* = muy favorable Y *hospedero* = sospechoso; **Entonces** riesgo de cólera aviar = **alto**.

**R25 y R26:** Si *ambiente* = muy favorable Y *hospedero* = muy sospechoso o sospechoso; **Entonces** riesgo de cólera aviar = **alto**.

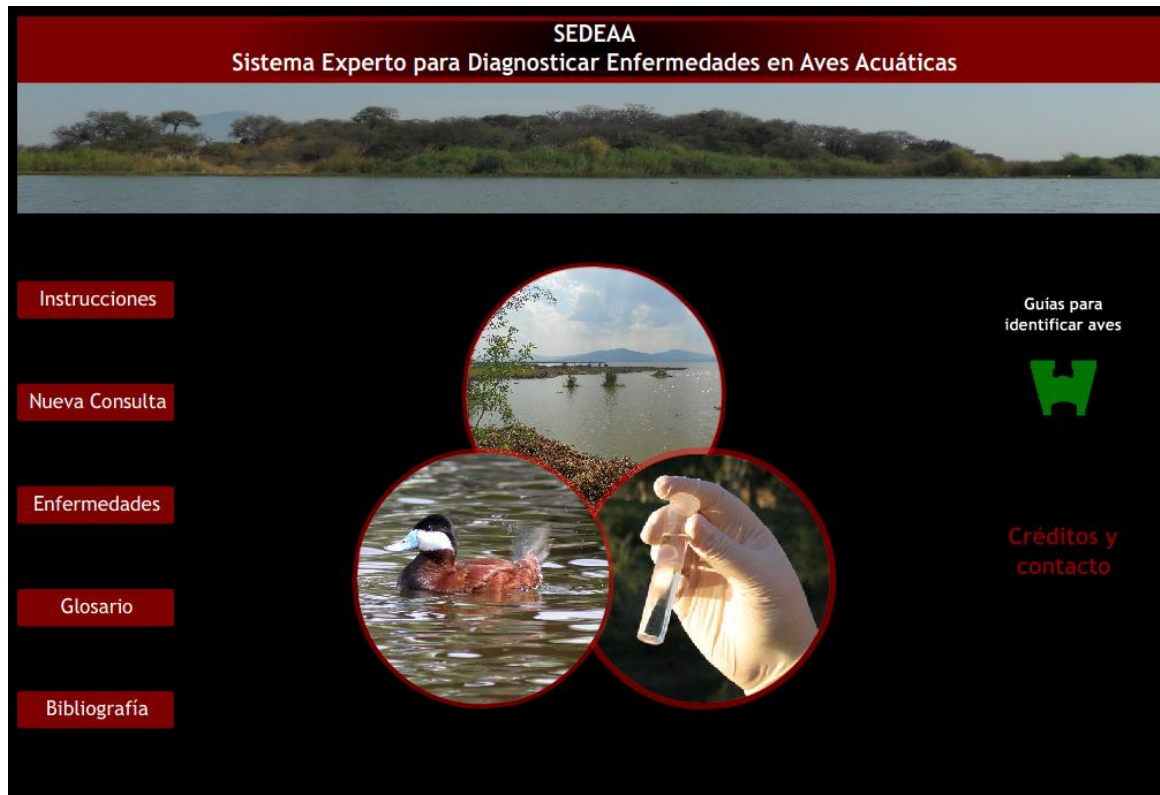
Después de realizar las simplificaciones y uniones la cantidad final de reglas fue 75, lo cual facilita la programación.

#### 4.6 Estructuración de la Interfaz Gráfica del Sistema Experto

El sistema experto debe proporcionar asesoría en el diagnóstico, prevención y control de las enfermedades primordiales en las aves acuáticas e información básica sobre el tema, de tal manera que constituya una herramienta integral de ayuda. Para esto es necesario un medio por el cual el usuario acceda a la base de conocimiento, representada con las regla de producción, y realice las consultas. Este medio es la interfaz gráfica y se buscó que fuera agradable y fácil de usar para el usuario, por lo que se realizó en el programa Macromedia Flash®.<sup>27</sup> El nombre del sistema experto es SEDEAA, Sistema Experto para Diagnosticar Enfermedades en Aves Acuáticas.

La interfaz gráfica se conforma de pantallas, menús, opciones e información que está disponible para las consultas. Las pantallas del sistema experto son: Principal, Instrucciones, Nueva consulta, Enfermedades, Glosario, Bibliografía y Créditos y contacto. La pantalla principal muestra el nombre del sistema experto y los botones que permiten acceder a las demás pantallas (Fig. 10).

Figura 10. Pantalla principal del sistema experto.



La pantalla de instrucciones incluye una descripción del sistema con sus alcances y limitaciones, una reseña de todas las secciones y los pasos que se deben seguir para emplearlas adecuadamente (Fig. 11).

Figura 11. Pantalla de instrucciones del sistema experto.



La pantalla de nueva consulta le permite al usuario introducir los datos de campo que haya obtenido sobre una circunstancia particular. Lo primero que se le solicita al usuario es proporcionar la reseña de la consulta; es decir, fecha, hora, lugar, etc. (Fig. 12). La consulta se puede realizar previamente a la observación de aves afectadas, ingresando la información disponible sobre el ecosistema. Esta puede incluir temperatura ambiental, precipitación, temperatura del agua, pH, presencia de materia orgánica, presencia de depredadores, etcétera. Si se tienen datos sobre aves afectadas, el usuario debe ir a la parte de hospedero, donde se muestran posibles signos y lesiones (Fig. 13).

No es necesario introducir los datos de todos los campos disponibles en la pantalla, pero se resaltan con una animación (una línea roja) aquellos que son más indicativos de

las enfermedades incluidas y se recomienda que sean llenados; los demás pueden ayudar a generar la respuesta o servir para completar el registro del evento. Los datos que se consideraron más indicativos respecto al hospedero son los siguientes: ausencia de signos, buena condición corporal, ausencia de lesiones, emaciación, alimento en esófago o proventrículo, hemorragias en serosas o corazón, necrosis focal en hígado, parálisis flácida, parálisis de la membrana nictitante, material de plomo en la molleja, edema subcutáneo en cabeza y cuello e impactación del tracto digestivo superior. En cuanto al ambiente se los que se consideraron más críticos son: cadáveres de vertebrados, pH entre 7 y 9, temperatura > 20°C, fluctuaciones en el nivel del agua, y pesca o cacería intensivas. Al terminar de ingresar los datos disponibles el usuario debe presionar el botón “Consultar” para que el programa responda a la consulta (Fig. 13).

**Figura 12.** Pantalla de nueva consulta del sistema experto, en la parte de datos generales.

**SEDEAA**  
Sistema Experto para Diagnosticar Enfermedades en Aves Acuáticas

**NUEVA CONSULTA**

Instrucciones | Guías para identificar aves

Nueva Consulta |

**Datos Generales**

Enfermedades | **Créditos y contacto**

Glosario | Nombre del usuario:  Nombre del sitio:

Bibliografía | Adscripción:  Localización:  (estado, municipio)

Teléfonos:  Coordenadas N:  W:

Dirección:  Fecha:  Hora:  :  hrs

**Antecedentes de enfermedades en aves silvestres en el sitio**

Enfermedad:  Medidas correctivas:

Especies afectadas:  Cantidad de individuos afectados:

Figura 13. Pantalla de nueva consulta del sistema experto, en la parte de humedal y hospedero.

### Humedal

\* Estos datos pueden ser promedio o de la zona de interés

Extensión aproximada <input type="text"/> ha	Profundidad: <input type="radio"/> < 50 cm <input type="radio"/> 50 -100 cm <input type="radio"/> > 100 cm	pH: <input type="radio"/> < 7 <input type="radio"/> 7-9 <input type="radio"/> > 9	Vegetación o algas <input type="radio"/>
Transparencia <input type="text"/> cm			Cadáveres de vertebrados <input type="radio"/>
Color <input type="text"/>			Agua estancada <input type="radio"/>
	Usos del ambiente:		Temperatura del agua > 18°C <input type="radio"/>
Cambios recientes en el nivel del agua Aumento <input type="radio"/> Disminución <input type="radio"/>	Cacería <input type="radio"/>	Pesca <input type="radio"/>	Actividad agrícola intensa <input type="radio"/>
			Aves domésticas cercanas <input type="radio"/>
			Descarga de aguas negras <input type="radio"/>

Clima:

Temperatura ambiental: < 10°C  10-20°C  >20°C  Lluvia  Niebla

---

### Hospedero

Especies Afectadas <input type="text"/>	Especies Presentes <input type="text"/>	Morbilidad <input type="text"/>	Densidad: <input type="radio"/> Alta (> 5 aves/m2) <input type="radio"/> Media (1-5 aves/m2) <input type="radio"/> Baja (< 1 ave/m2)
		Mortalidad <input type="text"/>	Población vulnerable <input type="text"/>

Signos:


\* Los signos y lesiones pueden observarse en diferentes individuos

<b>Signos Ausentes</b> <input type="radio"/>	<b>Movilidad:</b> Aleteo débil o vuelo errático <input type="radio"/> Vuelo corto <input type="radio"/> Incapacidad para volar <input type="radio"/> Marcha inestable <input type="radio"/> Postración <input type="radio"/> Dificultad para acuatizar o despegar <input type="radio"/> Letargo <input type="radio"/>	<b>Digestivos:</b> Diarrea verde en cloaca o suelo <input type="radio"/> Alimento en esófago o proventrículo <input type="radio"/> Impactación <input type="radio"/> Vesícula biliar aumentada <input type="radio"/> Bilis en el contenido de la molleja <input type="radio"/> Material de plomo en proventrículo o molleja <input type="radio"/>	<b>Respiratorios:</b> Disnea <input type="radio"/> Descarga mucosa en pico <input type="radio"/> <b>Misceláneos:</b> Pérdida de reflejo palpebral <input type="radio"/> Parálisis de la membrana nictitante <input type="radio"/> Vocalizaciones anormales <input type="radio"/>	<b>Neurológicos:</b> Cuello flácido <input type="radio"/> Marcha o nado en círculos <input type="radio"/> Opistótonos <input type="radio"/> Convulsiones <input type="radio"/> Alas colgando <input type="radio"/> Buena condición corporal <input type="radio"/> Músculos pectorales atrofiados <input type="radio"/> Grasa escasa o ausente <input type="radio"/>
--	--	---	--	---

<b>Lesiones:</b> Lesiones Ausentes <input type="radio"/> Focos necróticos en hígado o bazo <input type="radio"/> Hemorragias variables en membranas serosas, corazón o hígado <input type="radio"/>	<b>Otras consideraciones:</b> Alimentación en el agua filtrando o sondeando <input type="radio"/> Consumo de granos en la dieta <input type="radio"/>	<b>Parvadas:</b> Grandes o densas <input type="radio"/> Pequeñas o dispersas <input type="radio"/>	<b>Grupo al que pertenecen las aves afectadas:</b> Anátidos <input type="radio"/> Gallaretas <input type="radio"/> Otras aves acuáticas <input type="radio"/> Rapaces <input type="radio"/> Carroñeras <input type="radio"/>
--	---	--	---

Revise que todos los datos sean correctos

Consultar



Después de presionar el botón de “Consultar”, el programa pasa a la sección de resultados en la que se muestra que tan favorable es el ambiente para la presentación de las enfermedades del sistema, así como que tan sospechoso son las aves hospederas. Conjuntando estos datos, al final de la sección se muestra el riesgo posible para cada enfermedad del sistema. Cada resultado mostrado va acompañado de una breve explicación que corresponde a los datos introducidos en la consulta y le facilita al usuario la comprensión del mismo (Fig. 13 y Fig. 14). En caso de que no se haya introducido suficiente información en alguna sección, el programa mostrará una leyenda que dice “No existe suficiente información para proporcionar una respuesta”.

Figura 14. Pantalla de resultados del sistema experto, en la parte de ambiente.

**SEDEAA**  
Sistema Experto para Diagnosticar Enfermedades en Aves Acuáticas

**RESULTADOS**

Instrucciones

Nueva Consulta

Enfermedades

Glosario

Bibliografía

Guías para identificar aves

**Ambiente**

El ambiente puede ser no favorable, poco favorable, favorable o muy favorable para la presentación de las enfermedades

Créditos y contacto

BOTULISMO AVIAR	Muy Favorable	Los cadáveres de vertebrados encontrados son el medio más apropiado para la producción de la toxina. El pH se encuentra en el intervalo que favorece a la bacteria. La temperatura está en el intervalo que favorece a la bacteria.
CÓLERA AVIAR	Favorable	Los siguientes factores ambientales que se registraron, facilitan la presentación de la enfermedad: Materia orgánica de origen animal      Agua somera o estancada Aves domésticas cercanas
INTOXICACIÓN CON PLOMO	No Favorable	No se registró una fuente de contaminación con plomo

Figura 15. Pantalla de resultados del sistema experto, en la parte de hospedero y riesgo de la enfermedad.

### Hospedero

El hospedero puede considerarse como muy poco sospechoso, poco sospechoso, sospechoso o muy sospechoso, de presentar las enfermedades


BOTULISMO AVIAR	Poco Sospechoso	Los siguientes signos y lesiones pueden ser ocasionados por botulismo: Incapacidad para volar      Marcha inestable Vuelo corto
CÓLERA AVIAR	Muy Sospechoso	Los siguientes signos y lesiones pueden ser ocasionados por cólera aviar: Incapacidad para volar      Marcha inestable Vuelo corto                      Hemorragias en serosas Buena condición corporal
INTOXICACIÓN CON PLOMO	Poco Sospechoso	Los siguientes signos y lesiones pueden ser ocasionados por cólera aviar: Incapacidad para volar      Marcha inestable Vuelo corto

---

### Riesgo

El riesgo de que se presenten las enfermedades puede ser muy bajo, bajo, medio o alto

BOTULISMO AVIAR	Medio	El ambiente muy favorable junto con un hospedero poco sospechoso, generan un riesgo moderado para esta enfermedad
CÓLERA AVIAR	<b>Alto</b>	El ambiente favorable junto con un hospedero muy sospechoso, generan un riesgo alto para esta enfermedad
INTOXICACIÓN CON PLOMO	Bajo	El ambiente no favorable junto con un hospedero muy poco sospechoso, generan un riesgo bajo para esta enfermedad



La información básica sobre las enfermedades que maneja el SEDEAA se muestra en la sección de enfermedades, donde el usuario puede elegir la enfermedad y el aspecto particular a consultar. Los aspectos de las enfermedades están organizados en subsecciones: agente, hospedero (incluye las especies susceptibles y los factores predisponentes), ambiente, epidemiología (abarca la estacionalidad, recurrencia, signos, lesiones, morbilidad y mortalidad), diagnóstico (se mencionan el presuntivo, los diferenciales y el definitivo), tratamiento, control y prevención. Para el cólera aviar, en la epidemiología se mencionan también la transmisión y el reservorio; y para el botulismo aviar, el ciclo cadáver-gusano.

El glosario es una herramienta que le permite al usuario revisar los conceptos técnicos sobre la epidemiología de las enfermedades, mencionados en la sección de consulta y de enfermedades.

La bibliografía recomendada para que el usuario aumente sus conocimientos sobre estas enfermedades, se encuentra en otra sección. Y en la pantalla de créditos y contacto se incluyen los derechos de autor y la forma recomendada de citar el sistema.

En estas últimas secciones se muestra el texto como en la sección de instrucciones (Fig. 11).

#### **4.7 Validación del Sistema Experto**

Una vez concluida la elaboración del sistema experto, es necesario realizar ensayos de validación para saber si su funcionamiento es óptimo y los resultados que genera son los correctos. A partir de los resultados obtenidos de los ensayos, se pueden realizar las correcciones y mejorías pertinentes que aumenten la efectividad y eficiencia del sistema. Como se mencionó anteriormente, la validación de las reglas de producción consiste en evaluar si son correctas y en simplificarlas; este proceso se explica en la sección “Elaboración de las reglas de producción”.



Se realizó un ensayo de verificación con la información del Informe de las actividades realizadas para la atención de la emergencia hidroecológica en la laguna de Yuriria; que reporta las actividades en respuesta a un brote de botulismo que tuvo lugar en dicha laguna en 1998.<sup>29</sup> En este brote se diagnosticó botulismo como causa única de mortandad y se atribuyó a que la laguna perdió un gran volumen de agua, creció la vegetación, en la temporada de lluvias subió el nivel del agua y la putrefacción de la vegetación generó condiciones de anoxia y el macro y microambiente para el desarrollo de la bacteria.<sup>29</sup> Cabe destacar que los datos de este informe no se utilizaron para elaborar el sistema experto.

Los signos y lesiones reportados fueron: debilidad, parálisis ascendente, incapacidad para volar, sumergirse o caminar, cuello laxo, diarrea verde o amarilla, y parálisis de la membrana nictitante.<sup>29</sup> Al introducirlos en el sistema, este dio como resultado que el hospedero fue muy poco sospechoso para cólera aviar, muy sospechoso para botulismo aviar y sospechoso para la intoxicación con plomo.

En el informe se reportaron las siguientes condiciones ambientales: anoxia, inundación de la laguna (fluctuaciones en el nivel del agua), eutrofización, temperatura del agua 16.4 - 32.5°C con un promedio de 22.1°C, pH 6.6 - 8.8 con un promedio de 7.8. Se ingresaron en el sistema los valores de temperatura y pH como mayores y menores a los umbrales establecidos (pH 7-9 y temperatura >20°C). En el primer caso la respuesta del sistema fue que el ambiente era favorable para cólera aviar, muy favorable para botulismo y no favorable para la intoxicación con plomo. En el segundo caso fue: poco favorable para cólera aviar, muy favorable para botulismo y no favorable para la intoxicación con plomo.

El riesgo que estimó el SEDEAA para el cólera aviar fue bajo, para el botulismo fue alto y para la intoxicación con plomo fue bajo (el resultado fue el mismo con las dos grupos de valores para el ambiente). Lo cual concuerda con el diagnóstico del brote e indica que el sistema funciona correctamente en este caso real.

Lo ideal es realizar ensayos en campo con todas las enfermedades incluidas en el sistema, pero esto puede ser difícil debido a la falta del personal especializado para vigilar constantemente los humedales, y de registros sobre la ocurrencia de los brotes en

el país. No obstante, el botulismo aviar es una enfermedad que se ha presentado muchas ocasiones en México y en algunos lugares de forma anual,<sup>28</sup> por lo que se sugirió iniciar la validación del sistema con dicha enfermedad. Así mismo, se recomienda que el sistema experto sea empleado ante cualquier evento de mortandad en aves acuáticas y sus resultados sean comparados con los obtenidos por los métodos convencionales.

Para la obtención de los datos de campo se seleccionaron tres sitios en el estado de Guanajuato, debido a que en éste se han presentado las mayores mortandades debidas a botulismo aviar.<sup>28</sup> Estos sitios son la Presa de Silva, la Laguna de Yuriria y la Presa de la Purísima. La Presa de Silva se eligió porque desde que se presentó el brote de 1994 ha habido mortandades casi todos los años durante la temporada migratoria. En la laguna de Yuriria solamente se ha dado el brote de 1998 y en algunos años se han encontrado aves muertas pero de manera inconsistente. La Presa de la Purísima representa el control negativo pues nunca se han reportado aves muertas por alguna enfermedad. Así se tiene un sitio positivo, uno negativo y uno intermedio.

La Presa de Silva se localiza en el municipio de San Francisco del Rincón, es parte de la subcuenca del Río Turbio, el cual es parte de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. La superficie de la presa es de 70 ha y se encuentra a 1750 msnm. Es un área natural protegida con la categoría de zona de restauración ecológica con un área de influencia de 8 801 ha. Es un sitio RAMSAR, pero actualmente carece de número.<sup>30</sup>

La Laguna de Yurira se localiza al sur del estado de Guanajuato y abarca los municipios de Yuriria, Valle de Santiago y Salvatierra. El cuerpo de agua alcanza más de 5 890 ha, se encuentra a una altitud de 1 731 msnm. Fue declarada área natural protegida con la categoría de zona de restauración ecológica y su área de influencia comprende una superficie de 15 020 ha. Es un Área Importante para la Conservación de las Aves (AICA) con la clave C-65 y también es un sitio RAMSAR, cuyo número es el 1361.<sup>31</sup>

La Presa la Purísima se encuentra al suroeste del territorio del Municipio de Guanajuato, en la Cuenca Presa La Purísima o Alto Río Guanajuato, que pertenece a la Región Hidrológica 12 Lerma-Chapala-Santiago y Cuenca Lerma-Salamanca y Subcuenca Río Guanajuato. La Presa de la Purísima es un área natural protegida con la categoría de área de uso sustentable; comprende 2 728 ha, incluyendo su área de influencia.<sup>32</sup>

Se recomienda evaluar los siguientes aspectos para contar con un panorama completo, a pesar de que no se ha demostrado que todos influyan en la presentación de la enfermedad:

**Poblacionales:** identificación de especies presentes y cantidad de individuos. Esto se determina mediante observaciones de las aves presentes en el humedal.

**Morbilidad:** observación de signos clínicos por especie y grupo de individuos (adultos o juveniles).

**Mortandad:** cantidad de individuos muertos, hallazgos durante las necropsias y resultados de pruebas diagnósticas, por especie y grupo de individuos (adultos o juveniles).

**Condiciones climatológicas:** temperaturas máximas, mínimas y promedio, humedad, precipitación pluvial y evaporación. Estas lecturas se pueden obtener de las estaciones del sistema meteorológico nacional más cercanas a los cuerpos de agua.

**Aspectos fisicoquímicos del humedal:** profundidad, transparencia, temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto, concentración de cloruro de sodio y potencial redox.

Debido a la falta de información sobre las condiciones ambientales relacionadas con los brotes de botulismo en México, se recomienda estas sean investigadas de manera sistemática y simultáneamente a la validación del SEDEAA en campo.

Si adicionalmente se busca establecer cuáles son las variables ambientales que determinan o influyen en la presentación de los brotes de botulismo, se deben elegir sitios problema y sitios control cercanos, con características hidrológicas y biológicas semejantes (extensión, profundidad, fuente del agua, vegetación y comunidad de aves) y las variables deben ser medidas en el mismo periodo y a la misma hora.<sup>33</sup> Para facilitar el análisis y la interpretación de las lecturas, se recomienda establecer la misma cantidad de puntos de muestreo y con características similares entre los sitios (distancia entre puntos, profundidad, corriente del agua y vegetación circundante).

Una opción recomendable es que las lecturas del agua se realicen cerca del sedimento a  $\geq 5$  cm de este, y que las muestras para las lecturas del agua contenida en el sedimento

sean obtenidas a  $\leq 6$  cm de profundidad.<sup>33</sup> Las sondas multiparamétricas usadas deben ser de preferencia de la misma marca y calibradas con las mismas soluciones para que las lecturas sean comparables.<sup>33</sup>

Para establecer una asociación entre el promedio de las condiciones ambientales y el riesgo de los brotes de botulismo, se pueden utilizar modelos de regresión logística. Si se toman lecturas del agua y del sedimento, se recomienda que se realicen modelos independientes para cada grupo de variables, por posibles correlaciones entre estas.<sup>33</sup> Esto es trascendental para la obtención posterior de datos de campo, el funcionamiento más eficiente del sistema y posiblemente agregar nuevas reglas de producción a la base de conocimiento que mejoren el sistema.

## 5. DISCUSIÓN

Las enfermedades en aves acuáticas son únicas entre las enfermedades animales, debido a la dinámica de interacciones que ocurren en y entre los componentes de las poblaciones continentales. Las aves acuáticas silvestres migran anualmente y algunas lo hacen hasta Suramérica. En este proceso no sólo se mezclan entre aves acuáticas silvestres, sino que también lo hacen frecuentemente con aves domésticas, aves ferales y aves acuáticas residentes. A diferencia de otras enfermedades de animales silvestres, en las que los hospederos tienden a limitarse en sus movimientos y contactos, las aves acuáticas se deben concebir en el contexto de una población cosmopolita continental de hospederos con múltiples componentes de interacción, en lugar de poblaciones discretas de aves migratorias, domésticas o en cautiverio.<sup>34</sup> Por lo tanto, el estudio y la gestión de las enfermedades que las afectan son complejos, requieren un conocimiento basto, personal capacitado y acciones constantes de monitoreo e investigación. Es por esto que elaborar herramientas o recursos que faciliten las labores en campo resulta valioso, pero también requiere una cantidad de trabajo especializado considerable; por lo que es necesario tener ciertas consideraciones desde la justificación y el proceso de realización, hasta la evaluación de las ventajas y desventajas. A continuación se presentan las cuestiones más relevantes que se deben tener presentes respecto a este trabajo.

Seleccionar las enfermedades fue indispensable ya que si se incluyeran todas las enfermedades registradas en las aves acuáticas, la capacidad de diagnóstico sería muy alta; sin embargo, esto demandaría mucho tiempo de elaboración y posteriormente de actualización, aunado a que aumentaría la complejidad y la cantidad de reglas de decisión, incrementando a su vez la posibilidad de cometer errores al elaborar las reglas y programarlas, disminuyendo en consecuencia la precisión del sistema.

El enfoque de selección de las enfermedades incluidas en el SEDEAA se basó en distinguir aquellas que causan los mayores impactos en las poblaciones de aves silvestres y se estableció que las que producen mayores mortandades son más importantes. Sin embargo, es necesario considerar que se desconocen los efectos muchas enfermedades en las poblaciones silvestres, muchas ocasionan mortandades menores pero constantes y

estas mortandades pueden ser subestimadas o pasar desapercibidas durante las investigaciones de campo.

Para el estudio de las enfermedades en aves silvestres se debe considerar que la mayoría de los reportes de aves enfermas o muertas, provienen de sitios en los cuales las personas tienen acceso, hay suficientes personas para proporcionar una vigilancia pasiva, las aves son lo suficientemente visibles para ser detectadas, son zonas monitoreadas regularmente y los depredadores no eliminan a las aves afectadas antes de que sean detectadas. Debido a esto, es probable que se subestime la cantidad de individuos y especies afectados por las enfermedades en vida silvestre. Como en el caso del cólera aviar, que a pesar de haber matado a más de 100,000 aves en un solo brote, se puede presentar durante todo el año causando y se cree que la mayoría de los eventos de mortalidad afectan a pocos individuos y pasan desapercibidos.<sup>35, 36</sup> Por lo tanto, es necesario ampliar el conocimiento sobre las mortalidades a menor escala en las aves acuáticas y estimar los impactos reales en las poblaciones por mortandades a mayor y a menor escala.

Se debe considerar que los criterios de selección empleados fueron puntos de corte necesarios para definir las enfermedades a incluir en el sistema; pero pueden ser modificados posteriormente de acuerdo con otros objetivos como ampliar las enfermedades del sistema, o con la opinión de otros expertos. Sin embargo, se considera que las enfermedades incluidas en el sistema son en efecto las más trascendentes en México, por la evidencia encontrada en la literatura.

El cólera aviar se considera la enfermedad infecciosa de las aves acuáticas más importante en Norteamérica;<sup>37</sup> el botulismo aviar es la enfermedad más relevante en estas aves en el mundo, con las mayores repercusiones en Norteamérica,<sup>38</sup> y la intoxicación con plomo ha causado la pérdida de millones de aves anualmente en Norteamérica,<sup>39</sup> y a pesar de que sus impactos han disminuido desde la prohibición de su uso en los perdigones de cacería en Estados Unidos,<sup>40</sup> México es uno de los países con mayores pérdidas de aves debidas a esta intoxicación.<sup>39</sup> Adicionalmente, estas enfermedades se presentan anualmente.<sup>24, 37, 39</sup>

En otra revisión de los reportes de mortandad del NWHC también se encontró que la mayor causa de eventos y de aves muertas fue el botulismo aviar, tanto en aves costeras como en aves que habitan tierra adentro. Las etiologías bacterianas, abarcando al cólera aviar, causaron más eventos masivos de mortalidad que las virales; no obstante, estas últimas causaron la muerte de más aves.<sup>5</sup>

Una de las desventajas de los sistemas expertos en general es lo limitado de su campo de acción<sup>21</sup> y en este sentido el SEDEAA podría generar respuestas en el contexto de las enfermedades incluidas a pesar de que realmente la enfermedad en cuestión sea otra totalmente diferente. El sistema experto se puede enriquecer mucho agregando otras enfermedades y así ampliar su utilidad. La revisión de las enfermedades que afectan a las aves acuáticas, presentada en el Anexo 1, puede ser utilizada para determinar que enfermedades se deben integrar a futuras versiones del SEDEAA, ya que los criterios de selección se enfocan a la importancia de las mismas y con la información presentada es sencillo jerarquizarlas.

Una de las enfermedades que se puede incluir posteriormente en el sistema experto es el VON. Tras su introducción en Norteamérica ha afectado severamente a especies de aves terrestres causando grandes mortandades, pero recientemente se han reportado mortandades significativas en aves acuáticas (principalmente en el pelícano blanco, *Pelecanus erythrorhynchos*);<sup>5, 24</sup> por lo que su espectro de hospederos se ha incrementado y puede tener serias repercusiones en las aves silvestres en general, además de que es una zoonosis.<sup>5</sup>

Es necesario considerar que en algunos casos, se presentan múltiples factores que actúan sinérgicamente comprometiendo la homeostasis de los individuos y produciendo mortandades masivas en aves acuáticas. Se puede mencionar por ejemplo el síndrome de emaciación que afectó a colimbo comunes (*Gavia immer*) y se atribuyó al desgaste energético por la migración, muda, escasez de alimento y parásitos intestinales; a la movilización de contaminantes ambientales almacenados en varios tejidos, y un clima inclemente.<sup>41</sup>

Por lo general, en las investigaciones extensas sobre los eventos de mortalidad en aves acuáticas, se encuentran diversas enfermedades o causas de muerte en el mismo brote o

en los mismos individuos, incluyendo las enfermedades del sistema experto; por ejemplo, en un brote de cólera aviar algunos individuos se habían infectado con *P. multocida* y tenían concentraciones letales de plomo.<sup>42</sup> Por lo tanto, al actualizar y mejorar el SEDEAA se deberán considerar los hallazgos de enfermedades concomitantes, después de ser utilizado en situaciones reales en México.

La pérdida de hábitats es una de las amenazas más determinantes para la conservación de las especies y los recursos naturales. Los humedales son de los ecosistemas más perturbados y modificados por las actividades humanas; así mismo, el cambio climático puede afectar más a los humedales que a la mayoría de los ecosistemas; principalmente debido al aumento del nivel del mar, el cual impactaría severamente a los humedales costeros, y a los cambios en las temperaturas, que modificarían la función y distribución de los humedales interiores.<sup>2</sup> Por lo cual, la disminución de hábitat disponible para las aves acuáticas, en especial las migratorias, produce que aumenten las densidades poblacionales.

Conforme las aves acuáticas se concentran en hábitats cada vez más reducidos, aumenta el riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas, como el cólera aviar.<sup>36</sup> Esto se ha visto en la cuenca Rainwater en Nebraska, un sitio clave para la migración de millones de aves; ya que se ha destruido aproximadamente el 90% del hábitat original y las aves se han concentrado en los humedales restantes en densidades extremas. Estas condiciones de hacinamiento pueden aumentar el riesgo de transmisión y dispersión de enfermedades infecciosas.<sup>35</sup> En el caso del cólera aviar, el riesgo y la severidad de los brotes puede aumentar por la disminución de la calidad del hábitat o la mayor eutrofización de los humedales.<sup>35</sup>

La disminución del área de los humedales puede aumentar la densidad de las aves y en el caso del botulismo, también de los cadáveres, lo que incrementaría el riesgo y la magnitud de los brotes.<sup>43</sup> Por otra parte, el cambio climático puede disminuir la precipitación y aumentar la evaporación; lo cual resultaría en menos inundaciones de los humedales existentes,<sup>2</sup> y por lo tanto, la muerte repentina de organismos debida a los cambios en el nivel del agua y que favorece los brotes de botulismo, podría ser menos frecuente.



En algunos casos los eventos climáticos y las perturbaciones humanas pueden modificar el comportamiento de las aves acuáticas exponiéndolas a factores de riesgo. Por ejemplo, en Yucatán en 1989, el paso de un huracán y el aumento en la actividad turística posiblemente alteraron los hábitos alimenticios de los flamencos y en consecuencia consumieron grandes cantidades de perdigones y murieron intoxicados con plomo.<sup>44</sup>

Las perturbaciones humanas en los ecosistemas pueden tener repercusiones serias en la ecología de las enfermedades. Los registros del cólera en aves silvestres comenzaron cuando simultáneamente se dieron muchos cambios en el uso del suelo a gran escala, como el uso indiscriminado de pesticidas, el incremento dramático de las poblaciones humanas, una mayor intensidad de la actividad agrícola, con la consecuente pérdida de hábitat, mayor hacinamiento de aves y la sustitución de fuentes naturales de alimento por cultivos. Por lo que el cólera aviar puede ser una enfermedad asociada a los cambios en ambiente ocasionados por las actividades humanas.<sup>36</sup> En el mismo sentido, las actividades humanas pueden generar las condiciones propicias para los brotes de botulismo sobre todo al modificar los niveles del agua en los humedales y contaminarlos con plaguicidas o aguas residuales; ya que esto provoca la muerte de organismos y aumenta el sustrato para el desarrollo de la bacteria y la producción de la toxina.<sup>38</sup>

La elaboración del sistema experto se basó en la información investigada sobre las enfermedades, presentada en el Anexo 2. Gracias a que se estableció un orden a los apartados, fue posible extraer los datos más relevantes y compararlos entre las enfermedades de tal manera que orientan el diagnóstico de una forma eficiente distinguiendo claramente a cada enfermedad. Hay que tener presente que parte de esa información aún no ha sido comprobada con absoluta certeza y algunas cuestiones ecológicas esenciales se desconocen. No obstante, conforme aumenten las investigaciones en esta área, aumentará nuestro conocimiento y comprensión sobre las interacciones que favorecen o limitan la ocurrencia de las enfermedades. Por lo cual, es necesario actualizar constantemente la base de conocimiento del SEDEAA y para que así proporcione respuestas cada vez más exactas.

Los sistemas expertos son modelos abstractos de los problemas, por lo tanto sólo incluyen los aspectos considerados relevantes para la resolución de los mismos; de otra

manera, se perderían en la vasta cantidad de detalles que abarcan los problemas reales.<sup>21</sup> Esto se refleja en la selección de los aspectos más relevantes que orientan el diagnóstico de las enfermedades del SEDEAA. Existen muchos signos y variables ecológicas que se han reportado asociados a estas enfermedades pero no todos aportan información para poder diagnosticarlas. La forma sistemática en la que se analizó la información a través de la elaboración de los diagramas de dependencia-causal, las tablas de decisión y finalmente las reglas de producción, permitió una representación del conocimiento precisa, evitando omisiones e identificando los elementos indispensables para el diagnóstico; pues en cada etapa, fue posible eliminar los puntos que no eran relevantes, ambiguos, imprácticos y redundantes. En cambio, si se hubiera optado por transferir la opinión de un experto o la información de la literatura directamente a las reglas de decisión, estas hubieran sido complejas y difíciles de manejar, evaluar e interpretar.

Uno de los aspectos relevantes de esta metodología fue la determinación de la cantidad de categorías a manejar en los diagramas y tablas de decisión. Para poder distinguir entre dos categorías de una variable se requiere una cantidad mínima de información (bit) y conforme aumentan las categorías a discernir, se requiere más información. Sin embargo, existe un límite para la precisión con la que podemos diferenciar la magnitud de una variable unidimensional, y este límite se encuentra cercano a siete categorías.<sup>25</sup> Así mismo, existe un límite en la cantidad de piezas de información que se pueden recordar con la memoria a corto plazo y esto tiene implicaciones en la resolución de problemas y en la comprensión.<sup>26</sup> Se han analizado los distintos aspectos de la memoria a corto plazo, con diversos procedimientos y desde diferentes enfoques científicos, y las evidencias indican que la capacidad promedio de memoria en los adultos es de tres a cinco unidades. Sin embargo, el número exacto de unidades no puede ser determinado.<sup>26</sup> Considerando estas investigaciones, se estableció que las categorías resultantes de los diagramas de dependencia y de las tablas de decisión, es decir, los consecuentes, no fueron más de cuatro. De tal manera que pudieran ser comprendidos, diferenciados y evaluados adecuadamente, evitando así, posibles errores en la interpretación de los mismos.

Después de realizar los diagramas de dependencia-causal fue evidente que había una gran cantidad de atributos y valores para algunas de las dependencias. Sin embargo, al analizarlos, algunos estaban relacionados o tenían influencias mutuas y fue posible agruparlos con base en la información presentada en el Anexo 2, lo cual simplificó la elaboración de las tablas de decisión y las reglas de producción. En las tablas de decisión se manejaron estos grupos de atributos reduciendo significativamente las columnas y facilitando la asociación con los consecuentes y su evaluación.

Al realizar las reglas de producción se pudo haber optado por hacer una regla por cada relación de los valores de los atributos en las tablas de decisión, pero al simplificarlas, uniendo aquellas que poseen elementos semejantes, se facilitó su programación evitando así posibles errores. La validación de la consistencia de las reglas permitió eliminar aquellas que eran redundantes o estaban subsumidas en otras; así como descartar las condiciones innecesarias. Los conflictos entre reglas se evitaron gracias al empleo de los diagramas y tablas de decisión, además de que los consecuentes de las reglas no son mutuamente excluyentes, es decir que por ejemplo, el ambiente puede ser favorable para más de una enfermedad y por lo tanto ambas posibilidades se pueden presentar.

La interfaz para el usuario fue elaborada con el programa Macromedia Flash®,<sup>27</sup> el cual permite integrar animaciones, imágenes y elementos gráficos, lo cual la hace bastante amigable e intuitiva. Pero una gran ventaja de la forma de representación del conocimiento empleada, es decir las reglas de producción, es que se pueden trasladar a diversos ambientes de programación y con ello satisfacer propósitos específicos como la conectividad con otros programas, la generación de bases de datos y la transferencia de información a través de Internet. La interfaz debe ser evaluada por el usuario para que con sus sugerencias pueda mejorarse y funcionar óptimamente.

Mientras más información recibe una persona, es más posible que cometa errores en sus respuestas.<sup>25</sup> Sin embargo, esto no sucede con el SEDEAA debido a que puede almacenar los datos introducidos durante las consultas y las reglas que se necesitan para proporcionar respuestas siempre se dispararán cuando se cumplen sus premisas, independientemente de otros datos que el usuario pueda ingresar al sistema. Por lo que, con todos los datos ecológicos y epidemiológicos que se puede obtener al estudiar las

enfermedades en vida silvestre, el sistema experto es menos propenso a cometer errores debidos a la cantidad de información, que una persona.

La validación es una etapa relevante porque a partir de los resultados obtenidos de esta, se pueden realizar las correcciones y mejorías pertinentes que aumenten la efectividad y eficiencia del sistema. Gracias a la verificación de la interfaz para el usuario revisando todos sus componentes, se detectaron errores en la programación que básicamente consistieron en el mal funcionamiento de algunos botones, pero todos fueron corregidos.

La verificación del funcionamiento del SEDEAA con el informe de las actividades de atención del brote de botulismo aviar en la Laguna de Yuriria, fue trascendental puesto que se sometió al sistema ante una situación real y los resultados fueron los esperados, demostrando que su desempeño es el adecuado. Sin embargo, solo se contó con un informe completo que permitió hacer este tipo de verificación; por lo tanto, se recomienda hacer la validación en campo sugerida y utilizar el sistema durante todos los eventos de mortalidad que se presenten, a pesar de que esto puede ser temporalmente demandante. De esta manera, se podrá evaluar el rendimiento del sistema y comparar los métodos convencionales de atención con los aportes del SEDEAA en la ayuda al diagnóstico; así como implementar las mejorías correspondientes.

Se han desarrollado herramientas computacionales para el estudio de las enfermedades de la vida silvestre como la Guía electrónica para identificar aves acuáticas importantes para el estudio de influenza aviar en México.<sup>45</sup> Pero a pesar de la actual diversidad y amplia aplicación de los sistemas expertos en muchas áreas del conocimiento, no se encontró información sobre sistemas expertos enfocados al diagnóstico de las enfermedades en aves acuáticas o en vida silvestre en general; ni tampoco, sobre sistemas expertos orientados al diagnóstico de enfermedades animales en México. Por lo que se puede considerar al SEDEAA como el primer sistema experto que ayuda a diagnosticar enfermedades en vida silvestre (aves acuáticas) en México. Por el contrario, en las áreas de la clínica y producción animal existen varios ejemplos exitosos de sistemas expertos; como el sistema experto diseñado para monitorear las condiciones ambientales y productivas en las casetas de gallinas de postura.<sup>23</sup> Para la realización de ese sistema, se hicieron mediciones automatizadas y manuales de todas las variables de

interés. La adquisición del conocimiento fue a partir de cinco expertos e información de la literatura; la representación del conocimiento y el mecanismo de inferencia se realizó con tablas de aberraciones. La validación de las respuestas y de los mecanismos de funcionamiento, fue realizada por los cinco expertos. Para la verificación se evaluaron la sensibilidad y especificidad del sistema con la información estandarizada, obtenida previamente. Se concluyó que el sistema es capaz de detectar el 80% de las enfermedades posibles y el 90% de las aberraciones en las variables ambientales y productivas. Una de las ventajas de ese sistema es su capacidad para manejar información cualitativa y cuantitativa. El sistema experto ayuda al productor a monitorear las variables relevantes de la producción para tener un mejor control en el consumo de alimento, la temperatura ambiental y detectar tempranamente las enfermedades.<sup>23</sup>

Es evidente que el método de representación del conocimiento depende del tipo de información que existe sobre el dominio del sistema experto; en el ejemplo anterior, la precisión y exactitud del conocimiento permitió el uso de herramientas cuantitativas (tablas de aberración, valores estándar y desviaciones, límites de detección, factores de evaluación y de certeza de las variables).<sup>23</sup> Pero en el diagnóstico de enfermedades en vida silvestre se carece de mucha información y resultó más adecuado hacer diagramas de dependencia-causal y tablas de decisión, los cuales permiten manejar correctamente información cualitativa y con incertidumbre.

La opinión de los expertos puede aportar directrices valiosas sobre la realización y el desempeño de los sistemas expertos, por lo que es recomendable que el SEDEAA, al igual que el sistema mencionado, sea evaluado y aprobado por diversos expertos; ya que fue elaborado básicamente con información disponible en la literatura.

En el caso del SEDEAA, la información sobre las variables ambientales y las características de la presentación de las enfermedades que maneja, no es tan precisa y completa como en el sistema mencionado, por lo que no fue posible realizar comparaciones o análisis cuantitativos de los resultados; sin embargo, al realizar ensayos del sistema en campo se podría contar con los datos necesarios para hacerlo próximamente.

Entender la dinámica de las enfermedades en sistemas con múltiples hospederos, es bastante complejo por todas las posibles variaciones en la abundancia de las especies, su susceptibilidad, tasas de mortandad y morbilidad, comportamiento y patrones de uso de los humedales; que modifican el riesgo de exposición a la enfermedad.<sup>35</sup> Muchos de los estudios sobre las enfermedades en aves silvestres han sido principalmente descriptivos, enfocados a una especie, en un sitio y en una sola ocasión; por lo cual se presentan inconsistencias en el conocimiento de este tema.<sup>36</sup>

Es fundamental realizar más investigaciones sobre las enfermedades en aves acuáticas, principalmente en México, pues no se tiene mucha información sobre su ecología en los ecosistemas de nuestro país. Debido a que la mayoría de los estudios se han realizado en Estados Unidos y Canadá, se desconoce en gran medida la influencia de las condiciones locales y esto limita la efectividad de las decisiones en cuanto al manejo de estas enfermedades.

En México es imperativo que se lleven a cabo estudios de campo sistemáticos para valorar la situación actual de la salud de las aves acuáticas y de la vida silvestre en general,<sup>46</sup> y contar con información ecológica y epidemiológica, que además serían aportes indispensables a nivel continental.<sup>46</sup> De esta manera se podrá contar con una mejor comprensión de la ecología de las enfermedades y se tomarán las decisiones correctas para salvaguardar la salud de las poblaciones silvestres, de los animales domésticos y de las personas.

Es necesario actualizar constantemente el SEDEAA y conforme se realicen más investigaciones y trabajos de campo que aumenten el conocimiento sobre las enfermedades, es forzoso enriquecer la base de conocimiento y ajustar el programa para que los resultados que ofrece sean lo más precisos posibles.

La vigilancia constante de las poblaciones silvestres es imperativa para contar con información sobre las amenazas para las aves acuáticas, la conservación de la vida silvestre y la salud de los ecosistemas. Además de alertar oportunamente sobre eventos de morbilidad o mortalidad y poder realizar acciones correctivas tempranas y prevenir que la mortandad aumente.<sup>5, 36</sup> Esto también tiene implicaciones para la salud humana

ya que las aves acuáticas son centinelas de los ecosistemas acuáticos, de los cuales los humanos obtienen alimentos y otros bienes y servicios.<sup>5</sup>

En el caso de las enfermedades incluidas en el sistema, la detección oportuna de los brotes es una estrategia fundamental para controlarlas, por lo que es necesario vigilar constantemente los humedales y enviar las muestras a laboratorio inmediatamente para contar con un diagnóstico temprano y poder implementar las medidas necesarias.<sup>47</sup> En este caso, los costos son mínimos comparados con los necesarios para el manejo de una epidemia a gran escala.<sup>36, 47</sup>

Debido a lo anterior, el SEDEAA puede tener un papel trascendental en la vigilancia y diagnóstico oportuno de las enfermedades que maneja, facilitando estas labores, ahorrando tiempo valioso y permitiendo que las acciones correctivas y preventivas específicas sean implementadas lo antes posible, evitando los eventos de mortalidad en las aves acuáticas y reduciendo su magnitud.

## 5.1 Conclusiones

- Al seleccionar las enfermedades, recopilar la información más importante sobre ellas, realizar los diagramas de dependencia-causal, las tablas de decisión, las reglas de producción, al diseñar la interfaz gráfica para el usuario y proponer la validación; se logró desarrollar un sistema experto que brinda apoyo confiable para el diagnóstico oportuno de cólera aviar, botulismo aviar e intoxicación con plomo, en las aves acuáticas de México.
- Se han desarrollado muchos sistemas expertos orientados al diagnóstico de enfermedades, pero no se tiene conocimiento de alguno que se haya hecho para enfermedades en vida silvestre. Por lo tanto, se considera que el Sistema Experto para el Diagnóstico de Enfermedades en Aves Acuáticas (SEDEAA), es el primero que se elabora para apoyar el diagnóstico de enfermedades en vida silvestre; así mismo, es el primero desarrollado para aves acuáticas en México.
- Debido al desconocimiento de algunos elementos de las enfermedades de las aves acuáticas, se recomienda realizar investigaciones en México que permitan esclarecer los aspectos locales de la ecología de estas enfermedades.
- Se recomienda actualizar constantemente al SEDEAA con la información que aporten los nuevos estudios, con los resultados de los ensayos de validación y con los complementos necesarios para aumentar la versatilidad del sistema. En este sentido, también se deben agregar otras enfermedades para aumentar la capacidad del mismo.



## 6. LITERATURA CITADA

- 1.- Smardon R. C. Heritage values and functions of wetlands in Southern Mexico. *Landscape and Urban Planning*. 2006; 74: 296-312.
- 2.- Mitsch W. J. y Hernandez M. E. Landscape and climate change threats to wetlands of North and Central America. *Aquatic Sciences*. 2013; 75: 133-149.
- 3.- The Ramsar Convention on Wetlands [página en Internet]. Suiza: Ramsar [última actualización 26 de mayo de 2006, consultado 17 de noviembre de 2012]. Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas. Disponible en:  
[http://www.ramsar.org/cda/es/ramsar-documents-texts-convention-on/main/ramsar/1-31-38%5E20671\\_4000\\_2\\_\\_](http://www.ramsar.org/cda/es/ramsar-documents-texts-convention-on/main/ramsar/1-31-38%5E20671_4000_2__).
- 4.- Kushlan JA, Steinkamp MJ, Parsons KC, Capp J, Acosta CM, Coulter M, Davidson I., et al. El plan para la conservación de aves acuáticas de Norteamérica, Versión 1. Washington, DC: Waterbird Conservation for the Americas, 2002. (Traducción al español 2006).
- 5.- Ostfeld R. S., Meffe G. K. Pearl M. C. Conservation medicine, the birth of another crisis discipline. En: Aguirre A. A., Ostfeld R. S., Tabor G. M., House C. y Pearl M. C., editores. *Conservation medicine, ecological health in practice*. New York: Oxford University Press, 2002: 17-26.
- 6.- Hubálek Z. An annotated checklist of pathogenic microorganisms associated with migratory birds. *Journal of Wildlife Diseases*. 2004; 40(4): 639-659.
- 7.- Swinton J., Woolhouse M. E. J., Begon M. E., Dobson A. P., Ferroglio E., Grenfell B. T., Guberti V., Halls R. S., Heesterbeek J. A. P., Lavazza A., Roerts M. G., White P. J. y Wilson K. Microparasite transmission and persistence. En: Hudson P. J., Rizzoli A., Grenfell B. T., Heesterbeek H. y Dobson A. P., editores. *The ecology of wildlife diseases*. New York: Oxford University Press, 2001: 83-101.

- 8.- Newman S. H., Chmura A., Converse K., Kilpatrick A. M., Patel K. Lammers E. y Daszak P. Aquatic bird disease and mortality as an indicator of changing ecosystem health. *Marine Ecology Progress Series*. 2007; 352: 299-309.
- 9.- Hudson P. J., Rizzoli A. P., Grenfell B. T., Heesterbeek J. A. P. y Dobson A. P. Ecology of wildlife diseases. En: Hudson P. J., Rizzoli A., Grenfell B. T., Heesterbeek H. y Dobson A. P., editores. *The ecology of wildlife diseases*. New York: Oxford University Press, 2001: 1-5.
- 10.- Tompkins D. M., Dobson A. P., Arneberg P., Begon M. E., Cattadori I. M., Greenman J. V., Heesterbeek J. A. P., et. al. Parasites and host population dynamics. En: Hudson P. J., Rizzoli A., Grenfell B. T., Heesterbeek H. y Dobson A. P., editores. *The ecology of wildlife diseases*. New York: Oxford University Press, 2001: 45-62.
- 11.- Wilson K., Bjornstad O. N., Dobson A. P., Merler S., Pogliayen G., Randolph S. E., Read A. F. y Skorping A. Heterogeneities in macroparasite infections: patterns and processes. En: Hudson P. J., Rizzoli A., Grenfell B. T., Heesterbeek H. y Dobson A. P., editores. *The ecology of wildlife diseases*. New York: Oxford University Press, 2001: 6-44.
- 12.- Lebarbenchon C., Feare C. J., Renaud F., Thomas F. y Gauthier-Clerc M. Persistence of highly pathogenic avian influenza viruses in natural ecosystems. *Emerging Infectious Diseases*. 2010; 16 (7): 1057-1062.
- 13.- Daszak P. y Cunningham A. A. Emerging infectious diseases, a key role for conservation medicine. En: Aguirre A. A., Ostfeld R. S., Tabor G. M., House C. y Pearl M. C., editores. *Conservation Medicine, ecological health in practice*. New York: Oxford University Press, 2002: 40-61.
- 14.- Beasley V. One toxicology, ecosystem health and one health. *Veterinaria Italiana*. 2009; 45 (1): 97-110.
- 15.- Temple S. A. Individuals, Populations and Communities: The Ecology of Birds. En: Podulka S., Rohrbaugh R.W. y Bonney R., editores. *Handbook of Bird Biology*. 2da ed. Nueva York, EU: The Cornell Lab of Ornithology, 2004.

- 16.- Ali S. F. M., Shieh B. H. H., Alehaideb Z., Khan M. Z., Louie A., Fageh N. y Law F. C. P. A reiview of the effects of some selected pyrethroids and related agrochemicals on aquatic vertebrate biodiversity. *Canadian Journal of Pure and Applied Sciences*. 2011; 5 (2): 1455-1464.
- 17.- Hess G. R., Randolph S. E., Arneberg P., Chemini C., Furlanello C., Harwood J., Roberts M. G. y Swinton J. Spatial aspects of disease dynamics. En: Hudson P. J., Rizzoli A., Grenfell B. T., Heesterbeek H. y Dobson A. P., editores. *The ecology of wildlife diseases*. New York: Oxford University Press, 2001: 102-118.
- 18.- Cockcroft P. y Holmes M. *Handbook of evidence-based veterinary medicine*. Reino Unido: Blackwell Publishing, 2003.
- 19.- Ignizio J. P. *Introduction to expert systems: the development and implementation of rule-based expert systems*. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- 20.- Hassan A. Z., Mohammed I., Remi-Adewumi B. D. y Umar M. B. Computer applications in veterinary medicine. *Nigerian Veterinary Journal*. 2004; 25 (2): 1-12.
- 21.- Nikopoulus C. *Expert systems, introduction to first and second generation and hybrid knowledge based systems*. Nueva York: Marcel Dekker, Inc., 1997.
- 22.- Konar A. *Artificial intelligence and soft computing, behavioral and cognitive modeling of the human brain*. Florida: CRC Press, 2000.
- 23.- Lokhorst C. y Lamaker E.J.J. An expert system for monitoring the daily production process in aviary systems for laying hens. *Computers and Electronics in Agriculture*. 1996; 15: 215-231.
- 24.- National Wildlife Health Center. [página en Internet] EU: United States Geological Survey [última actualización 29 de marzo de 2013, consultado el 3 de abril de 2013]. Quaterly mortality reports. Disponible en:  
  
[http://www.nwhc.usgs.gov/publications/quarterly\\_reports/index.jsp](http://www.nwhc.usgs.gov/publications/quarterly_reports/index.jsp)
- 25.- Miller G. A. The magical number seven, plus or minus two some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*. 1956; 101 (2): 343-352.

- 26.- Cowan N. The magical number 4 in short-term memory: a reconsideration of mental storage capacity. Behavioral and Brain Sciences. 2000; 24: 87-185.
- 27.- Gay J. y Tatsumi R. Flash Profesional 8 (programa de computadora) versión 8.0. Macromadia Inc. 2005.
- 28.- Comisión Nacional del Agua. Manual de atención de brotes de botulismo aviar que se presenten en cuerpos de agua epicontinentales o bienes nacionales a cargo de la Comisión Nacional del Agua. CONAGUA. Guanajuato, México. 2006.
- 29.- Comité mixto para la atención de la emergencia hidroecológica en la Laguna de Yuriria. Informe final de las actividades realizadas para la atención de la emergencia hidroecológica en la laguna de Yuriria. CONAGUA. Guanajuato, México. 1998.
- 30.- Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. Programa de Manejo para el Área Natural Protegida “Presa de Silva”, Ubicada en los Municipios de San Francisco del Rincón y Purísima del Rincón del Estado de Guanajuato. Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato. Año LXXXV. Tomo CXXXVI. Guanajuato, Gto. Publicado el 20 de noviembre de 1998.
- 31.- Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. Programa de Manejo para el Área Natural Protegida “Laguna de Yuriria y su Zona de Influencia”, Ubicada en los Municipios de Yuriria, Valle de Santiago y Salvatierra del Estado de Guanajuato. Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato. Año XCII. Tomo CXLII. Guanajuato, Gto. Publicado el 25 de noviembre de 2005.
- 32.- Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. Programa de Manejo para el Área Natural Protegida de Uso Sustentable “Presa la Purísima y su Zona de Influencia”. Instituto de Ecología de Guanajuato. Guanajuato, Gto. 2006.
- 33.- Rocke T. E. y Samuel M. D. Water and sediment characteristics associated with avian botulism outbreaks in wetlands. Journal of Wildlife Management. 1999; 63 (4): 1249-1260.

- 34.- Pearson G. L. y Cassidy D. R. Perspectives on the diagnosis, epizootiology and control of the 1973 duck plague epizootic in wild waterfowl at Lake Andes, South Dakota. *Journal of Wildlife Diseases*. 1997; 33 (4): 681-705.
- 35.- Blanchong J. A., Samuel M. D. y Mack G. Multi-species patterns of avian cholera motality in Nebraska's Rainwater Basin. *Journal of Wildlife Diseases*. 2006; 42 (1): 81-91.
- 36.- Botzler R. G. Epizootiology of avian cholera in wildfowl. *Journal of Wildlife Diseases*. 1991; 27 (3): 367-395.
- 37.- Samuel M. D., Botzler R. G. y Wobeser G. A. Avian cholera. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 38.- Roche T. E. y Bollinger T. K. Avian botulism. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 39.- Friend M. Plomo. En: Friend M. y Franson C. Editores. *Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves*. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 40.- National Wildlife Health Center. [página en Internet] EU: United States Geological Survey [última actualización 24 de julio de 2012, consultado el 3 de abril de 2013]. Concerns rise over known and potential impacts of lead on wildlife. Disponible en:  
[http://www.nwhc.usgs.gov/disease\\_information/lead\\_poisoning/index.jsp](http://www.nwhc.usgs.gov/disease_information/lead_poisoning/index.jsp)
- 41.- Forrester D. J., Davidson W. R., Lange R. E. Jr., Stroud R. K., Alexander L. L., Franson J. C., Haseltine S. D. Littell R. C. y Nesbitt S. A. Winter mortality of common loons in Florida coastal waters. *Journal of Wildlife Diseases*. 1997; 33 (4): 833-847.
- 42.- Windingstad R. M., Duncan R. M. y Thornburg D. Outbreak of avian cholera on the wintering ground of the Mississippi valley Canada goose flock. *Journal of Wildlife Diseases*. 1983; 19 (2): 95-97.

- 43.- Wobeser G. Avian botulism - another perspective. *Journal of Wildlife Diseases*. 1997; 32 (2): 181-186.
- 44.- Schmitz R. A, Aguirre A. A., Cook R. S. y Baldassarre G. A. Lead poisoning of caribbean flamingos in Yucatan, Mexico. *Wildlife Society Bulletin*. 1990; 18 (4): 399-404.
- 45.- Hernández-Colina A., Cuevas-Domínguez E. A. y García-Espinosa G. Guía electrónica para identificar aves acuáticas importantes para el estudio de influenza aviar en México (manual impreso y software). Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, 2011.
- 46.- Aguirre A. A., McLean R. G., Cook R. S. y Quan T. J. Serologic survey for selected arboviruses and other potential pathogens in wildlife from Mexico. *Journal of Wildlife Diseases*. 1992; 28 (3): 435-442.
- 47.- Friend M. Cólera aviar. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 48.- Andersen A. A., Franson J. C. Avian chlamydiosis. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 49.- Franson J. C. y Pearson J. E. Probable epizootic chlamydiosis in wild california (*Larus californicus*) and ring-billed (*Larus delawarensis*) gulls in North Dakota. *Journal of Wildlife Diseases*. 1995; 31 (3): 424-427.
- 50.- Franson J. C. Clamidiosis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 51.- Blanchong J. A., Samuel M. D., Goldberg D. R., Shadduck D. J. y Lehr M. A. Persistence of *Pasteurella multocida* in wetlands following avian cholera outbreaks. *Journal of Wildlife Diseases*. 2006; 42 (1): 33-39.
- 52.- Wolcott M. J. Erysipelas. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.

- 53.- Friend M. Enfermedades bacterianas misceláneas. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 54.- Friend M. Salmonelosis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 55.- Hall A. J. y Saito E. K. Avian wildlife mortality events due to salmonellosis in the United States, 1985-2004. *Journal of Wildlife Diseases*. 2008; 44 (3): 585-593.
- 56.- Daoust P-Y y Prescott J. F. Salmonellosis. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 57.- Norma Oficial Mexicana NOM-005-Z00-1993 Campaña Nacional Contra la Salmonelosis Aviar. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México: Diario Oficial, Jueves 01 de septiembre de 1994.
- 58.- Friend M. Tuberculosis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 59.- Converse K. A. Avian tuberculosis. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 60.- Friend M. Aspergilosis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 61.- Converse K. A. Aspergillosis. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 62.- Friend M. Candidiasis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.

- 63.- Friend M. y Franson C. Coccidiosis intestinal. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 64.- Estrongiloidosis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 65.- Wiese J. H., Davidson W. R. y Nettles V. F. Large scale mortality of nestling ardidis caused by nematode infection. *Journal of Wildlife Diseases*. 1977; 13: 376-382.
- 66.- Atkinson C. T. Hemosporidiosis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 67.- Tuggle B. N. y Friend M. Sarcosporidiosis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 68.- Cole R. A. y Friend M. Enfermedades parasitarias misceláneas. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 69.- Cole R. A. Trichomoniasis. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 70.- Introducción a las enfermedades parasitarias. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 71.- Wobeser G. A. Parasitism: costs and effects. En: Atkinson C. T., Thomas N.J. Hunter D. B. Editores. *Parasitic diseases of wild birds*. Iowa, EU: Wiley-Blackwell, 2008.



- 72.- Docherty D. E. y Friend M. Newcastle. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 73.- Leighton F. A. y Heckert R. A. Newcastle disease and related avian paramyxoviruses. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. Infectious diseases of wild birds. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 74.- Kulken T., Leighton F. A., Wobeser G., Denesik k. L. Riva J. y Heckert R. A. An epidemic of Newcastle disease in double-crested cormorants from Saskatchewan. Journal of Wildlife Diseases. 1998; 34 (3): 457-471.
- 75.- Glaser L. C., Barker I. K., Weseloh D. V. C., Ludwing J., Windingstad R. M., Key D. W. y Bollinger T. K. The 1992 epizootic of Newcastle disease in double-crested cormorants in North America. Journal of Wildlife Diseases. 1999; 35 (2): 319-330.
- 76.- Norma Oficial Mexicana NOM-013-Z00-1994 Campaña Nacional Contra la Enfermedad de Newcastle Presentación Velogénica. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. México: Diario Oficial, Martes 28 de febrero de 1995.
- 77.- Fitzgerald S. D. Adenoviruses. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. Infectious diseases of wild birds. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 78.- McLean R. G. y Ubico S. R. Arboviruses in birds. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. Infectious diseases of wild birds. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 79.- Hansen W. y Docherty D. E. Encefalitis equina del este. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 80.- Hofmeister E. K. West Nile virus: North American experience. Integrative Zoology. 2011; 6: 279-289.

- 81.- Dauphin G., Zientara S., Zeller H. y Murgue B. West Nile: worldwide current situation in animals and humans. *Comp. Immun. Microbiol. Infect. Dis.* 2004; 27: 343-355.
- 82.- Hidalgo-Martínez A., Puerto F. I., Farfán-Ale J. A., García-Rejón J. E., Rosado-Paredes E. del P. Méndez-Galván J., Figueroa-Ocampo R., Takashima I. y Ramos C. Prevalencia de infección por el virus del Nilo occidental en dos zoológicos del estado de Tabasco. *Salud pública de México.* 2008; 50 (1): 76-85.
- 83.- Paré J. A. Robert N. Circovirus. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds.* Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 84.- Hollmén T. y Docherty D. E. Orthoreovirus. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds.* Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 85.- Stallknecht D. E., Nagy E., Hunter D. B. y Slemons R. D. Avian influenza. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds.* Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.
- 86.- Hansen W. Influenza aviar. En: Friend M. y Franson C. Editores. *Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves.* Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 87.- Villareal C. Avian Influenza in Mexico. *Revista Científica y Técnica de la OIE (Organización Mundial de Sanidad Animal).* 2009; 28 (1): 261-265.
- 88.- Cuevas D. E. A. Detección de Orthomyxovirus y Paramyzovirus en Anátidos de la Laguna de Chiconahuapan, Estado de México (tesis de maestría). Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- 89.- Montalvo-Corral M., López-Robles G. y Hernández J. Avian influenza survey in migrating waterfowl in Sonora, México. *Transboundary and Emerging Diseases.* 2011; 58: 63-68.
- 90.- Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-044-ZOO-1995, Campaña Nacional contra la Influenza Aviar. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y

Alimentación. México: Diario Oficial, Lunes 30 de enero de 2006. Disponible en: <http://www.senasica.gob.mx/?doc=507>

91.- Corbellini L. G., Pellegrini D. C. P., Dias R. A., Reckziegel A., Todeschini B. y Bencke G. A. Risk assessment of the introduction of H5N1 highly pathogenic avian influenza as a tool to be applied in prevention strategy plan. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2012; 59: 106-116.

92.- Zhang Z. Chen D., Chen Y. Davies T. M., Vaillancourt J-P y Liu W. Risk signals of an influenza pandemic caused by highly pathogenic avian influenza subtype H5N1: spatio-temporal perspectives. *The Veterinary Journal*. 2012; 192 (3): 417-421.

93.- Friend M. Peste del Pato. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.

94.- Hansen W. R. y Gough R. E. Duck plague (duck virus enteritis). En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.

95.- Brand C. J. Docherty D. E. A survey of North American migratory waterfowl for duck plague (duck virus enteritis) virus. *Journal of Wildlife Diseases*. 1984; 20 (4): 261-266.

96.- Converse K. A. y Kidd G. A. Duck plague epizootics in the United States, 1967-1995. *Journal of Wildlife Diseases*. 2001; 37 (2): 347-357.

97.- Van Riper III C. y Forrester D. J. Avian pox. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. *Infectious diseases of wild birds*. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.

98.- Hansen W. Viruela Aviar. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.

99.- Docherty D. E. Enfermedad de cuerpos de inclusión de las grullas. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre,

procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.

100.- Roche T. E. y Friend M. Botulismo aviar. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.

101.- Landsberg J. H., Vargo G. A., Flewelling L. J y Wiley F. E. Algal Biotoxins. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. Infectious diseases of wild birds. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.

102.- Creekmore L. H. Micotoxinas. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.

103.- Quist C. F., Cornish T. y Wyatt R. D. Mycotoxicosis. En: Thomas N. J., Hunter D. B. Atkinson C. T. Editores. Infectious diseases of wild birds. Iowa, EU: Blackwell Publishing, 2007.

104.- Robinson R. M., Ray A. C., Reagor J. C. y Holland L. A. Waterfowl mortality caused by aflatoxicosis in Texas. *Journal of Wildlife Diseases*. 1982; 18 (3): 311-313.

105.- Fischer J. R., Lewis-Weis L. A., Tate C. M., Gaydos J. K., Gerhold R. W. y Poppenga R. H. Avian vacuolar myelinopathy outbreaks at a southeastern reservoir. *Journal of Wildlife Diseases*. 2006; 42 (3): 501-510.

106.- Wilde S. B., Murphy T. M., Hope C. P., Habrun S. K., Kempton J., Birrenkott A., Wiley F., Bowerman W. W. y Lewitus A. J. Avian vacuolar myelinopathy linked to exotic aquatic plants and a novel cyanobacterial species. *Environ Toxicol*. 2005; 20 (3): 348-353.

107.- Warren J. M. y Cutting K. A. Breeding strategy and organochlorine contamination of eggs in lesser scaup (*Aythya affinis*). *Ecotoxicology*. 2011; 20: 110-118.

108.- Rivera-Rodríguez L. B. y Rodríguez-Estrella R. Incidence of organochlorine pesticides and the health condition of nestling ospreys (*Pandion haliaetus*) at Laguna San Ignacio, a pristine area of Baja California Sur, Mexico. *Ecotoxicology*. 2011; 20:29-38.

- 109.- Glaser L. G. Plaguicidas organofosforados y carbamatos. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 110.- Friend M. y Franson C. Insecticidas hidrocarburo clorinados. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 111.- Rendón-Von Osten J., Soares A. M. V. M. y Guilherminos L. Black-billied whistling duck (*Dendrocygna autumnalis*) brain cholinesterase characterization and diagnosis of anticholinesterase pesticide exposure in wild populations from Mexico. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2005; 24 (2): 313-317.
- 112.- Franson C. Selenio. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 113.- Franson J. C. Mercurio. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 114.- Creekmore L. H. Cianuro. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 115.- Franson C. y Friend M. Sal. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.
- 116.- Roche T. E. Petróleo. En: Friend M. y Franson C. Editores. Manual de campo para enfermedades de fauna silvestre, procedimientos generales de campo y enfermedades de aves. Madison, EU: United States Geological Survey, 1999.

- 117.- Combs S. M. y Botzler R. G. Correlations of daily activity with avian cholera mortality among wildfowl. *Journal of Wildlife Diseases*. 1991; 27 (4): 543-550.
- 118.- Lehr M. A., Botzler R. G., Samuel M. D. y Shadduck D. J. Associations between water quality, *Pasteurella multocida* and avian cholera at Sacramento National Wildlife Refuge. *Journal of Wildlife Diseases*. 2005; 41 (2): 291-297.
- 119.- Samuel M. D., Shadduck D. J. y Goldberg D. R. Are wetlands the reservoir for avian cholera? *Journal of Wildlife Diseases*. 2004; 40 (3): 377-382.
- 120.- Domínguez M. A. Análisis prospectivo de los factores que intervienen en la presentación de brotes de botulismo en aves acuáticas (tesis de licenciatura). Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- 121.- Evelsizer D. D., Clark R. G. y Bollinger T. K. Relationship between local carcass density and risk of mortality in molting mallards during avian botulism outbreaks. *Journal of Wildlife Diseases*. 2010; 46 (2): 507-513.
- 122.- Barras S. C. y Kadlec J. A. Abiotic predictors of avian botulism in Utah. *Wildlife Society Bulletin*. 2000; 28 (3): 724-729.
- 123.- Work T. M., Klavitter J. L., Reynolds M. H. y Blehert D. Avian botulism: a case study in translocated endangered laysan ducks (*Anas laysensis*) on Midway Atoll. *Journal of Wildlife Diseases*. 2010; 46 (2): 499-506.
- 124.- Pascual A. M. R. Botulismo. Ediciones Díaz de Santos. Madrid. 1994.
- 125.- Scheuhammer A. M. y Norris S. L. The ecotoxicology of lead shot and lead fishing weights. *Ecotoxicology*. 1996; 5: 279-295.
- 126.- Gordus A. G. Lead concentrations in liver and kidneys of snow geese during avian cholera epizootic in California. *Journal of Wildlife Diseases*. 1993; 29(4): 582-586.
- 127.- Degernes L., Heilman S., Trogon M., Jordan M., Davison M., Kraege D., Correa M. y Cowen P. Epidemiologic investigation of lead poisoning in trumpeter and tundra swans in Washington state, USA, 2000-2002. *Journal of Wildlife Diseases*. 2006; 42(2): 345-358.

128.- Sileo L., Creekmore L. H., Audet D. J., Snyder M. R., Meteyer C. U., Franson J. C., Locke L. N., Smith M. R. y Finley D. L. Lead poisoning of waterfowl by contaminated sediment in the Coeur d'Alene River. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2001; 41: 364-368.

129.- Daoust P-Y, Conboy G., McBurney S. y Burgess N. Interactive mortality factors in common loons from maritime Canada. *Journal of Wildlife Diseases.* 1998; 34 (3): 524-531.

## 7. ANEXO 1. SELECCIÓN DE ENFERMEDADES PARA EL SISTEMA EXPERTO

A continuación se encuentra la descripción de las enfermedades, con base en los criterios de selección, que se han presentado en aves acuáticas en América. Están ordenadas por grupos de agentes etiológicos y alfabéticamente. En la sección de resultados se encuentra un cuadro que sintetiza estos resultados y se señalan las enfermedades incluidas en el sistema (Cuadro 1).

### 7.1 Bacterianas

#### 7.1.1 Clamidiosis

- a) **Alto impacto:** en pocas ocasiones se han presenciado grandes mortandades debidas a *Chlamydophila psittaci* y cuando han sucedido, probablemente se deba a cepas exóticas para los hospederos, o a infecciones secundarias (bacterianas o virales).<sup>48</sup> Comúnmente la infección es asintomática y por lo general la clamidiosis se diagnostica durante la vigilancia de otras enfermedades.<sup>48</sup> Se ha evidenciado, por aislamiento o serología, en muchas especies de aves silvestres<sup>48</sup> (en más de 114 en vida libre y 37 en cautiverio),<sup>49</sup> pero las palomas, los *Passeriformes* y las aves acuáticas de los órdenes *Anseriformes* y *Charariiformes*, son los grupos más comúnmente infectados en Norteamérica.<sup>49, 50</sup> Las aves que más frecuentemente se observan muertas son la palomas, gaviotas, gansos y patos.<sup>48</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** se han documentado pocos casos de mortalidad.<sup>48</sup> El primero afectó a palomas de alas blancas (*Zenaida asiatica*) en Texas y en 1986 murieron más de 400 gaviotas (*Larus californicus* y *Larus delawarensis*) en Dakota del Norte, Estados Unidos.<sup>49</sup> En los reportes del National Wildlife Health Center (NWHC) sólo en el 2002 hubo una mortandad de 3952 gaviotas y cormoranes, atribuida a clamidiosis y emaciación.<sup>24</sup>
- c) **Presencia en México:** la clamidiosis en aves domésticas tiene una distribución mundial; se ha encontrado en 30 órdenes y 460 especies y se asume que todas las especies de aves silvestres son susceptibles.<sup>48</sup> Pero no se encontraron reportes en aves silvestres.
- d) **Importancia reconocida:** no se encontró información al respecto.



### 7.1.2 Cólera Aviar

- a) **Alto impacto:** el cólera aviar es la enfermedad infecciosa de las aves acuáticas más importante en Norteamérica ya que causa mortandades significativas casi anualmente.<sup>37</sup> Grandes epidemias han matado a decenas de miles de aves acuáticas (más de 50 000),<sup>37</sup> y la mayor mortalidad que se ha observado superó a los mil individuos en un día.<sup>47</sup> Las repercusiones que esta enfermedad puede tener en las poblaciones es difícil de estimar, pero en varias ocasiones las mortandades que ocasiona superan el 10% de las poblaciones locales susceptibles; por ejemplo, en el norte de California murió el 11.5% de la población de gallareta frente blanca (*Fulica americana*).<sup>37</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** desde la década de los cuarentas se reportaron casos esporádicos en Estados Unidos; pero a partir de 1970, aproximadamente, adquirió una mayor importancia por la frecuencia y severidad de sus brotes.<sup>47</sup> En el brote de 1979-1980 en las rutas de migración Central y del Mississippi murieron más de 72 000 patos y gansos migratorios.<sup>5</sup> Después de las epidemias de 1998-1999 ha habido un descenso en los reportes de eventos de mortalidad en Norteamérica.<sup>37</sup> En algunos estados de Estados Unidos y en el occidente de Canadá, el cólera aviar se ha presentado anualmente.<sup>47</sup> Se reportaron ante el NWHC, 63 brotes de cólera aviar que afectaron a más de mil aves acuáticas cada uno.<sup>24</sup>
- c) **Presencia en México:** esta enfermedad se encuentra en muchos países y su presencia se ha documentado ampliamente en Estados Unidos y Canadá.<sup>37,47, 51</sup> Sin embargo, a pesar de que no se ha reportado la enfermedad en el país, han ocurrido eventos sospechosos de cólera en México; lo cual se puede deber a las limitaciones en el diagnóstico y la vigilancia.<sup>37,47, 51</sup> En un estudio sobre las enfermedades en vida silvestre en el país, se encontraron anticuerpos contra *Pasteurella multocida* en aves terrestres y acuáticas, pero no se diagnosticó la enfermedad.<sup>46</sup>
- d) **Importancia reconocida:** se considera que el cólera aviar es una enfermedad emergente, debido a que ha aumentado la cantidad y severidad de los brotes y su distribución se ha extendido.<sup>47</sup>

### 7.1.3 Erisipelosis

- a) **Alto impacto:** la infección por *Erysipelothrix rhusiopathiae* puede ocasionar la muerte con pocos signos, pero en aves silvestres la enfermedad se presenta esporádicamente y los reportes de mortalidad son escasos.<sup>52</sup> Aunque se han registrado mortandades masivas, la mayoría de los informes en vida silvestre han involucrado a pocos individuos.<sup>53</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** el mayor evento de mortalidad por erisipelosis en aves silvestres afectó a zambullidores orejudos (*Podiceps nigricollis*) y a gaviotas californianas (*Larus californicus*) matando a cerca de 10,000 individuos en Great Salt Lake, Utah.<sup>24, 52</sup> Este evento se dio en 2001 y es el único con una mortandad mayor a mil individuos entre los registros del NWHC.<sup>24</sup>  
En otro evento, murieron 600 pelícanos café (*Pelecanus occidentalis*) en California.<sup>52</sup> Estos sucesos se consideran raros y se desconoce si tienen impactos significativos en las poblaciones.<sup>52</sup>
- c) **Presencia en México:** la distribución de la bacteria es mundial;<sup>52, 53</sup> sin embargo, no se encontró evidencia de la enfermedad en aves silvestres.
- d) **Importancia reconocida:** no se halló información sobre este criterio.

### 7.1.4 Salmonelosis

- a) **Alto impacto:** todas las aves son susceptibles, se considera que la aves silvestres son portadoras y varias especies de aves acuáticas han muerto por esta enfermedad.<sup>54, 55</sup> Las especies más afectadas son paseriformes, las que anidan en colonias y las aves acuáticas.<sup>55</sup> No obstante, en aves silvestres la tasa de infección es baja,<sup>54,56</sup> pocas veces se han registrado eventos de mortalidad extensa;<sup>56</sup> los brotes han sido aislados, involucrando a pocos individuos y la bacteria se ha aislado en animales aparentemente sanos o con otras enfermedades.<sup>54</sup> Por lo tanto, no se le considera como una enfermedad relevante en las aves silvestres,<sup>54</sup> o que afecte sus poblaciones;<sup>56</sup> con excepción de algunas especies de aves canoras.<sup>56</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** un brote se dio en 1989 y murieron aproximadamente 5 000 garzas ganaderas (*Bubulcus ibis*) en California, Estados

Unidos.<sup>56</sup> En los reportes del NWHC se encuentran diez brotes relacionados con salmonelosis que afectaron a más de mil individuos.<sup>24</sup> De estos, sólo en dos la única enfermedad diagnosticada fue salmonelosis, en los restantes también el botulismo aviar, virus del oeste del Nilo, aspergilosis y clamidiosis, contribuyeron a las mortalidades; pero no se esclarece cuál fue la proporción de cada una.<sup>24</sup>

- c) **Presencia en México:** la distribución de esta enfermedad es mundial,<sup>56</sup> pero no se encontraron registros en aves silvestres de México.
- d) **Importancia reconocida:** la salmonelosis aviar es una enfermedad significativa en las aves de corral, por lo que en México se decretó la Norma Oficial Mexicana NOM-005-Z00-1993 Campaña Nacional Contra la Salmonelosis Aviar, para su control y erradicación.<sup>57</sup> Se considera una enfermedad importante para ciertas especie de aves silvestres.<sup>55</sup>

#### 7.1.5 Tuberculosis Aviar

- a) **Alto impacto:** a pesar de que todas las especies de aves son susceptibles,<sup>58</sup> la tuberculosis se presenta esporádicamente en las aves silvestres, afectando a los individuos sin causar mortalidades grupales.<sup>59</sup> La prevalencia en las poblaciones silvestres es muy baja (menor al 1%); con excepción de una población de grulla blanca, en la que se encontró una prevalencia del 39%.<sup>58</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** no se encontraron registros de grandes mortandades y no hay reportes en la base de datos del NWHC de mortandades mayores a mil individuos.<sup>24</sup>
- c) **Presencia en México:** no se encontró información sobre mortandades de aves silvestres en el país, a pesar de que esta enfermedad se presenta en aves domésticas y silvestres (en cautiverio y en vida libre), en todo el mundo.<sup>58,59</sup>
- d) **Importancia reconocida:** no se encontraron datos al respecto.

#### 7.1.6 Otras

Se han reportado otras enfermedades producidas por bacterias que pueden afectar a las aves acuáticas silvestres como la nueva enfermedad del pato (*Pasteurella*

*anatipestifer*), enteritis necrótica (*Clostridium perfringens*) y estafilococosis (*Staphylococcus aureus*); sin embargo, no se han registrado eventos de muertes masivas o grandes impactos en las poblaciones silvestres producidos por estas enfermedades.<sup>53</sup> En la base de datos del NWHC no hay reportes de mortandades mayores a mil individuos producidas por alguna de estas enfermedades.<sup>24</sup>

## 7.2 Fúngicas

### 7.2.1 Aspergilosis

- a) **Alto impacto:** una gran variedad de especies ha muerto por esta enfermedad y es posible que todas las aves sean susceptibles.<sup>60</sup> La mayoría de las infecciones en aves silvestres han sido detectadas durante las evaluaciones de otras causas de muerte.<sup>60</sup> La aspergilosis comúnmente es secuela de otras enfermedades y suele presentarse en aves en cautiverio.<sup>61</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** las epidemias trascendentales en aves acuáticas han sido en Estados Unidos e incluyen una mortandad de 1100 patos de collar (*Anas platyrhynchos*), otra de 1250 cisnes de tundra (*Cygnus columbianus*) y otra de 2000 gansos canadienses (*Branta canadensis*); que ocurrieron en los años 1949, 1962 y 1966, respectivamente.<sup>61</sup> En los reportes del NWHC hay un brote que causó la muerte de 1300 gansos canadienses en 1999, otro afectó a 2150 gaviotas, cormoranes, garzas y gansos en el 2009 (aunque en este también se diagnosticó salmonelosis) y otro mató a 7000 patos de collar en 2011.<sup>24</sup> Adicionalmente existen otros dos reportes de mortandades por causas mixtas mayores a mil individuos en los que se diagnosticó aspergilosis, pero no se menciona la proporción de esta enfermedad.<sup>24</sup>
- c) **Presencia en México:** esta enfermedad se ha reportado en aves silvestres en todo el mundo,<sup>60, 61</sup> pero no se encontraron registros de brotes en el país.
- d) **Importancia reconocida:** sin información para este criterio.

### 7.2.2 Otras

La candidiasis es otra infección fúngica que se ha presenciado mundialmente, pero los reportes en aves silvestres son escasos; <sup>62</sup> a pesar de que *Candida albicans* es comúnmente aislada del tracto digestivo y heces de gaviotas.<sup>5</sup> No se encontraron registros de mortandades mayores a mil individuos causadas por esta enfermedad en la base de datos del NWHC.<sup>24</sup>

## 7.3 Parasitarias

### 7.3.1 Coccidiosis

- a) **Alto impacto:** la coccidiosis es una enfermedad significativa en las aves domésticas pero no tiene gran importancia para las aves silvestres. Algunos brotes de *Eimeria aythya* han causado la muerte de patos boludos menores (*Aythya affinis*) en Estados Unidos.<sup>63</sup> *Cryptosporidium baileyi* es otra coccidia y puede ocasionar enfermedades gastrointestinales o respiratorias pero lo más común es que la infección sea asintomática.<sup>5</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** en general se han reportado pocos brotes de coccidiosis en aves silvestres.<sup>63</sup> En 2007 se registró un brote de *Eimeria* sp. en la base de datos del NWHC, que causó la muerte de aproximadamente 1157 patos boludos menores.<sup>24</sup> También se diagnosticó coccidiosis junto con otras parasitosis y otras enfermedades en tres mortalidades; en 2003 murieron 3000 aves y en 2008, 2500 y 2800 aves.<sup>24</sup>
- c) **Presencia en México:** la distribución es mundial,<sup>63</sup> pero no se encontraron reportes en aves silvestres del país.
- d) **Importancia reconocida:** no se encontró información al respecto.

### 7.3.2 Estrongiloidosis

- a) **Alto impacto:** se ha visto que esta parasitosis puede producir mortandades en los sitios costeros de anidación, especialmente en juveniles menores de cuatro semanas de edad, de garzas y otras aves zancudas.<sup>64, 65</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** en Estados Unidos han tenido lugar varios eventos de mortalidad debida a estrongiloidosis y el mayor de estos causó la muerte de 400 polluelos; las especies afectadas fueron mergos y grazas.<sup>64</sup> En Delaware se registró una mortandad del 84% (276) de los polluelos de *Egretta thula*.<sup>65</sup>
- c) **Presencia en México:** se ha reportado en gran parte del mundo,<sup>64</sup> pero no se encontraron registros en México.
- d) **Importancia reconocida:** se carece de información sobre el criterio.

### 7.3.3 Hemosporidiosis

- a) **Alto impacto:** la hemosporidiosis es una infección por protozoarios de los géneros *Plasmodium*, *Haemoproteus* y *Leucocytozoon*, que puede ser fatal para ciertos individuos. Puede ocasionar anemias severas, pérdida de peso y muerte, (los juveniles son los más susceptibles).<sup>66</sup> Es común encontrarla en anseriformes y se han reportado mortandades en patos y gansos.<sup>66</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** no se encontraron registros de mortandades severas en aves acuáticas.
- c) **Presencia en México:** la hemosporidiosis se encuentra en muchas partes del mundo y su distribución es amplia en el continente Americano.<sup>66</sup> Se ha demostrado que en Norteamérica su distribución coincide con la de los vectores;<sup>66</sup> por lo que es posible que esté presente en aves acuáticas del país pero no se encontraron registros.
- d) **Importancia reconocida:** no se encontraron referencias sobre este criterio.

### 7.3.4 Sarcosporidiosis

- a) **Alto impacto:** la infección por *Sarccystis rileyi* (la especie más frecuentemente encontrada en aves acuáticas) es usualmente asintomática.<sup>67</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** es común en algunas especies de aves acuáticas.<sup>67</sup> Sin embargo, no se encontraron registros de mortandades debidas a este parásito, incluyendo la base de datos del NWHC.

- c) **Presencia en México:** la infección sí se ha reportado en México.<sup>67</sup>
- d) **Importancia reconocida:** no se tienen datos.

### 7.3.5 Trematodiasis

- a) **Alto impacto:** en algunos casos, la infección por trematodos es letal.<sup>68</sup> Se han reportado mortandades en aves acuáticas (principalmente en patos buceadores y cisnes, y ocasionalmente en gallaretas) provocadas por *Sphaeridiotrema globulus*.<sup>68</sup> Este trematodo es hematófago, por lo que produce pérdida de sangre y anemia, y las aves suelen morir por choque hipovolémico o por disminución del plasma sanguíneo.<sup>68</sup>  
Otro trematodo que se encuentra comúnmente es *Cyathocotyle bushiensis*, el cual ha afectado patos negros (*Anas rubripes*), cercetas y gallaretas.<sup>68</sup> Así mismo, se ha reportado *Leyogonimus polyoon* como causa de mortandades en gallaretas.
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** En la base de datos del NWHC se reportan 29 mortandades mayores a mil individuos desde 1996 hasta 2012, durante todos los años, menos en el 2001.<sup>24</sup> La mayor parte de estas mortandades han tenido lugar en la parte alta del río Mississippi y los estanques asociados (19); se presentaron mortandades recurrentes en el lago Shawano en Wisconsin (6) y otras se han dado en otros lagos (4).<sup>24</sup> En la mayoría de los casos (12) se diagnosticaron *S. globulus* y *C. bushensis*, en diez eventos se diagnosticó sólo un trematodo y en seis, se diagnosticaron en las demás combinaciones.<sup>24</sup>
- c) **Presencia en México:** se han reportado mortandades en Estados Unidos y Canadá,<sup>68</sup> pero no se encontraron registros en México.
- d) **Importancia reconocida:** no se halló información al respecto.

### 7.3.6 Otras

La tricomoniasis se considera la enfermedad más importante de las palomas en Norteamérica; sin embargo, es una parasitosis que se ha reportado muy infrecuentemente en aves acuáticas.<sup>69</sup>

Se han identificado cientos de parásitos en las aves silvestres pero muchos de ellos no causan enfermedad y cuando lo llegan a hacer, afectan a pocos individuos y en raras ocasiones les provocan la muerte. Las mortalidades masivas por parásitos en aves silvestres han sido escasas,<sup>70, 71</sup> salvo las excepciones mencionadas.

## 7.4 Virales

### 7.4.1 Enfermedad de Newcastle

- a) **Alto impacto:** se sabe que más de 230 especies de aves son susceptibles a la infección por paramixovirus,<sup>72</sup> pero el cormorán de doble cresta (*Phalacrocorax auritus*) es la única especie en la que se han reportado mortandades a gran escala;<sup>73</sup> a pesar de que se han observado brotes en los que los cormoranes tuvieron contacto estrecho con otras aves (*Pelecanus erythrorhynchos* y *Larus* spp.),<sup>74</sup> e incluso juveniles de estas especies murieron simultáneamente de causas desconocidas y no se pudo aislar el virus.<sup>75</sup>

Todas la mortalidades se han presentado en colonias reproductivas y han afectado principalmente a juveniles,<sup>72</sup> con una tasa de mortalidad entre <1% al 92%.<sup>73, 75</sup> Sin embargo, es posible que esta enfermedad no sea una causa relevante de mortandad en esta especie,<sup>74, 75</sup> pero no se puede determinar si esta mortandad en juveniles es aditiva o compensatoria.<sup>74</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** las epidemias que se presentaron en Canadá en 1990 causaron la muerte de 10,000 cormoranes de doble cresta.<sup>72</sup> En 1992 murieron más de 20,000 en Estados Unidos.<sup>72, 75</sup> La mortalidad que tuvo lugar en los Grandes Lagos se estimó entre 2 y 30% de la población susceptible, mientras que en el medio oeste de Estados Unidos fue del 80 a 90%. En 1997 murieron 1800 cormoranes y en 1999, murieron aproximadamente mil.<sup>24</sup> En 2008 se diagnosticó la enfermedad de Newcastle en tres mortandades y en 2010, en una; pero otras enfermedades también estuvieron presentes y otras especies de aves fueron afectadas.<sup>24</sup>
- c) **Presencia en México:** los virus de la enfermedad de Newcastle tienen una presencia mundial, aunque la información sobre la distribución de las diferentes



cepas en las diversas especies es incompleta.<sup>73</sup> Los cormoranes de doble cresta habitan en todo Norteamérica, llegan hasta el sur de México y aparentemente en sus poblaciones se mantienen virus de Newcastle patógenos para ellos y otras especies;<sup>73</sup> por lo que es posible que la enfermedad los afecte en el país.

- d) **Importancia reconocida:** la Organización Mundial de Salud Animal (OIE) la considera como una de las enfermedades de las aves domésticas con mayor repercusión en la economía y el comercio internacional.<sup>73</sup> En México es una enfermedad de campaña y en la Norma Oficial Mexicana NOM-013-Z00-1994 Campaña Nacional Contra la Enfermedad de Newcastle Presentacion Velogenica, se establecen los lineamientos para su control y erradicación en aves domésticas.<sup>76</sup>

#### *7.4.2 Infección por Adenovirus*

- a) **Alto impacto:** las infecciones por adenovirus en aves silvestres son subclínicas o causan enfermedad esporádicamente en poblaciones locales y áreas limitadas.<sup>77</sup> Se cuenta con evidencia serológica de infección en múltiples especies de aves acuáticas silvestres, pero no se ha asociado con un estado de enfermedad, ni ha ocasionado mortandades.<sup>77</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** no ha ocasionado brotes.<sup>77</sup>
- c) **Presencia en México:** no se hallaron registros.
- d) **Importancia reconocida:** no se tiene información.

#### *7.4.3 Infección por Arbovirus*

- a) **Alto impacto:** La mayoría de los arbovirus han evolucionado junto con sus hospederos naturales y por lo general no causan mortandades.<sup>78</sup> Sólo algunos de los virus ocasionan la muerte en aves silvestres y suele ser limitada, con impactos menores en las poblaciones.<sup>78</sup> Algunos virus como el de la Encefalitis Equina del Este (EEE) y el de la Encefalitis Equina del Oeste (EEO) pueden producir mortandad en especies particulares.<sup>78</sup> Hasta ahora las muertes por EEE se han limitado a aves silvestres criadas en cautiverio.<sup>79</sup>

La excepción es el Virus del Oeste del Nilo (VON) el cual ha afectado a cerca de 300 especies de aves, causando mortandades de miles de individuos en córvidos (los más afectados), rapaces, urogallos y pelícanos.<sup>78, 80</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** en Estados Unidos se han registrado varios brotes de VON que causaron la muerte desde 10 hasta 2864 pelícanos blancos (*Pelecanus erythrorhynchos*) (9,322 aves en total).<sup>78</sup> Un brote afectó al 95% de los 10,000 polluelos de una colonia reproductiva, por lo cual se deben considerar las implicaciones poblacionales del VON en esta especie.<sup>78</sup>

En los registros del NWHC se encuentran 17 brotes en total, en los que murieron más de mil aves y se diagnosticó la enfermedad.<sup>24</sup> En ocho, sólo se diagnosticó VON y en nueve, se encontró junto con otras enfermedades. Las aves que murieron fueron principalmente pelícanos, cormoranes, gaviotas, gansos y gaviotas.<sup>24</sup>

- c) **Presencia en México:** la EEE se encuentra en Norteamérica, principalmente en la costa del Atlántico y el Golfo, y se extiende hasta Centro y Sudamérica.<sup>79</sup> En un monitoreo de enfermedades en vida silvestres en el país, se encontró evidencia de EEO, EEE, Encefalitis de San Luis y Encefalitis Equina Venezolana, en aves silvestres.<sup>46</sup>

Después de su introducción a América en 1999 en Nueva York, el VON se esparció rápidamente por Estados Unidos, llegando a Canadá, México, Centroamérica y el Caribe, en cuatro años.<sup>5, 80, 81</sup> El primer registro en México se realizó en el 2002, cuando se encontró evidencia del virus en caballos y un cuervo.<sup>80</sup> Uno de los esfuerzos de monitoreo reveló que diversas especies de aves (incluyendo algunas acuáticas) poseían anticuerpos contra VON, en dos zoológicos del estado de Tabasco.<sup>82</sup> Sin embargo, no se han reportado mortandades en aves silvestres en México.

- d) **Importancia reconocida:** el VON se considera una enfermedad emergente en América.<sup>80, 81</sup>

#### 7.4.4 Infección por *Circovirus*

- a) **Alto impacto:** por lo regular la infección es subclínica o latente, se caracteriza por anormalidades en las plumas y puede estar acompañada por infecciones secundarias.<sup>83</sup> Se ha encontrado que de estos virus, sólo el circovirus de las gaviotas afecta aves acuáticas silvestres y se ha hallado en algunos casos de mortalidad, principalmente de juveniles.<sup>83</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** no ocasiona brotes en aves silvestres.
- c) **Presencia en México:** no se encontraron registros de su ocurrencia en aves silvestres.
- d) **Importancia reconocida:** no se encontraron datos.

#### 7.4.5 Infección por *Ortoreovirus*

- a) **Alto impacto:** esta infección se ha asociado con varios síndromes en aves domésticas y silvestres en cautiverio; ha ocasionado mortandades en algunas poblaciones silvestres pero se han publicado pocos eventos.<sup>84</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** en el mar Báltico murieron polluelos de eider común (*Somateria mollissima*) por este virus: en 1996 murió el 99% de 7 500 polluelos y en 1999 murió el 98%.<sup>84</sup> También se registraron dos mortandades (1989-1990 y 1993-1994) en chochas americanas (*Scolopax minor*) en Virginia.<sup>84</sup>
- c) **Presencia en México:** no se encontraron informes de su presencia en el país.
- d) **Importancia reconocida:** no se halló información referente a este criterio.

#### 7.4.6 Influenza Aviar

- a) **Alto impacto:** existe una gran cantidad de asilamientos y evidencia serológica de los virus de influenza aviar en las aves silvestres;<sup>85</sup> los de baja patogenicidad se han aislado en más de 105 especies de 26 familias, lo que sugiere que son capaces de infectar a una gran diversidad de hospederos.<sup>12</sup> Se considera que las aves acuáticas, principalmente *Anseriformes* (patos, gansos y cisnes) y *Charadriiformes* (gaviotas, charranes y aves zancudas), son los principales reservorios.<sup>12, 85</sup> Sin embargo, es raro que se detecten subtipos de alta

patogenicidad en aves silvestres<sup>12</sup> y sólo los eventos de mortandad que se mencionan a continuación han sido trascendentales en aves silvestres.<sup>85</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** el primer evento de mortalidad en aves silvestres se registró en 1961, cuando un subtipo H5N3 de influenza aviar de alta patogenicidad (IAAP) mató aproximadamente a 1300 golondrinas de mar comunes (*Sterna hirundo*) en Sudáfrica.<sup>12, 85, 86</sup> El segundo evento importante en aves silvestres ocurrió en China en 2005, cuando el virus H5N1 de IAAP provocó la muerte de seis mil aves acuáticas silvestres.<sup>85</sup> En éste, se registró la pérdida del 10% de la población global de ganso de cabeza rayada (*Anser indicus*), lo que muestra el potencial del virus para afectar poblaciones locales o susceptibles.<sup>85</sup>
- c) **Presencia en México:** en 1994 se detectó el subtipo H5N2 de alta patogenicidad en México, el cual tuvo repercusiones severas en la avicultura nacional; pero no se encontró en aves silvestres u otras especies.<sup>87</sup> En un estudio se logró el aislamiento de un virus H7N3 a partir de patos cazados en el Estado de México<sup>88</sup> y en otro monitoreo realizado en dos estuarios del estado de Sonora durante dos años, se encontró una prevalencia promedio de 3.6% de los virus de influenza aviar de baja patogenicidad.<sup>89</sup>
- d) **Importancia reconocida:** tras el brote de IAAP en México en 1994, se inició una campaña de control y erradicación de la influenza aviar de baja patogenicidad (IABP), regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-044-ZOO-1995, Campaña Nacional contra la Influenza Aviar.<sup>90</sup> El subtipo de alta patogenicidad H5N1 que surgió en China en 1996 ha causado grandes mortandades en aves de corral y aves silvestres en más de 60 países de Asia, Europa y Africa;<sup>91</sup> e incluso es capaz de infectar humanos con una alta tasa de letalidad (58.3%);<sup>92</sup> por lo que es una enfermedad transfronteriza, emergente e importante que atrae la atención internacional.<sup>12, 91</sup>

#### 7.4.7 Peste del Pato

- a) **Alto impacto:** las aves silvestres han sido afectadas infrecuentemente<sup>93</sup> y se considera que los únicos eventos trascendentales de mortalidad en Norteamérica han sido el de Lake Andes (Dakota del Sur) y el de Finger Lakes (Nueva York).<sup>94</sup>

Con excepción de estos brotes, las mortandades provocadas por esta enfermedad se han limitado a pocas aves silvestres.<sup>93</sup> La mayoría de los brotes se han presentado en aves de traspatio, en colecciones zoológicas y ornamentales, y en aves silvestres residentes.<sup>94</sup> Al parecer no es una enfermedad enzootica en las aves silvestres que esté establecida en sus poblaciones y después del brote en Lake Andes, las mortandades se han asociado con brotes en aves residentes y domésticas por lo que pueden ser resultado del contacto con poblaciones de estas últimas.<sup>95</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** entre 1967 y 1995 se presentaron más de 120 brotes en Estados Unidos con una mortandad anual menor a 350 aves, a excepción de los eventos de mayor impacto.<sup>96</sup> Durante el brote de 1967 en Long Island murió el 5% de las poblaciones de pato de collar y pato negro;<sup>93</sup> es decir, más de 1800 aves.<sup>34</sup> Un brote en enero de 1973 ocasionó la muerte del 42% de los patos de collar (se estimó que fueron cerca de 43000 individuos)<sup>34, 94</sup> de una población de 163500 patos que invernan en el refugio nacional de vida silvestre de Lake Andes en Dakota del Sur.<sup>93, 96</sup> Otro brote en febrero de 1994 mató al 24% de la población de pato negro y al 3% de la de pato de collar (en total 1200 individuos)<sup>34, 94, 96</sup> en la región oeste de Nueva York.<sup>93</sup>
- c) **Presencia en México:** no se ha registrado esta enfermedad.<sup>94</sup>
- d) **Importancia reconocida:** el número de los brotes aumentó cada década por lo que se considera una enfermedad emergente en Norteamérica.<sup>93</sup> Desde 1967 a 1973 fue considerada una enfermedad de reporte por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos.<sup>96</sup>

#### 7.4.8 Viruela aviar

- a) **Alto impacto:** en la mayoría de las aves la viruela aviar es una enfermedad leve y auto-limitante que raramente provoca la muerte, al menos que las lesiones se localicen en los párpados o en la mucosa oral o respiratoria.<sup>97</sup> Pocas veces se ha reportado en aves acuáticas silvestres,<sup>98</sup> aunque últimamente se ha observado más regularmente<sup>97</sup> y afecta significativamente a otros grupos de aves.<sup>98</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** a pesar de que la enfermedad ha sido reportada en varias ocasiones, ha afectado a uno o pocos individuos por evento.<sup>98</sup>
- c) **Presencia en México:** la distribución en el mundo es amplia<sup>98</sup> y en México se ha registrado en dos familias de aves (*Phasianidae* y *Psittacidae*).<sup>97</sup>
- d) **Importancia reconocida:** debido al incremento en el número de los casos reportados y a la cantidad de nuevas especies infectadas, es considerada una enfermedad emergente.<sup>98</sup>

#### 7.4.9 Otras

Algunas enfermedades virales sólo han afectado a aves en cautiverio, como la enfermedad de cuerpos de inclusión de las grullas.<sup>99</sup>

### 7.5 Biotoxinas

#### 7.5.1 Botulismo Aviar

- a) **Alto impacto:** se han reportado epidemias con una mortalidad mayor a un millón de individuos y es común que en algunos brotes mueran cincuenta mil aves o más.<sup>38, 100</sup> La mayor cantidad de brotes importantes se han dando en Norteamérica (en Canadá y Estados Unidos).<sup>38</sup> Las mortandades por botulismo son muy variables: un año pueden ser cientos de aves y al siguiente miles, en el mismo sitio.<sup>38</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** en Norteamérica, desde 1910 hasta antes de 1995, se registraron ocho brotes de botulismo que mataron desde cientos de miles hasta millones de aves.<sup>38, 100</sup>

En la base de datos del NWHC se registraron 96 brotes de botulismo aviar que causaron la muerte de más de mil aves.<sup>24</sup> El más severo ocurrió en 1995 y causó la muerte de 200,000 aves, los dos siguientes brotes en magnitud se dieron en 1996, en uno se estimó una mortandad de 117,052 aves y en el otro, de 100,000; estos tres brotes se presentaron en Canadá.<sup>24</sup> Otro brote fue el de 2009 en Grate

Salt Lake, Estados Unidos, en el que murieron 50,000 aves aproximadamente. De los brotes registrados, 13 mataron a más de 10,000 aves.<sup>24</sup>

- c) **Presencia en México:** el botulismo aviar tipo C en aves silvestres se ha documentado en 28 países, de todos los continentes (menos Antártica), entre los cuales se incluye México.<sup>38</sup>
- d) **Importancia reconocida:** el botulismo aviar es la enfermedad más importante de las aves acuáticas (principalmente anseriformes y aves playeras); sin embargo, no se sabe bien cuáles son sus efectos en las poblaciones.<sup>38, 100</sup>

### 7.5.2 Ficotoxicosis

- a) **Alto impacto:** con algunas excepciones, la mayoría de las mortalidades en aves silvestres debidas a ficotoxinas son eventos anecdóticos.<sup>101</sup> Hay evidencia de cianobacterias responsables de la muerte de aves en cuerpos de agua dulce; sin embargo, los casos no han sido tantos como se esperaría.<sup>101</sup> Se han presentado mortandades simultáneamente a floraciones de algas nocivas (Harmful Algal Blooms, HAB) y en muchos casos no se ha establecido una relación directa,<sup>101</sup> pero la aplicación de mejores técnicas diagnósticas puede ayudar a detectar más mortandades por estas toxinas.<sup>5</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** una intoxicación con saxitoxinas afectó aproximadamente a 2000 aves en las costas de Washington, Estados Unidos.<sup>101</sup> Otro evento relacionado con esta toxina causó la muerte de gaviotas, aves playeras, 620 anseriformes y 1600 patos negros (*Anas rubripes*), en la costa norte de Massachusetts.<sup>101</sup> La anatoxina-a fue responsable de la muerte de 7000 gaviotas de Franklin (*Larus pipixcan*), 560 patos, 400 gallaretas, 200 faisanes, 2 halcones y numerosas aves canoras; en Storm Lake (Iowa, Estados Unidos).<sup>101</sup> Se han registrado otros eventos de ficotoxicosis pero afectaron a pocos individuos.<sup>101</sup> En 2007 se reportó, ante el NWHC, una mortandad de más de mil individuos, debida a ácido domoico (marea roja), en la costa del sudoeste de California. En 2008 murieron cerca de mil aves acuáticas y mamíferos marinos por saxitoxina, en Canadá.<sup>24</sup>

- c) **Presencia en México:** los eventos de ficotoxicosis han ocurrido en varias partes del mundo y en México sólo se ha registrado la muerte de 150 pelícanos café (*Pelecanus occidentalis*) en Baja California en 1996, ocasionada por ácido domóico.<sup>101</sup>
- d) **Importancia reconocida:** no se tiene información sobre este criterio.

### 7.5.3 Micotoxycosis

- a) **Alto impacto:** diferentes hongos producen micotoxinas pero las aflatoxinas y las fusariotoxinas son las únicas que han afectado a aves silvestres.<sup>102</sup> Se han reportado pocas mortandades por aflatoxinas, la mayoría ocurrieron en Texas y las especies intoxicadas han sido patos, gansos y grullas.<sup>102</sup>

Los informes sobre intoxicaciones con fusariotoxinas en aves silvestres son raros, los únicos eventos de mortalidad se dieron en Texas y Nuevo México, y afectaron grullas grises que consumieron cacahuates contaminados.<sup>102</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** las muertes masivas de aves silvestres se han documentado en pocas ocasiones; no obstante, los efectos de la exposición crónica a las micotoxinas pueden ser más perjudiciales.<sup>103</sup> El primer evento de aflatoxicosis reportado en Texas causó la muerte de 500 gansos nevados (*Chen caerulescens*) y el segundo, de 7000 patos (*Anas platyrhynchos* y *Anas acuta*, principalmente).<sup>104</sup>

La única mortandad registrada en el NWHC por aflatoxicosis afectó a 10,500 gansos nevados, patos de collar, gansos de Ross y gansos frente blanca; ocurrió en 1999, en Estados Unidos.<sup>24</sup>

- c) **Presencia en México:** no se tienen datos sobre su ocurrencia en México, pero las micotoxinas se pueden producir prácticamente en cualquier clima templado y húmedo.<sup>103</sup>
- d) **Importancia reconocida:** no se encontró información.



#### 7.5.4 Mielinopatía Vacuolar de las Aves

- a) **Alto impacto:** esta es una enfermedad neurológica reportada en Estados Unidos que ha afectado águilas (*Haliaeetus leucocephalus*), gallaretas (*Fulica americana*), a algunos patos (*Anas platyrhynchos*, *Bucephala albeola* y *Aythya collaris*) y a otras aves (*Branta canadensis*, *Charadrius vociferus* y *Bubo virginianus*).<sup>105</sup> Se trata de una intoxicación aguda y se caracteriza por producir vacuolización simétrica de la materia blanca del cerebro y médula espinal, ataxia, incapacidad para volar o vuelo errático, incapacidad para perchar, colisión con objetos y nado en círculos.<sup>105, 106</sup> Actualmente se desconoce la etiología pero debido a las lesiones, epidemiología de los brotes, ausencia de agentes infecciosos, estudios de campo y alimentación experimental de algunas aves; se sospecha de una neurotoxina producida por una cianobacteria relacionada con la vegetación acuática (*Hydrilla verticillata*).<sup>105, 106</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** el primer brote se registró en 1994 en DeGray Lake, Arkansas, cuando causó una mortandad del 35 a 60% de las águilas (*Haliaeetus leucocephalus*) y de cientos de gallaretas (*Fulica americana*) que residían en el lago.<sup>105, 106</sup> A partir de entonces se han reportado muertes desde veinte a cientos de aves acuáticas en más de diez cuerpos de agua en Estados Unidos.<sup>106</sup>
- c) **Presencia en México:** no se encontraron registros de la enfermedad en el país.
- d) **Importancia reconocida:** se considera una enfermedad emergente.<sup>106</sup>

## 7.6 Toxinas Químicas

### 7.6.1 Organoclorados

- a) **Alto impacto:** los compuestos organoclorados se emplearon ampliamente durante 1940-1960 y el principal efecto que tienen en las aves silvestres es que afectan la reproducción.<sup>107</sup> Uno de los casos más conocidos es el del DDT (se transforma en DDE y DDD en el ambiente) que produce adelgazamiento del cascarón de los huevos en rapaces y disminuye su éxito reproductivo.<sup>107</sup> Otros efectos incluyen mortalidad aguda, baja fertilidad, incapacidad de reproducirse y alteración del

comportamiento de incubación en adultos; mortalidad, efectos teratogénicos y emaciación en embriones.<sup>107</sup> El águila pescadora (*Pandion haliaetus*) es una de las aves rapaces que han sido afectadas mundialmente por los organoclorados y se considera como una especie bioindicadora para el monitoreo de estos plaguicidas.<sup>108</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** a pesar de que se disminuyó o prohibió su producción, continúan siendo un problema ecológico por su persistencia prolongada en el ambiente<sup>107,109</sup> y han provocado al menos seis eventos de mortalidad en aves acuáticas en Estados Unidos.<sup>109</sup>
- c) **Presencia en México:** la exposición a estos plaguicidas es global y han muerto aves en Norteamérica y Sudamérica.<sup>110</sup> En México se han detectado varios compuestos organoclorados en aves rapaces en Baja California Sur.<sup>108</sup>
- d) **Importancia reconocida:** no se encontraron datos al respecto.

#### 7.6.2 Organofosforados y Carbamatos

- a) **Alto impacto:** el uso de los organofosforados y carbamatos como plaguicidas se incrementó tras la prohibición de los organoclorados, y su ventaja es que se descomponen en menos tiempo.<sup>109</sup> Sin embargo, los efectos de su toxicidad se han registrado en muchos vertebrados y las aves parecen ser más sensibles.<sup>109</sup> Se han envenado más de 100 especies de aves y las paseriformes, rapaces y acuáticas son las que se encuentran muertas con mayor frecuencia en Estados Unidos.<sup>109</sup> Las aves acuáticas pueden ser bioindicadores de la contaminación ambiental con estos plaguicidas.<sup>111</sup>
- b) **Recurrencia de la enfermedad:** en Estados Unidos, entre 1986 y 1995 se registraron 181 eventos de mortalidad de aves causados por estos plaguicidas.<sup>109</sup>
- c) **Presencia en México:** estos compuestos son utilizados ampliamente en México.<sup>111</sup>
- d) **Importancia reconocida:** no se encontró información que confirme este criterio.

### 7.6.3 Plomo

- a) **Alto impacto:** el plomo es un metal sin alguna función biológica benéfica, que puede intoxicar a las aves cuando ingieren algún objeto de plomo, principalmente perdigones o plomadas de pesca, causando alteraciones fisiológicas, conductuales, bioquímicas y la muerte.<sup>40</sup>

En Estados Unidos se estimó una pérdida anual de 1.6 a 2.4 millones de aves acuáticas,<sup>39</sup> y por los impactos ecológicos, en 1991 se prohibió el uso de municiones de plomo para la cacería de aves acuáticas.<sup>40</sup> Pero posteriormente a esto, debido a la exposición continua en las áreas con altas concentraciones de plomo en el suelo o sedimento, se han presentado mortandades a gran escala.<sup>40</sup> Los anseriformes y las aves rapaces son los grupos más afectados y entre los primeros es frecuente que se reporten de cientos a miles de individuos muertos.<sup>39</sup>

- b) **Recurrencia de la enfermedad:** es una enfermedad crónica y se observan aves enfermas o muertas en pequeñas cantidades más comúnmente que en grandes mortandades,<sup>40</sup> y es un problema constante por la acumulación y persistencia de este metal en los ecosistemas.<sup>39</sup>

Las 41 mortandades por plomo registradas en el NWHC han afectado desde algunas decenas hasta miles de individuos y se han presentado continuamente todos los años, menos en el 2002.<sup>24</sup> Uno de los eventos notables ocurrió en 1999, cuando murieron cerca de 5000 patos golondrinos y patos de collar.<sup>24</sup> En otro evento, en 2007, murieron 1500 patos, gansos y cisnes.<sup>24</sup>

- c) **Presencia en México:** se considera que México es uno de los países con mayor número de muertes y pérdidas crónicas debidas a esta intoxicación.<sup>39</sup> En 1989, se encontraron 59 flamencos muertos, intoxicados con plomo, en el estuario de Celestún, Yucatán.<sup>44</sup>
- d) **Importancia reconocida:** se considera como una enfermedad relevante, difícil de controlar, que afecta continuamente a las aves acuáticas.<sup>39</sup>

#### 7.6.4 Otras

Se han documentado otras sustancias tóxicas para las aves, como el selenio, mercurio, cianuro, la sal y petróleo; sin embargo, no se encontró información sobre eventos severos de mortalidad o una recurrencia considerable. A continuación se presenta una breve reseña.

El selenio es un elemento que se concentra naturalmente en ciertos suelos o artificialmente en hábitats contaminados.<sup>112</sup> Puede ocasionar intoxicaciones en los animales y se ha documentado en muchas especies de aves.<sup>112</sup> Produce deformaciones y muerte embrionaria, mortandad en aves adultas y una mayor susceptibilidad a enfermedades infecciosas.<sup>112</sup>

La intoxicación con mercurio raramente ha provocado la muerte masiva de aves, más bien se trata de un problema incidental con efectos subletales.<sup>113</sup>

El cianuro se utiliza en el proceso de extracción de oro y plata, y la mayoría de los casos de mortalidad de aves se han debido a la exposición en minas de estos metales.<sup>114</sup>

Las aves se intoxican con sal cuando la ingieren en grandes cantidades, no tienen tiempo de adaptarse a ambientes salinos, no tienen acceso al agua o el funcionamiento de sus glándulas de la sal es alterado por plaguicidas o petróleo.<sup>115</sup> La intoxicación con sal se ha reportado infrecuentemente.<sup>115</sup>

Debido a la gran cantidad de petróleo que se derrama en el ambiente, la intoxicación en las aves y otras especies silvestres es relativamente común.<sup>116</sup> Los efectos pueden ser mecánicos causando la pérdida de impermeabilidad y aislamiento térmico de las plumas; o toxicológicos como malformación, embriotoxicidad, alteraciones endocrinas e inmunosupresión.<sup>116</sup> De acuerdo con los registros del NWHC, en 1996 se estimó que murieron 1,146 aves marinas, en 2005 perecieron 5,000 aves y en 2007, 2,509.<sup>24</sup>

## 8. ANEXO 2. INFORMACIÓN SOBRE LAS ENFERMEDADES INCLUIDAS EN EL SISTEMA EXPERTO

### 8.1 Cólera Aviar

#### 8.1.1 Agente

El cólera aviar es causado por *Pasteurella multocida*, una bacteria encapsulada, Gram-negativa, con forma de coco a coco-bacilo,<sup>37</sup> que se tiñe de forma bipolar con algunas tinciones.<sup>36</sup> El sistema para clasificar las cepas bioquímica y serológicamente abarca cinco tipos capsulares (A, B, D, E y F), dieciséis serotipos somáticos basados en antígenos de la cápsula y la pared celular (1-16), y tres subespecies basadas en los patrones de fermentación de carbohidratos (*P. multocida multocida*, *P. multocida gallicida* y *P. multocida septica*).<sup>36, 37</sup>

La subespecie que más se ha encontrado en aves silvestres es *P. multocida multocida*.<sup>36, 37</sup> La mayoría de las cepas aviares pertenecen al tipo A y a diversos serotipos somáticos; el que más se ha reportado mundialmente en aves silvestres es el 1, seguido por el 3 y 4.<sup>37</sup> La identificación de los serotipos es útil porque existen diferencias entre los que se encuentran en aves silvestres y domésticas, y entre las regiones de Norteamérica.<sup>47</sup> En las rutas migratorias de Norteamérica predomina el serotipo 1, con excepción de la ruta del Atlántico, en la cual predominan el 3 y 4.<sup>37, 47</sup> En las cepas del tipo A, la cápsula parece ser un determinante sustancial de la virulencia.<sup>37</sup>

Los serotipos tienen una patogenicidad variable y pueden combinarse.<sup>37</sup> En aves se han reportado catorce y en aves silvestres, nueve de los dieciséis existentes con al menos 29 combinaciones diferentes.<sup>37</sup> Debido a que son pocos los subtipos que se suelen aislar en las aves silvestres, la serotipificación no es muy útil para determinar la transmisión entre especies, rastrear la dispersión de las epidemias o determinar su origen.<sup>37</sup>

Para comprender mejor la enfermedad, es necesario tipificar los aislamientos de *P. multocida* con técnicas genéticas, que son más sensibles y permiten una mayor discriminación entre cepas.<sup>37</sup> En general, la virulencia puede ser muy variable entre aislamientos, muchos no causan la enfermedad en aves silvestres;<sup>36</sup> por lo que también es necesario realizar pruebas de patogenicidad y virulencia en aves.<sup>37</sup>

### 8.1.2 Hospedero

**Especies susceptibles:** al parecer, la mayoría de las aves se pueden infectar bajo ciertas circunstancias<sup>36</sup> y la enfermedad se ha presentado de manera natural en más de 190 especies; sin embargo, la susceptibilidad varía ampliamente entre ellas.<sup>36, 37</sup> Las que se reportan más comúnmente son las aves acuáticas, especialmente los anátidos de Norteamérica y las gallaretas, seguidos por carroñeros como gaviotas y cuervos, y en menor medida rapaces y otras aves acuáticas.<sup>37, 47</sup>

En algunos brotes se detectó una secuencia en la mortalidad de las especies: las gallaretas (*Fulica americana*) comenzaron a morir al inicio de los brotes, seguidas por los cisnes, el pato chalcuán (*Anas americana*) y otras especies de patos; además de que las gallaretas fueron afectadas proporcionalmente más que las otras especies.<sup>36, 37, 117</sup> Durante los brotes se encuentran múltiples especies afectadas,<sup>37</sup> pero el riesgo de infección puede estar influenciado por las diferencias en la fisiología, las densidades, el uso del hábitat y la frecuencia de forrajeo.<sup>117</sup>

Algunas aves que sobreviven a la infección desarrollan inmunidad por un corto plazo, otras se vuelven portadoras y pueden serlo durante toda su vida.<sup>37, 47</sup> Otros animales como los mamíferos también son susceptibles a la infección, pero los tipos de *P. multocida* que los afectan generalmente no causan enfermedad en aves.<sup>47</sup>

**Factores predisponentes:** las especies que se encuentran en mayor riesgo son aquellas que conforman parvadas grandes, y usan el ambiente y se alimentan juntas.<sup>5, 37</sup> Las epidemias de cólera aviar se suelen presentar en humedales con altas densidades de aves acuáticas susceptibles o en colonias de reproducción, ya que el contacto prolongado pueden favorecer la transmisión y que se den brotes severos.<sup>35, 37</sup> Densidades elevadas de individuos pueden aumentar la tasa de infección y generar condiciones estresantes, lo cual favorece la infección.<sup>35,37</sup>

El sexo puede ser predisponente ya que en algunos brotes se ha visto que los machos presentan mayores tasas de mortalidad que las hembras y aunque se desconoce la razón, las hembras tienen más posibilidades de sobrevivir a la infección; aunque esto no se ha confirmado.<sup>36, 37</sup>

### 8.1.3 Ambiente

Se menciona que poco hábitat disponible, sequías, humedales con agua poco profunda o estancada y un clima desfavorable para las aves, se han asociado con epidemias en las zonas de invernación.<sup>36, 37</sup> Debido a que las aves acuáticas se concentran en humedales cada vez más reducidos, esta enfermedad puede convertirse en un problema mayor.<sup>37, 47</sup>

Los factores climáticos que pueden incrementar o disminuir el riesgo de cólera aviar son la temperatura, niebla y lluvia.<sup>37</sup> Un clima frío aumenta el nivel de estrés y el hacinamiento de las aves y al parecer incrementa la mortandad durante los brotes; aunque la bacteria tiene una sobrevivencia menor en agua a 4°C que en agua a 20°C.<sup>36, 37</sup> La niebla prolongada disminuye la movilidad de las aves, por lo que puede aumentar el periodo potencial de infección; además de que reduce los rayos ultravioleta que llegan al agua, prolongando la supervivencia de la bacteria en ella.<sup>37</sup> En aves domésticas se encontró una correlación entre la lluvia y el cólera aviar, pero no se ha observado una relación consistente en las epidemias en aves silvestres.<sup>37</sup>

Algunos brotes han coincidido con cambios a gran escala en el ambiente y el uso del suelo, como la aplicación de plaguicidas a gran escala, intensificación de la agricultura, pérdidas significativas de humedales y cercanía entre las poblaciones de aves silvestres y domésticas.<sup>37</sup> En algunos casos se ha reportado la enfermedad primero en aves en cautiverio y posteriormente en aves silvestres, aunque no siempre se ha logrado esclarecer que grupo de aves fue la fuente de infección.<sup>37</sup>

A pesar de que algunos estudios en vida silvestre reportan relaciones entre la calidad del agua y los brotes de cólera aviar, investigaciones más amplias no han demostrado una relación significativa entre sitios con mortandades o aislamientos de la bacteria y humedales sin el agente.<sup>37</sup> Sin embargo, se ha encontrado una relación positiva entre la abundancia de la bacteria en el agua y sedimento, y la concentración de nutrientes en el agua relacionados con la eutrofización (K, NO<sub>3</sub>, P y PO<sub>3</sub>) y la proteína disuelta.<sup>37, 51</sup>

En condiciones de laboratorio, la supervivencia de la bacteria en el agua se ve favorecida por la presencia de materia orgánica de origen animal (proteína animal),<sup>36, 118</sup> temperaturas cálidas (entre 18 y 20°C),<sup>37</sup> agua alcalina,<sup>5</sup> la adición de NaCl y la

presencia de otros microorganismos; así mismo, los iones de calcio y magnesio, solos o en combinación, en grandes cantidades, favorecen la supervivencia de la bacteria.<sup>37</sup>

Dependiendo de las condiciones ambientales, después de que se presenta la enfermedad, la bacteria puede sobrevivir en el suelo desde 15 a 113 días (se ha logrado aislar después de cuatro meses); en el agua, desde 10 a 30 días (y hasta un año bajo condiciones específicas de laboratorio), y en cadáveres, por al menos tres meses.<sup>36, 37, 47</sup>

#### 8.1.4 Epidemiología

**Estacionalidad:** los brotes que se dieron inicialmente en Norteamérica ocurrieron en invierno, pero recientemente se ha visto que los patrones geográficos y estacionales de las mortandades están asociados con los patrones migratorios de los anátidos y el cólera aviar se ha reportado durante todo el ciclo de vida de las aves; por lo que al parece está presente en algunas poblaciones durante todo el año.<sup>36, 37, 47</sup> Adicionalmente, las principales epidemias se observan en las zonas de mayor concentración de individuos, durante el invierno o a comienzos de la primavera.<sup>36, 37</sup> De igual manera se han presentado mortandades durante la temporada de reproducción (en verano) en aves que anidan en colonias.<sup>37</sup>

**Recurrencia:** en Estados Unidos se tienen localizadas varias áreas donde la enfermedad es enzootica y se presenta casi anualmente en la mayoría.<sup>37</sup> En estas zonas, las mortandades pueden presentarse durante dos a cuatro meses, pero en otras áreas pueden durar menos de una semana.<sup>37</sup>

**Transmisión:** se cree que en aves silvestres la enfermedad se transmite por contacto directo, al ingerir la bacteria a partir del agua o sedimento, o por aerosoles, en ambientes contaminados.<sup>35, 36, 37, 47, 51</sup> Las aves acuáticas pueden ingerir la bacteria en alimento o agua contaminados y las depredadoras o carroñeras pueden hacerlo al alimentarse de aves enfermas o muertas.<sup>37, 47</sup> *P. multocida* se puede concentrar en la superficie del agua y cuando grandes densidades de aves acuatizan, despegan o se bañan generan aerosoles que son inhalados por individuos susceptibles.<sup>37, 47</sup> Cuando se realiza la



atención de las epidemias, el equipo contaminado también puede ser una fuente de infección.<sup>47</sup>

En algunos reportes se estableció que la fuente de la infección fue el ataque de depredadores (mordidas no letales de gatos o mapaches), pero en otros no se cuenta con información clara sobre esta vía de transmisión.<sup>36, 37, 47</sup> Otras hipótesis mencionan que la transmisión puede darse por invertebrados contaminados (larvas de mosca, como en el caso de las aves domésticas) o por medio de vectores (se ha aislado la bacteria en diversos artrópodos de aves domésticas y en pijos de aves silvestres).<sup>36, 37, 47</sup> Sin embargo, es difícil que a través de estas vías se produzcan epidemias o sean determinantes en aves silvestres.<sup>37, 47</sup>

La vía de entrada de la bacteria al hospedero es traspasando las membranas mucosas como la de la faringe, aparato respiratorio superior o la conjuntiva.<sup>37</sup> *Pasteurella multocida* también puede entrar a través heridas en la piel.<sup>37, 47</sup>

Se considera que las descargas de la bacteria a partir de aves enfermas (por vía oral o fecal) o muertas, es la fuente primaria de contaminación e infección.<sup>37, 47</sup> Debido a que la bacteria no se mantiene en heces, las grandes descargas nasales y orales constituyen la fuente de contaminación más probable.<sup>37</sup> Así mismo, cuando los carroñeros o depredadores se alimentan de los cadáveres, liberan grandes cantidades de la bacteria al ambiente.<sup>47</sup>

Los patrones de dispersión rápida y mortandad impredecible sugieren que existe una exposición simultánea a una fuente común de infección; el agua es la más probable y al parecer es la más importante para la transmisión en anátidos.<sup>37</sup> La bacteria se ha podido encontrar durante semanas en cuerpos de agua donde se ha presentado la enfermedad.<sup>47</sup>

**Reservorio:** no se ha esclarecido cuál es el reservorio del cólera aviar que le permite persistir y presentarse anualmente, pero se han propuesto el suelo o el agua y las aves portadoras.<sup>37</sup>

La bacteria se ha aislado a partir de aves acuáticas sanas y del agua y sedimento de los humedales durante o después de los brotes.<sup>37</sup> En los humedales donde se presentan los brotes, la bacteria se encuentra cerca de la superficie, en las columnas profundas de

agua.<sup>47</sup> Sin embargo, no se ha podido aislar *P. multocida* durante el otoño en sitios donde en invierno o primavera se habían presentado brotes; lo cual sugiere que la bacteria no es capaz de sobrevivir durante el verano en el ambiente.<sup>37</sup>

Así mismo, se ha determinado que la bacteria sobrevive entre uno y dos meses después de las epidemias y su abundancia declina gradualmente.<sup>37, 51</sup> Por lo tanto, los humedales no son el reservorio que le permite a la bacteria sobrevivir por largos periodos o durante todo el año,<sup>37, 51, 119</sup> a pesar de que se tenían sospechas por la recurrencia de los brotes en los mismos sitios.<sup>36, 118</sup> No obstante, cuando inicia un brote, los humedales son trascendentes en la transmisión a las aves susceptibles, mediante el agua contaminada, ya que esta puede contener grandes cantidades de la bacteria.<sup>36, 37, 51, 118, 119</sup>

Se considera que algunas especies de aves acuáticas silvestres son los reservorios y portadores de la enfermedad, y tienen un papel sustancial en el inicio de los brotes, la dispersión y transmisión a otras especies; pero se requieren más investigaciones para determinarlas con claridad.<sup>36, 37, 47</sup> Se ha visto que los individuos portadores pueden transmitir la enfermedad a grandes distancias a través de su migración.<sup>36</sup>

Se piensa que las aves enfermas o que sobreviven a la enfermedad y se vuelven portadoras son el medio para que se presenten brotes.<sup>37, 51</sup> Se ha propuesto que el ganso nevado (*Chen caerulescens*) es un reservorio potencial, significativo para la transmisión y dispersión de la enfermedad;<sup>35, 47</sup> debió a que los brotes en las rutas migratorias Central y del Mississippi siguen el patrón de migración de esta especie.<sup>36, 37</sup> Además de que han aumentado sus poblaciones, su distribución y abundancia; está involucrado en las epidemias importantes y se han reportado brotes asociados a su llegada a los humedales;<sup>37</sup> la mortandad en sus poblaciones excede a la de otras especies,<sup>35</sup> se congrega en grandes densidades y anida en colonias; lo que facilita la transmisión y permite la persistencia de la bacteria durante el verano.<sup>37</sup> Adicionalmente se ha aislado *P. multocida* patógena serotipo 1 a partir de gansos sanos, tanto en las áreas de reproducción como en las de invernación y otro aislamiento de la bacteria resultó ser patógeno para otras aves acuáticas.<sup>37</sup>

**Signos:** la bacteria produce septicemia y enfermedad respiratoria.<sup>37, 120</sup> La mayoría de las aves muere sin presentar signos previos y es raro observar aves enfermas; hacia el final

de las epidemias se pueden hallar aves letárgicas.<sup>37, 47</sup> Se han reportado signos neurológicos como vuelo errático e incordiando, convulsiones, caminar y nadar en círculos u opistótonos. Cuando las aves mueren en el agua, suelen hacerlo con la cabeza recargada en la espalda. Se llega a observar una descarga mucosa transparente en las narinas y boca de individuos que han muerto recientemente.<sup>36, 37</sup>

Las aves carroñeras tienen una presentación más crónica de la enfermedad y pueden presentar debilidad, letargo, disnea, incapacidad para volar y temores en la membrana nictitante.<sup>37</sup>

**Lesiones:** en los casos de muerte aguda, los individuos presentan una buena condición corporal,<sup>36</sup> y en la necropsia se puede encontrar alimento en el esófago y el proventrículo, sin alguna lesión.<sup>37, 47</sup> Por lo regular se encuentran petequias o equimosis en el epicardio<sup>36, 37, 42</sup> o hemorragias variables en el miocardio y la banda coronaria,<sup>47</sup> así como petequias en las membranas serosas.<sup>37</sup> También se pueden encontrar hemorragias en la superficie de la molleja.<sup>47</sup>

Debido al efecto de la endotoxina producida por *P. multocida*, se observan focos hemorrágicos y necróticos de 1 a 2 mm en el hígado<sup>36, 37, 42</sup> y es menos común, pero se pueden encontrar petequias en el parénquima hepático.<sup>37</sup> El hígado puede apreciarse de diferente color (oscuro o cobrizo), ser friable y con inflamación.<sup>47</sup> El bazo puede ser normal o estar agrandado, con focos necróticos. Los pulmones pueden estar congestionados y edematosos, y en los intestinos se puede encontrar abundante fluido mucoso amarillento.<sup>36, 37, 47</sup> La gravedad de las lesiones es mayor conforme los individuos sobreviven por más tiempo.<sup>47</sup>

En aves depredadoras o carroñeras la enfermedad es más crónica y pueden presentar pericarditis fibrinosa, aerosaculitis, y neumonía focal.<sup>37</sup> En algunos individuos se observa inflamación en los senos craneales, articulaciones, oviducto, oído medio y otros tejidos.<sup>37</sup>

La histopatología es inespecífica salvo por la necrosis focal hepática, y los coco-bacilos abundantes que se observan en los vasos sanguíneos y tejidos de todo el organismo.<sup>37</sup>

**Morbilidad y mortalidad:** las aves acuáticas son las que presentan las mayores mortalidades<sup>47</sup> y los brotes pueden involucrar desde cientos a miles de individuos de diversas especies; en Estados Unidos se han documentado epidemias con mortandades mayores a 50 000 individuos<sup>37</sup> y la mayor mortandad excedió las mil aves por día.<sup>47</sup> Sin embargo, es difícil determinar con exactitud las cantidades de individuos afectados, debido a que las aves enfermas se aíslan, son depredadas y los cadáveres son removidos por los carroñeros; además de que los cadáveres que se encuentran representan del 25 al 50% de la mortandad total.<sup>37</sup> Actualmente, la enfermedad se presenta en casi toda Norteamérica y es considerada un problema para las poblaciones de aves silvestres; aunque se desconoce la razón de que hayan disminuido los reportes de eventos de mortalidad desde 1999.<sup>36, 37</sup>

Por otra parte, es posible que los brotes con bajas mortandades sean más comunes de lo que se piensa, constituyan una porción significativa de las pérdidas anuales, pasen desapercibidos, y a partir de ellos se desarrollen epidemias.<sup>37</sup> En estos casos suele encontrarse sólo una o dos especie afectadas y las demás permanecen sanas,<sup>37, 47</sup> lo que sugiere que los individuos que mueren son los portadores o que la transmisión se da por contacto directo.<sup>37</sup>

Los brotes se dan de manera repentina<sup>36</sup> y es frecuente que la enfermedad se presente de manera aguda, ocasionando la muerte entre seis y doce horas después de la exposición; sin embargo, lo común es que la muerte se de entre uno y dos días.<sup>37, 47</sup> En muchos brotes, las aves aparentemente mueren durante la noche, lo que se aprecia cuando las aves sanas dejan los sitios de percha.<sup>37</sup> Se ha observado que la mortalidad disminuye hacia el final de las epidemias en parte por la dispersión de las aves, pero también se ha encontrado que aumenta la morbilidad, lo que sugiere que la bacteria disminuye su virulencia.<sup>36, 37</sup>

Es necesario investigar a fondo ciertos aspectos para comprender mejor la epidemiología de esta enfermedad en las aves silvestres y lo que determina que inicien, se mantengan y terminen las epidemias.<sup>37</sup> Actualmente no se sabe con absoluta claridad la importancia de la susceptibilidad de los hospederos, los factores estresantes, las condiciones ambientales, la distribución y densidad de las aves, los portadores, la

virulencia del agente y los efectos en las poblaciones;<sup>37, 47</sup> por lo tanto, no es posible predecir los brotes de esta enfermedad.<sup>35, 37</sup>

#### 8.1.5 Diagnóstico

**Presuntivo:** se basa en el reporte de una gran mortalidad de aves en poco tiempo, con pocos signos clínicos y con las lesiones mencionadas posteriormente como la buena condición corporal.<sup>37, 47</sup> Si las aves mueren en muy poco tiempo (segundos a minutos) después de ser capturadas, también se puede sospechar de la enfermedad.<sup>47</sup> Se pueden realizar frotis de sangre del corazón para apoyar el diagnóstico si se observan muchos coco bacilos.<sup>37</sup>

**Diferenciales:** otras enfermedades que causan muertes agudas y masivas deben considerarse cuando se sospecha de cólera aviar. Los signos de campo también son compatibles con peste del pato e intoxicaciones con plaguicidas.<sup>47</sup>

**Definitivo:** consiste en el aislamiento e identificación de *P. multocida*.<sup>37, 47</sup> Se puede realizar con sangre del corazón o cualquier órgano (el corazón debe enviarse entero al laboratorio).<sup>37, 47</sup> El hígado es el órgano de elección pero también puede ser la médula ósea y la ventaja de esta última es que la bacteria puede sobrevivir de semanas a meses en ella.<sup>37, 47</sup> La bacteria se cultiva a 37°C en agar sangre, agar tripticosa soya o de preferencia en un medio selectivo para *Pasteurella*.<sup>37</sup>

#### 8.1.6 Tratamiento

Los antibióticos se han usado para combatir la enfermedad en aves domésticas. Durante un brote en gansos canadienses (*Branta canadensis*) se administró oxitetraciclina intramuscular, complementada con tetraciclina en el alimento,<sup>47</sup> y en otro caso se administró penicilina a diversas especies de patos.<sup>36</sup> No obstante, debido a la presentación aguda en aves silvestres, los fármacos tendrían mayor utilidad de forma profiláctica que terapéutica,<sup>37</sup> además de que esta medida no es aplicable en vida silvestre.<sup>36</sup>

### 8.1.7 Control

Las medidas de control y prevención en las aves silvestres se deben enfocar en beneficiar a las poblaciones en riesgo, en lugar de beneficiar a los individuos;<sup>37</sup> pero lo primordial es considerar todos los aspectos del ecosistema afectado.<sup>36</sup>

La detección oportuna de los brotes es una estrategia fundamental para controlar esta enfermedad, por lo que es necesario vigilar constantemente los humedales y enviar las muestras a laboratorio inmediatamente para contar con un diagnóstico temprano y poder implementar las medidas necesarias.<sup>47</sup> En este caso, los costos son mínimos comparados con los necesarios para el manejo de una mortandad a gran escala.<sup>36, 47</sup>

Las acciones correctas dependen de la severidad y distribución de la enfermedad y de la importancia de las poblaciones involucradas;<sup>37</sup> deben orientarse a evitar el contacto de los individuos susceptibles con las fuentes de infección.<sup>47</sup> Se debe considerar que las aves portadoras son el medio más probable para la ocurrencia y dispersión de los brotes.<sup>119</sup> Por lo tanto, se puede separar a las especies portadoras de las susceptibles, evitar factores estresantes, disminuir las densidades,<sup>119</sup> ahuyentar a las aves y proveer sitios artificiales de alimentación; bajo condiciones extremas se puede tratar de desinfectar los humedales, despoblarlos, drenarlos, aumentar el nivel del agua para diluir la bacteria o asegurar las medidas de tratamiento para los individuos afectados.<sup>37, 47</sup> Es necesario evaluar cuidadosamente los patrones de movimiento de las aves y las características de la enfermedad para determinar cuáles son las acciones apropiadas y prevenir que individuos infectados dispersen la enfermedad a otros sitios.<sup>37, 47</sup>

La despoblación puede ser eficaz en condiciones limitadas cuando las epidemias son localizadas y discretas, tienen un gran riesgo para poblaciones susceptibles, el brote representa la dispersión de la enfermedad, se cuenta con los recursos para evitar que aves infectadas contaminen otros sitios, y los medios usados son específicos para las especies objetivo sin afectar a otras.<sup>36, 37, 47</sup>

Los cadáveres son la fuente más importante de *P. multocida*, por lo que al removerlos se reduce la persistencia de la bacteria y puede ser una medida exitosa para controlar los brotes.<sup>36, 51</sup> Algunas epidemias se han controlado cuando se remueven los cadáveres y la bacteria ya no se detecta en el agua.<sup>37</sup> La recolección de los cadáveres al inicio de un

brote provee la mejor oportunidad de disminuir los efectos negativos; ya que pueden servir de señuelos y atraer a otras aves acuáticas al sitio contaminado, y los carroñeros que se alimenten de ellos pueden dispersar la enfermedad mecánicamente, además de que también son susceptibles.<sup>36, 37, 47</sup> Durante la recolección de cadáveres es imprescindible prevenir la contaminación del equipo y del ambiente, y considerar que la bacteria se encuentra en grandes cantidades en los fluidos nasales.<sup>36, 47</sup> Cuando se presentan pocas mortandades, los carroñeros pueden contribuir a remover los cadáveres, algunas veces hasta en menos de tres días.<sup>37</sup>

Se ha intentado desinfectar el agua de estanques con sulfato de cobre y ácido clorhídrico, pero la eficiencia de esta acción no ha sido probada.<sup>37</sup> Esto puede ser útil para aves en cautiverio, colecciones zoológicas o especies en peligro de extinción,<sup>37</sup> pero los impactos ambientales deben evaluarse.<sup>47</sup> Al parecer, modificar las propiedades del agua no tiene un efecto significativo en disminuir la probabilidad de ocurrencia de las epidemias o en la persistencia de la bacteria.<sup>118</sup> Otra opción es mejorar las condiciones de los humedales para disminuir la supervivencia de la bacteria, sin embargo aún se requieren investigaciones para lograrlo.<sup>47</sup>

Muchas epidemias se controlan cuando las aves dejan el sitio contaminado o las condiciones que las favorecieron desaparecen.<sup>37</sup> Las medidas de control no han sido evaluadas rigurosamente por lo que se desconoce su efectividad.<sup>36</sup>

#### *8.1.8 Prevención*

La vacunación genera una inmunidad limitada de tres meses a menos de un año,<sup>37</sup> si la vacuna es de bacteria muerta protege sólo ante el mismo serotipo; pero si la bacteria está atenuada, proporciona protección cruzada.<sup>36</sup> Esta medida resulta impráctica para las situaciones en vida silvestre, pero puede ser una opción para aves en cautiverio, poblaciones particulares o especies en peligro de extinción.<sup>37, 47</sup>

Dado que la mayoría de las epidemias de cólera aviar afectan a comunidades de aves con altas densidades y ocurren en sitios bien definidos, se cree que dispersar estas aves ayuda a prevenir la enfermedad. Esto por lo menos debe reducir la tasa de transmisión si

inicia un brote.<sup>37</sup> No obstante, la naturaleza gregaria de estas aves y la pérdida de su hábitat favorecen que se reúnan en grandes cantidades, especialmente durante la invernación.<sup>37</sup>

Otra estrategia consiste en la vigilancia y detección oportuna de los brotes, para minimizar la contaminación ambiental y reducir la transmisión.<sup>36, 37</sup> La vigilancia debe realizarse en humedales con antecedentes o en los que se sospecha la presencia de la enfermedad, en los que se congregan grandes cantidades de aves y después de condiciones climáticas adversas.<sup>37</sup>

## 8.2 Botulismo Aviar

### 8.2.1 Agente

El botulismo aviar es causado por la ingestión de la toxina producida por la bacteria *Clostridium botulinum*.<sup>100</sup> Actualmente se han encontrado siete tipos de la toxina que se denominan con las letras de la A a la G.<sup>38, 100</sup> El tipo C es que normalmente ocasiona las mortandades en aves acuáticas, aunque también se han registrado brotes del tipo E en aves acuáticas sobre todo piscívoras, pero son mucho menos frecuentes.<sup>38, 100</sup> Las aves domésticas han sido afectadas por el tipo A y los demás tipos no se han registrado en aves en Norteamérica.<sup>38, 100</sup>

La bacteria *Clostridium botulinum* es estrictamente anaerobia y forma esporas que le permiten sobrevivir en condiciones extremas de desecación y calor y permanecer viables durante décadas.<sup>33, 38</sup> Las esporas se encuentran ampliamente distribuidas en el sedimento de los humedales,<sup>33</sup> principalmente de agua dulce, ocasionalmente en los marinos y en raras ocasiones en el suelo.<sup>38</sup> También se encuentran en tejidos de invertebrados, de vertebrados y en heces.<sup>38</sup>

La producción de la toxina requiere que la bacteria sea infectada por un bacteriófago, tiene lugar cuando la bacteria se encuentra en estado vegetativo y la libera cuando experimenta autólisis.<sup>33, 38</sup>



El crecimiento de la bacteria y la producción de la toxina pueden ser influenciados por varios factores como la temperatura, pH, oxígeno, potencial redox, presión del vapor de agua y la presencia de aminoácidos adecuados en el medio.<sup>38</sup> La bacteria puede crecer bien entre 15 y 45°C, con una temperatura óptima entre 25 y 40°C.<sup>38</sup> Debido a que *C. botulinum* es incapaz de producir ciertos aminoácidos esenciales, requiere un sustrato alto en proteína como los tejidos en descomposición, pero basta con que exista proteína disuelta.<sup>38</sup>

### 8.2.2 Hospedero

**Especies susceptibles:** se han registrado 263 especies de aves afectadas y probablemente todas las aves son susceptibles al botulismo; con la posible excepción de los zopilotes y otras aves carroñeras.<sup>38</sup>

Las familias de aves que se cree se han tenido botulismo tipo C son: *Accipitridae*, *Alcidae*, *Alaudidae*, *Anatidae*, *Ardeidae*, *Cathartidae*, *Charadriidae*, *Ciconiidae*, *Cisticolidae*, *Columbidae*, *Corvidae*, *Diomedidae*, *Emberizidae*, *Falconidae*, *Gaviidae*, *Gruidae*, *Haematopodidae*, *Hirundinidae*, *Icteridae*, *Laridae*, *Motacillidae*, *Pelecanidae*, *Phalacrocoracidae*, *Phasianidae*, *Phoenicopteridae*, *Podicipedidae*, *Procellariidae*, *Rallidae*, *Recurvirostridae*, *Scolopacidae*, *Stercorariidae*, *Sternidae*, *Strigidae*, *Struthionidae*, *Sulidae*, *Sylviidae*, *Threskiornithidae* y *Turdidae*.<sup>38</sup>

**Factores predisponentes:** la conducta de alimentación es un elemento crítico para la intoxicación.<sup>38</sup> Las aves que se alimentan filtrando su alimento como los patos de superficie o sondeando en el sedimento como las aves playeras, se encuentran en mayor riesgo. Dentro del primer grupo se pueden mencionar el pato de collar (*Anas platyrhynchos*), las cercetas (*Anas crecca*, *A. cyanoptera* y *A. discors*) y el pato cucharón (*A. clypeata*).<sup>38</sup> Ejemplos de aves playeras propensas son la avoceta americana (*Recurvirostra americana*) y la monjita (*Himantopus mexicanus*).<sup>38</sup> Las aves playeras que se alimentan cerca de la superficie como las del género *Calidris* spp. se encuentran en mayor riesgo que las que se alimentan más profundamente.<sup>38</sup> Las especies que se alimentan de invertebrados son más propensas a la intoxicación secundaria.<sup>43</sup>

### 8.2.3 Ambiente

Se considera que los factores necesarios para la ocurrencia de los brotes de botulismo son la presencia de la bacteria infectada por el bacteriófago, un sustrato o material nutritivo, una temperatura cálida y ausencia de oxígeno, para el crecimiento de la bacteria y la producción de la toxina; una forma de presentación de la toxina que las aves puedan ingerir y la presencia de aves susceptibles.<sup>121</sup>

Muchos brotes han ocurrido en humedales de agua dulce y alcalina, con sedimento lodoso, temperaturas elevadas y fluctuación en los niveles de agua; pero algunos también se han dado en cuerpos de agua salobre o salda, profundos, bien oxigenados o con niveles de agua estables.<sup>38, 122</sup>

Se ha demostrado que los cadáveres de vertebrados pueden permitir una gran producción de la toxina y contribuir a la propagación de un brote bajo ciertas condiciones.<sup>38</sup> Debido a que proporcionan un ambiente anaeróbico, rico en proteína y con la temperatura adecuada<sup>121</sup> (aproximadamente 25°C o más);<sup>123</sup> independientemente de las condiciones externas, por lo que se le ha denominado concepto del microambiente.<sup>122</sup> No obstante, algunos brotes se han dado en ausencia de cadáveres, por lo que se cree que cualquier materia orgánica en descomposición puede proveer el medio adecuado de crecimiento, a lo que se ha llamado el concepto de la cama de lodo.<sup>122</sup> Al parecer la vegetación en descomposición es un sustrato pobre para la bacteria,<sup>43</sup> pero existen argumentos contradictorios<sup>38</sup> y hasta el momento no hay evidencia de que los cadáveres de invertebrados originen los brotes.<sup>121</sup> Estos conceptos del microambiente y de la cama de lodo, no son mutuamente excluyentes, ni descartan otros posibles mecanismos.<sup>122</sup>

Las fluctuaciones en los niveles de agua pueden ser relevantes debido a que provocan la muerte de muchos organismos (plantas e invertebrados) que conforman la fuente de materia orgánica y las condiciones para la producción de la toxina.<sup>38</sup> De manera natural, las lluvias intensas y las inundaciones consecuentes pueden generar estas fluctuaciones, arrastrar materia orgánica y favorecer la ocurrencia de los brotes.<sup>122</sup>

Las actividades humanas pueden propiciar las condiciones para la producción de la toxina; por ejemplo cuando se drenan e inundan los humedales, se descargan en ellos

aguas residuales o se contaminan con plaguicidas provocando la muerte de organismos invertebrados y en consecuencia, aumentando el sustrato para la bacteria.<sup>38</sup>

En un estudio realizado durante nueve años, en 32 humedales con brotes de botulismo y sus respectivos sitios control; se estableció que el riesgo de presentación de los brotes depende de complejas interacciones entre el potencial redox, el pH y la temperatura del agua. Pero las predicciones del modelo indican que el riesgo relativo es mayor cuando el potencial redox se encuentra entre -200 y -300, el pH entre 7.5 y 9 y la temperatura del agua entre 25 y 30°C. De igual manera, es probable que el riesgo se incremente si la salinidad es > 2 ppt.<sup>33</sup> El potencial redox es una medida cuantitativa de la transferencia de electrones en las reacciones químicas, pero no se sabe cómo influye en el riesgo de los brotes y es difícil de interpretar.<sup>33</sup>

En un modelo que considera al botulismo de manera semejante a una enfermedad infecciosa, se establece que la cantidad de cadáveres en un humedal puede ser crítica para que se den las intoxicaciones secundarias y el surgimiento de los brotes. El modelo considera las posibilidades de que los cadáveres contengan esporas, que persistan el tiempo suficiente para que se desarrollen las larvas tóxicas y la tasa de contacto de las aves susceptibles con la toxina. Sin embargo, estas posibilidades pueden ser afectadas por diversas variables.<sup>43</sup>

En un trabajo se realizó un análisis estructural para determinar las variables más relevantes en cuanto a la ecología del botulismo aviar. Se seleccionaron 14 variables y se analizó la influencia de cada variable sobre las demás con una matriz de impactos cruzados. Los resultados de la matriz se graficaron y las variables se agruparon en cuatro zonas (poder, conflicto, salida y problemas autónomos). Las variables en la zona de poder y en la de conflicto se consideraron claves y estas son: las fluctuaciones en el nivel del agua, la temperatura (en el agua o en los cadáveres), la presencia de agua estancada (favorece la anaerobiosis por la descomposición de la materia orgánica y posee la temperatura que facilita el desarrollo de la bacteria), contaminación del agua (con sustancias tóxicas que causan la muerte de organismos o descargas de drenaje que agregan materia orgánica y favorecen la eutrofización) y proteína de origen animal.<sup>120</sup>

Las variables clave del agua determinan el surgimiento de los brotes ya que inicialmente provocan la muerte de animales que conforman el sustrato para el desarrollo de la bacteria, o generan los cambios para la germinación de las esporas y la producción de la toxina, y la presencia de proteína de origen animal a su vez, es determinante en la presentación de los brotes.<sup>120</sup>

#### 8.2.4 Epidemiología

**Estacionalidad:** muchos brotes han ocurrido en verano y otoño, cuando la temperatura ambiental es elevada, aunque también pueden darse en invierno y primavera.<sup>38</sup>

**Recurrencia:** en un estudio se estableció una asociación entre los sitios con antecedentes de brotes y el aislamiento de la bacteria a partir del sedimento.<sup>38</sup> Lo cual indica que los humedales en los que se ha presentado la intoxicación permanecen contaminados con las esporas y por lo tanto se cree que en estos es más probable que se presenten brotes posteriores.<sup>38</sup> Sin embargo, existe evidencia de que el antecedente de la enfermedad no es determinante.<sup>38</sup>

**Ciclo cadáver-gusano:** al alimentarse, las aves acuáticas y otros vertebrados pueden ingerir las esporas de *C.botulinum* y transportarlas en sus tejidos durante algún tiempo<sup>38</sup> (más del 50% de los patos en un humedal las pueden tener).<sup>43</sup> Cuando el individuo muere las esporas germina y la forma vegetativa de la bacteria se desarrolla en el ambiente anaeróbico y rico en proteína que le proporciona el cadáver; además de que el proceso de putrefacción eleva la temperatura, permitiendo la producción de la toxina a pesar de la temperatura ambiental.<sup>38, 43</sup> Los invertebrados como las larvas de mosca, no son afectados por la toxina y conforme se alimentan del cadáver, la bioacumulan. Posteriormente, las aves acuáticas consumen las larvas de mosca y otros invertebrados que salen del cadáver, mueren intoxicadas y sus cadáveres proporcionan el sustrato para la producción de más toxina.<sup>38, 43</sup> Con este sistema de retroalimentación positiva, los brotes de botulismo se auto-perpetúan, aumentando su magnitud.<sup>38</sup>

El componente más importante es la densidad de cadáveres en los cuales se produce la toxina. A pesar de que no en todos los cadáveres se desarrollan las larvas tóxicas, los

factores que reducen la disponibilidad de cadáveres como los carroñeros y la remoción artificial, disminuyen la exposición de las aves acuáticas a la toxina.<sup>38</sup>

Algunos individuos pueden diseminar las esporas de la bacteria a otros sitios, generando nuevos brotes.<sup>5</sup> Las aves que albergan las esporas de *C. botulinum* pueden morir por cualquier causa (otras intoxicaciones o enfermedades infecciosas) e iniciar o perpetuar un brote de botulismo a través del ciclo cadáver-gusano.<sup>38, 121</sup>

El botulismo aviar de una forma única, porque a pesar de ser una intoxicación, la producción secundaria de la toxina en los cadáveres y la disponibilidad de esta a través de las larvas, hacen que se comporte epidemiológicamente de manera similar a una enfermedad infecciosa; por lo cual sus brotes pueden ser tan catastróficos.<sup>43</sup>

**Signos:** el desarrollo de los signos, la severidad, la duración y la resolución (muerte o recuperación) dependen de la cantidad de toxina ingerida y de la especie.<sup>38</sup> Las aves afectadas muestran progresivamente debilidad, paresia y parálisis flácida. El primer signo que se puede observar es un vuelo débil, las aves se rehúsan a volar, tienen dificultades para despegar y aterrizar, el aleteo es débil y vuelan distancias cortas.<sup>38</sup> Después pierden la capacidad para volar y se desplazan remando con sus alas. La parálisis de las patas provoca una marcha inestable y eventualmente son incapaces de sostenerse. El cuello se vuelve flácido y las aves pueden morir ahogadas. Gradualmente pierden el reflejo palpebral, tienen los ojos entreabiertos o cerrados con midriasis y protrusión de la membrana nictitante.<sup>38</sup> Ocasionalmente se ha reportado diarrea verde. Al ser incapaces de desplazarse, las aves se deshidratan y cuando la parálisis afecta a los músculos respiratorios, mueren por asfixia.<sup>38</sup> En un brote en patos *Anas layasensis* los signos observados fueron incapacidad para volar, dificultad para levantar la cabeza, prolapso de la membrana nictitante, deshidratación, impactación de la cloaca y debilidad general.<sup>123</sup>

Una clasificación de los signos agrupa a las aves en tres clases: en la primera están responsivas pero no pueden volar, en la segunda tienen problemas para caminar y conservar la cabeza en alto, y en la tercera están postradas y casi totalmente paralizadas.<sup>38</sup> Las aves con afección leve se pueden recuperar o mostrar signos intermitentes.<sup>38</sup>

**Lesiones:** no se han registrado lesiones patognomónicas;<sup>123</sup> normalmente no se encuentran lesiones evidentes en las aves que mueren por botulismo<sup>38</sup> y las que se llegan a presentar por lo general están asociadas con el ahogamiento.<sup>123</sup> Puede haber congestión o hiperemia en varios órganos. Por lo general el ingluvis, proventrículo y molleja carecen de alimento, pero en ocasiones se encuentran larvas en el tracto digestivo superior.<sup>38</sup>

En el caso de los patos *Anas layasensis* la mayoría de los individuos tenían una buena condición corporal y sólo algunos estaban emaciados.<sup>123</sup> La lesión más abundante fue la decoloración de los pulmones y microscópicamente, fue infiltración de material eosinofílico homogéneo en la vías aéreas y en los espacios del tejido conectivo perivascular, lo que es sugerente de edema pulmonar secundario a la inhalación de agua.<sup>123</sup>

**Morbilidad y mortalidad:** el curso de la intoxicación depende de la cantidad de toxina ingerida: es agudo con dosis elevadas, y crónico con dosis menores. En este último caso, puede durar hasta 14 días y si los individuos ya no están expuestos a la toxina, se pueden recuperar naturalmente.<sup>124</sup>

La cantidad de individuos afectados por epidemia puede ir desde algunos cientos, hasta decenas de miles e incluso millones, y ser muy variables en el mismo sitio, afectando en un brote a cientos y al siguiente año, a miles.<sup>38</sup>

El botulismo aviar es la enfermedad más trascendental de las aves acuáticas en el mundo y la mayor cantidad de brotes severos se han registrado en Estados Unidos y Canadá.<sup>38, 100</sup> De acuerdo con los registros del NWHC, causó la mayor cantidad de brotes y afectó a más aves, entre todas las enfermedades presentadas en el periodo.<sup>24</sup> Sin embargo, es difícil estudiar los impactos que provoca y aún no se sabe bien cuáles son sus efectos en las poblaciones de aves acuáticas.<sup>38, 100</sup>

#### 8.2.5 Diagnóstico

**Presuntivo:** se basa en los signos (parálisis flácida de las alas, patas y cuello, y protrusión de la membrana nictitante)<sup>123</sup> y la ausencia de lesiones evidentes.<sup>38</sup>

**Diferenciales:** otras intoxicaciones como ficotoxicosis o intoxicación con plomo.<sup>38</sup> Se puede distinguir el botulismo de la intoxicación con organofosforados porque éste ocasiona midriasis.<sup>124</sup>

**Definitivo:** se obtiene mediante la detección de la toxina en sangre o tejidos. La sangre se debe tomar de aves enfermas o con poco tiempo de muertas porque la toxina se puede producir posteriormente en los cadáveres y el ejemplar pudo haber muerto por otra causa. En algunas aves el nivel de toxina en sangre es bajo e indetectable por lo que se recomienda tomar muestras de aves en distintos estadios de la enfermedad.<sup>38</sup>

El ensayo biológico en ratón es la prueba más empleada para el diagnóstico de botulismo; por ser la más sensible, aunque se pueden presentar falsos negativos. Consiste en centrifugar e inocular el suero sanguíneo (colectado por venopunción o del corazón de aves recién muertas) en dos grupos de ratones: uno al que se le ha administrado previamente la antitoxina específica y el otro sin protección. La prueba es positiva si el grupo protegido sobrevive y el otro manifiesta los signos típicos (parálisis de los miembros posteriores, contracción abdominal y disnea) y muerte.<sup>38</sup>

Se han empleado varios tipos de ELISA (ensayo inmunoabsorbente ligado a enzimas) con diferentes resultados. Su ventaja es que son económicos y no requieren el uso de animales de laboratorio, pero se necesita equipo especializado y las muestras de sangre o tejidos pueden producir reacciones inespecíficas. En una variante que ha sido exitosa usando sangre o suero, se emplean inmunomarcadores en el sustrato sólido.<sup>38</sup>

### *8.2.6 Tratamiento*

Cuando la intoxicación en las aves es leve, se les debe proveer agua, alimento, refugio y sombra. Si las aves tienen problemas para caminar o son incapaces de hacerlo, es necesario hidratarlas oralmente.<sup>38</sup>

La tasa de supervivencia de los patos tratados es del 75 al 90% aunque puede ser menor en otras aves.<sup>38</sup> Después de la recuperación las aves continúan siendo susceptibles, por lo que su liberación debe realizarse lejos del sitio del brote.

La vacunación es una medida que puede ayudar en la recuperación y supervivencia de las aves. Una inmunización puede proteger a los individuos contra exposiciones posteriores a partir de los 10 días de la aplicación.<sup>38</sup> En los casos moderados o graves la administración de la antitoxina mejora la tasa de supervivencia y al inicio de la enfermedad limita su progresión. Sin embargo, en los brotes severos el uso de estas medidas es impráctico debido a las dificultades logísticas y al costo.<sup>38</sup>

### *8.2.7 Control*

La remoción de los cadáveres para prevenir que las larvas se desarrollen y bioacumulen la toxina es la medida de manejo más recomendada y realizada durante los eventos de botulismo,<sup>38, 123</sup> y es clave para prevenir la difusión de los brotes;<sup>43, 120</sup> pero algunas veces realizarlo de manera efectiva puede ser sumamente complicado.<sup>38</sup> El efecto positivo que esto tiene se ha demostrado experimentalmente en varias ocasiones;<sup>38</sup> se ha visto que puede aumentar la supervivencia de aves en vida libre y puede ser más efectivo cuando la densidad de cadáveres es baja o moderada.<sup>121</sup> Permitir que animales carroñero ayuden a remover los cadáveres también puede ser de ayuda.<sup>43</sup>

Cuando los cuerpos de agua son muy extensos o tienen vegetación densa la proporción de cadáveres removidos es baja (1/3 o menos) y los cadáveres restantes pueden ser suficientes para que la toxina esté disponible para las aves a través de las larvas. Aunado a los costos elevados que implica, se cree que la remoción de cadáveres sólo es recomendable en los humedales pequeños (<400 ha)<sup>38, 123</sup> y se debe evaluar su factibilidad y la logística para lograr bajas densidades de cadáveres.<sup>121</sup> Con altas densidades de cadáveres es poco probable que la remoción disminuya el riesgo de mortalidad; por esto, lo más recomendable es mantener una vigilancia constante y realizar la remoción al inicio de los brotes.<sup>121</sup>

Otra estrategia consiste en drenar o inundar los cuerpos de agua propensos al botulismo, cuando es posible (principalmente al tratarse de humedales artificiales)<sup>38, 123</sup>. Esto puede ser previamente a la temporada crítica o posterior a un brote, con el fin de diluir la toxina y la materia orgánica; pero la eficacia de esta medida no ha sido evaluada.<sup>38</sup> Se debe considerar que al drenar un humedal, el agua somera restante



puede atraer a muchas aves que buscan alimento en esas condiciones.<sup>123</sup> Un brote fue abatido después de recolectar los cadáveres e inundar un cuerpo de agua drenando otros dos.<sup>123</sup>

También se ha intentado espantar a las aves de las fuentes de intoxicación para disminuir la cantidad de individuos afectados,<sup>43, 123</sup> pero al parecer no ha sido muy exitoso.<sup>38</sup>

Es necesario considerar que si un brote en particular se originó por alguna razón independiente al botulismo y la muerte inicial de organismos constituyó el medio de producción de la toxina por el ciclo cadáver-gusano, es preciso controlar también esa causa.<sup>120</sup>

#### *8.2.8 Prevención*

La prevención es una mejor estrategia que el control de la enfermedad, pero como la bacteria está ampliamente distribuida y produce esporas resistentes, sería muy difícil reducir su prevalencia. La vacunación es impráctica en las aves en vida libre pero se puede realizar en aves cautivas o en especies en peligro de extinción.<sup>38</sup>

El manejo de los humedales es una alternativa factible para la prevención del botulismo,<sup>38</sup> y se debe procurar por ejemplo, mantener niveles de agua constantes en los humedales.<sup>120</sup> Para evitar que exista una gran cantidad de materia orgánica para el desarrollo de la bacteria, se recomienda evitar la presencia de cadáveres de vertebrados,<sup>38</sup> la descarga de desechos orgánicos o desagüe, inundar áreas que han estado secas por mucho tiempo y desecar embalses.<sup>120</sup>

A pesar de que se tiene bastante información sobre la ecología del botulismo aviar, es necesario realizar investigaciones para entender mejor los factores que determinan la ocurrencia de los brotes y la eficacia de las medidas preventivas y correctivas.<sup>38</sup> El monitoreo constante de las precipitaciones anuales y las condiciones ambientales locales pueden ayudar a determinar el riesgo de presentación de los brotes.<sup>122</sup>

## 8.3 Intoxicación con Plomo

### 8.3.1 Agente

El plomo es un metal suave que se encuentra en muchos ambientes y su maleabilidad, bajo costo y facilidad de procesamiento, han permitido que se le den muchos usos.<sup>125</sup> Sin embargo, posee efectos tóxicos, incluso a concentraciones muy bajas, por lo que se ha prohibido o limitado su uso cada vez más en diversos productos.<sup>125</sup>

La intoxicación con plomo tiene lugar cuando este elemento se absorbe y alcanza niveles perjudiciales en el organismo,<sup>39</sup> causando principalmente anemia y parálisis.<sup>126</sup>

En las aves acuáticas los perdigones empleados en la cacería son la fuente más común de plomo, aunque también pueden ser los pesos o plomadas usados en la pesca, y menos comúnmente los desechos de minas, residuos de pinturas y otros objetos.<sup>39, 125, 127</sup> Los objetos de plomo se depositan en el fondo de los cuerpos de agua y las aves los ingieren al confundirlos con alimento o arena.<sup>125</sup>

Los objetos de plomo ingeridos se erosionan en la molleja por el ambiente ácido y los movimientos de molienda, lo cual vuelve soluble al plomo en forma iónica, permitiendo que se absorba y distribuya sistémicamente en los tejidos.<sup>125, 127</sup> La tasa de erosión es mayor inmediatamente después de la ingestión de los objetos, siendo del 20% en los primeros cuatro días.<sup>127</sup>

La intoxicación puede ser aguda o crónica. Cuando las aves ingieren  $\geq 10$  perdigones o una plomada de pesca, mueren a los pocos días, pero lo más común es que consuman una menor cantidad de plomo y la intoxicación sea crónica: las aves comienzan a mostrar los signos de intoxicación hasta una semana después y mueren entre dos y tres semanas.<sup>39, 125</sup> Una dosis baja de plomo puede ocasionar una intoxicación subletal afectando al sistema nervioso, riñones y sistema circulatorio y hematopoyético; lo cual aumenta el riesgo de inanición, depredación e infección.<sup>125</sup> La intoxicación con plomo tiene efectos inmunosupresores, lo que aumenta el riesgo de adquirir enfermedades infecciosas como el cólera aviar;<sup>36</sup> por ejemplo, se ha observado una menor producción de anticuerpos en patos de collar.<sup>126</sup>

### 8.3.2 Hospedero

**Especies susceptibles:** la intoxicación con plomo ha sido reportada en la mayoría de las aves acuáticas de Norteamérica, así como en otras aves.<sup>39</sup> Algunos ejemplos son el pato de collar (*Anas platyrhynchos*), pato golondrino (*Anas acuta*), pato cabeza roja (*Aythya americana*), pato boludo (*Aythya marila*), ganso canadiense (*Branta canadensis*), ganso nevado (*Chen caerulescens*) y el cisne de tundra (*Cygnus columbianus*).<sup>39</sup> De estos, los cisnes posiblemente sean más susceptibles en Norteamérica por sus hábitos alimenticios o porque hay más plomo disponible en sus hábitats.<sup>127</sup> Por otra parte, las especies menos reportadas son los mergos y los pijijes (patos silbadores).<sup>39</sup> Las aves rapaces también se pueden intoxicar al consumir el plomo de los tejidos de sus presas.<sup>39, 125</sup>

**Factores predisponentes:** debido a que se trata de una intoxicación crónica, los adultos tienen una mayor probabilidad de ser afectados que los juveniles.<sup>127</sup>

La dieta y los hábitos alimenticios de las aves son determinantes para la intoxicación con plomo: en teoría, si se alimentan filtrando el sedimento de los humedales tienen una mayor posibilidad de intoxicarse, y conforme consumen más peces el riesgo es menor; aunque también se ha reportado que los peces pueden consumir el plomo y ser un medio de intoxicación.<sup>39</sup> El maíz y otros granos intensifican la toxicidad del plomo, por lo que las aves que los consumen pueden estar en mayor riesgo.<sup>39</sup>

### 8.3.3 Ambiente

El plomo no permanece inerte en los humedales, las postas y otros objetos de plomo se degradan por oxidación y se unen a carbonatos y otros compuestos; pero es un proceso que dura décadas o cientos de años y los factores que lo determinan no se han esclarecido por completo.<sup>125</sup> Por lo tanto, la cuestión más determinante en cuanto al ambiente es determinar qué humedales tienen cantidades problemáticas de plomo. Esto es difícil de hacer con base en la observación de las aves afectadas porque pueden ingerir el plomo en un sitio, desplazarse y ser observadas con los signos en otro.<sup>39</sup> Entonces la investigación sobre los antecedentes y usos del humedal se vuelve fundamental.

#### 8.3.4 Epidemiología

**Estacionalidad:** la intoxicación con plomo puede ocurrir en cualquier momento del año pero se ha detectado una mayor incidencia después de las temporadas cacería, en Estados Unidos esto ocurre en enero y febrero.<sup>39</sup> En una investigación realizada en cisnes trompeteros (*Cygnus buccinator*) y de tundra (*Cygnus columbianus columbianus*) se reportó que la mortalidad inició a mediados de noviembre, tuvo un pico máximo en diciembre y terminó a mediados de febrero.<sup>127</sup>

**Recurrencia:** la intoxicación con plomo se presenta constantemente debido a que los perdigones se acumulan en el sedimento de los humedales y a pesar de que se restrinja o suspenda su uso, probablemente continúen siendo una amenaza para las aves acuáticas durante muchos años.<sup>39, 127</sup>

**Signos:** las aves afectadas presentan un vuelo débil, irregular, de corta distancia y acuatizan de manera errática. Cuando pierden la capacidad de volar se agregan y aíslan después de que las demás aves vuelan.<sup>39</sup> Al momento de intentar escapar caminan de manera inestable, al volar pueden tener la cabeza en una posición anormal (gansos canadienses) y las vocalizaciones pueden ser anormales.<sup>39, 44</sup> Conforme la intoxicación progresa, las alas les empiezan a colgar y se observa una secreción en el pico; es posible encontrar diarrea verdosa y acuosa en los sitios donde las aves han descansado y en las plumas cercanas a la cloaca.<sup>39, 44, 125, 127, 128</sup>

**Lesiones:** cuando la intoxicación es aguda es posible que no se encuentren cambios patológicos, los individuos tengan una buena condición corporal y la pérdida de peso no sea dramática.<sup>125</sup> Pero suele ser crónica por lo que los individuos afectados generalmente presentan emaciación.<sup>39, 42, 125, 127, 128</sup> La quilla es muy prominente, la grasa subcutánea y visceral es ausente o escasa y los músculos pectorales están atrofiados.<sup>39</sup> Se han encontrado que algunas aves intoxicadas con plomo tienen un peso significativamente menor que el aves no intoxicadas.<sup>127</sup>

Puede haber impactación del esófago, proventrículo o molleja, conteniendo sedimento y alimento.<sup>39, 42, 127, 128</sup> En un brote que afectó a cisnes, todos los individuos intoxicados, menos uno, presentaron impatación proventricular con material vegetal y arena.<sup>127</sup>

La vesícula biliar puede estar aumentada y llena de bilis, el contenido de la molleja y la cutícula gástrica, manchados de bilis y es posible encontrar materiales de plomo en la molleja o el proventrículo.<sup>39, 44 127, 128</sup> La cutícula gástrica puede estar hipertrofiada o agrietada.<sup>128</sup>

Otros cambios que se pueden apreciar incluyen la atrofia sutil de órganos internos como el hígado, riñones, y bazo; flacidez del corazón y palidez zonal en órganos y músculos.<sup>39, 127</sup> También puede encontrarse edema subcutáneo en la cabeza y cuello;<sup>44, 127, 128</sup> además de anemia.<sup>125</sup>

Microscópicamente se puede encontrar hemosiderosis hepática, degeneración de los túbulos renales o cuerpos de inclusión, necrosis del miocardio, necrosis fibrinoide en las arterias e hiperplasia eritriode.<sup>128</sup>

De los signos mencionados, los más indicativos de una intoxicación con plomo son la impactación del tracto gastrointestinal superior y el edema subcutáneo cefálico.<sup>128</sup>

En esta intoxicación se debe considerar que varios agentes que causan debilidad y baja condición corporal pueden presentarse simultáneamente (unos pueden favorecer la aparición de otros), y esclarecer cuál fue el primero en presentarse o el orden en el que se manifestaron puede resultar difícil.<sup>129</sup>

**Morbilidad y mortalidad:** es difícil saber exactamente cuál es el perjuicio de esta intoxicación en las poblaciones silvestres.<sup>39</sup> Sin embargo, estimaciones razonables en Estados Unidos, antes de la prohibición de los perdigones de plomo, señalan que del 2 a 3 % de la población continental de patos y gansos, es decir de 1 a 3 millones de aves, murieron anualmente por la ingestión de perdigones.<sup>125</sup> Así mismo, de una migración de 100 millones de aves, se perdieron en un año de 1.6 a 2.4 millones de individuos.<sup>39</sup> No obstante, es probable que existan subestimaciones debido a que en muchos sitios no se realizaron investigaciones.<sup>125</sup>

### 8.3.5 Diagnóstico

**Presuntivo:** los signos y lesiones pueden ser por otras causas y no se suelen apreciar en aves que murieron por una intoxicación aguda.<sup>39</sup> La presencia de postas de plomo en la molleja puede ser muy sugerente pero no puede ser un elemento determinante.<sup>39</sup>

**Diferenciales:** los diagnósticos diferenciales deben incluir enfermedades que causen signos semejantes, como otras intoxicaciones. Pero lo más común es que las aves envenenadas con plomo sean confundidas con aves heridas por disparos, por la forma del vuelo y porque son observadas durante la temporada de cacería.<sup>39</sup>

**Definitivo:** los estudios toxicológicos se realizan a partir de muestras de hígado o riñones, por lo que estos órganos deben colectarse enteros y enviarse en congelación al laboratorio.<sup>39</sup> Encontrar valores mayores a 6-8 ppm en base húmeda, o a 18-30 ppm en base seca, de muestras de hígado, es muy sugerente de la intoxicación.<sup>39, 42, 126</sup> En gansos nevados, por ejemplo, se encontraron concentraciones en base seca de <1 a 253 ppm en hígado y de <1 a 547 ppm en riñón y se considero que a partir de 30 ppm se presentaba la intoxicación aguda.<sup>126</sup>

En un estudio, la intoxicación clínica se diagnosticó a partir de concentraciones en base seca de plomo en hígado  $\geq 20$  mg/kg y la intoxicación subclínica, en las aves con 8 - 19.9 mg/kg; cuando no se pudo analizar la cantidad de plomo, se consideraron positivas las aves que tenían  $\geq 10$  perdigones en el tracto digestivo y los signos característicos.<sup>127</sup> En una mortandad de flamencos se encontraron en las mollejas entre 5 y 158 perdigones y la concentración de plomo en el hígado fue entre 128 y 771 ppm en base seca.<sup>44</sup>

El nivel de plomo en aves silvestres también puede ser evaluado a partir de muestras de sangre (mínimo 2 a 5 ml colectados en tubos con anticoagulante y libres de plomo).<sup>39</sup>

No se cuenta con una concentración estándar para el diagnóstico de la intoxicación con plomo en aves acuáticas, sino que se basa en estudios anteriores.<sup>126</sup> Pero hay que considerar que al medir la concentración de este metal en base húmeda, puede haber grandes variaciones (hasta de 75% de error) por la variación en la humedad de los tejidos; por lo tanto se prefiere usar la medición en base seca y establecer un umbral entre 20 y 30 ppm en base seca puede ser más válido.<sup>126</sup>

Es necesario considerar que de esta manera se confirma el envenenamiento por plomo, mas no se establece que haya sido la causa de muerte; por lo tanto el diagnóstico definitivo debe ser integral, basado en los signos, lesiones, hallazgos toxicológicos y observaciones de campo.<sup>39</sup> Se ha sugerido que sin contar con evidencia patológica, una concentración de plomo >10 ppm en base húmeda confirma el diagnóstico.<sup>128</sup>

### *8.3.6 Tratamiento*

El tratamiento de las aves silvestres que sufren envenenamiento por plomo no se considera práctico y se justifica sólo en el caso de especies en peligro de extinción. No obstante, el resultado es impredecible y tasa de éxito es baja.<sup>39</sup>

### *8.3.7 Control*

Para reducir la cantidad de individuos afectados por la intoxicación con plomo, es necesario impedir el acceso de las aves al humedal contaminado, pero es complicado definir estos humedales debido al tiempo entre la ingestión del metal y la presentación de signos y mortandad.<sup>39</sup> También se puede modificar el ambiente para disminuir la exposición de las aves; por ejemplo, aumentando el nivel del agua para que los patos de superficie no alcancen la fuente de plomo en el sedimento; no obstante, hay que considerar que esto puede atraer a patos buceadores que se sumergen más profundamente.<sup>39</sup> De manera semejante, drenar un cuerpo de agua evitaría que algunas especies dejaran de visitarlo, pero podría atraer aves playeras que se alimentan en el fango.<sup>39</sup>

Otra alternativa que se ha probando es labrar el sustrato de los humedales para enterrar el plomo y deje de estar disponible para las aves. Adicionalmente, se deben eliminar adecuadamente los cadáveres para evitar que los carroñeros se intoxiquen a su vez.<sup>39</sup>

### 8.3.8 Prevención

Debido a que es impráctico recuperar del ambiente los perdigones o las plomadas, para resolver esta problemática a largo plazo, es preciso eliminar las fuentes de intoxicación y la opción más razonable es el uso de metales o materiales menos tóxicos, que además ya se encuentran comercialmente disponibles, como los perdigones de acero o bismuto.<sup>39, 125</sup> El uso de materiales alternativos incrementa sólo ligeramente el costo de los perdigones.<sup>125</sup> En el caso de las plomadas, adicionalmente se puede reglamentar el tamaño para que no sean ingeridas por las aves estableciendo un tamaño mínimo.<sup>39, 125</sup> En los lugares donde estas medidas se han llevado a cabo, se ha observado una disminución significativa en las mortandades por la intoxicación con plomo.<sup>39, 125</sup>

En México se estableció el uso de perdigones no tóxicos para la cacería de aves acuáticas en Yucatán, posteriormente a una mortalidad de flamencos en 1989.<sup>125</sup> No obstante, lo más indicado es la prohibición del uso de plomo en perdigones y plomadas de manera general, debido a que si realiza en los lugares en los que se han detectado concentraciones elevadas de este metal, se requerirían muchos estudios de campo, lo cual resultaría costoso, y sería complicado emprender la vigilancia local; además de que conforme se realicen la investigaciones, aumentarían las zonas de prohibición.<sup>125</sup>