ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

PARQUE EÓLICO VIENTO PACÍFICO VERDE

ANEXO 9.1 PLAN DE VIGILANCIA AMBIENTAL PARA AVES

Región del Maule

2026

TABLA DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN 3
2 OBJETIVOS 5
2.1 Objetivo general 5
2.2 Objetivos especificos 5
3 ALCANCE Y ÁREA DE APLICACIÓN 5
3.1 Grupos faunísticos considerados 5
3.2 Área de vigilancia para avifauna en vuelo 6
4 MARCO METODOLOGICO Y REFERENCIAS 7
5 PLAN DE VIGILANCIA PARA AVES 8
5.1 Definiciones y alcances 8
5.1.1 Especies prioritarias de aves para vigilancia 8
5.1.2 Criterio de priorización de vulnerabilidad espacial (IVE) 8
5.1.3 Aerogeneradores priorizados para Aves 13
5.1.4 Aplicación práctica 13
5.2 Vigilancia durante la fase de operación 14
5.2.1 Objetivos especificos 14
5.2.2 Actividades 14
5.2.3 Frecuencia 15
5.2.4 Indicadores 16
6 INDICADORES DE COLISIÓN: DEFINICIÓN TÉCNICA Y SUSTENTO 19
6.1 Justificación del enfoque 19
6.2 Indicadores principales 19
6.3 Análisis estadístico y reportabilidad de los indicadores 20
7 UMBRALES DE ACCIÓN Y RESPUESTA DE GESTIÓN ADAPTATIVA 20
8 GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN Y REPORTABILIDAD 21
9 GESTIÓN ADAPTATIVA 22
10 MATRIZ DE VIGILANCIA AMBIENTAL 22
11 BIBLIOGRAFÍA 24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Guías y criterios del Servicio de Evaluación Ambiental aplicables al Plan de Vigilancia Ambiental para Aves 3

Tabla 5-1. Especies prioritarias para el Plan de Vigilancia Ambiental. 8

Tabla 5-2. IVE por punto de muestreo 9

Tabla 5-3. Aerogeneradores priorizados para vigilancia ambiental intensificada en Aves. 13

Tabla 5-4 - Indicadores cuantitativos de vigilancia ambiental para aves – fase de operación 16

Tabla 7-1. Umbrales de acción y respuesta de gestión adaptativa. 20

Tabla 10-1. Matriz integrada de vigilancia ambiental para aves 23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Área de vigilancia para avifauna en vuelo 7

Figura 5-1. Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE) en el área del proyecto 10

Figura 5-2. Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE) en el área del proyecto – Sector La Flora 11

Figura 5-3. Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE) en el área del proyecto – Sector Pahuil 12

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 9.1.1 KMZ y SHP Área de vigilancia para avifauna en vuelo

1 INTRODUCCIÓN

El presente Programa de Vigilancia Ambiental para Aves forma parte integrante del Plan de Manejo Biológico del Proyecto Parque Eólico Viento Pacífico Verde, y será implementado durante la fase de puesta en marcha del Proyecto, previo al inicio de la operación del Proyecto, con el objeto de verificar y evaluar en forma sistemática los potenciales impactos asociados a la interacción de la infraestructura eólica con la fauna aérea, así como la efectividad de las medidas preventivas y de mitigación comprometidas.

Este programa ha sido diseñado en coherencia con los siguientes documentos:

- Capítulo 9 del EIA — Plan de Medidas de Mitigación, Reparación y Compensación (MRC), que define las medidas MM1 (Programa de gestión adaptativa y verificación de eficacia de medidas en Aves) y MM2 (Sistema anticolisión por monitorización y parada automática para aves);
- Anexo 8.3 del EIA — Estudio de Tránsito Aéreo y Análisis de Riesgo para Avifauna, que aporta la línea base cuantitativa, los Índices de Sensibilidad para Aves (RSI) y de Vulnerabilidad Espacial (IVE), y la priorización de aerogeneradores;
- Guía sectorial específica (SAG): Guía para la Evaluación del Impacto Ambiental de Proyectos Eólicos y de Líneas de Transmisión Eléctrica en Aves Silvestres y Murciélagos (SAG, 2015, 1ª edición).
- Guías y criterios del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) aplicables al presente Plan: los documentos vigentes del SEA que orientan la elaboración, ejecución y reporte de este Plan de Vigilancia Ambiental se sintetizan en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Guías y criterios del Servicio de Evaluación Ambiental aplicables al Plan de Vigilancia Ambiental para Aves

Documento	Edición	Fecha de Publicación
Criterio de Evaluación en el SEIA: Aves y Quirópteros en Proyectos de Líneas de Transmisión Eléctrica y Parques Eólicos	1ª ed., 2026	30/01/2026
Guía Metodológica para la Descripción de Ecosistemas Terrestres	1ª ed., 2025	01/08/2025
Guía para la Predicción y Evaluación de Impactos sobre Ecosistemas Terrestres	1ª ed., 2025	01/08/2025
Guía Áreas de Influencia en Ecosistemas Terrestres	1ª ed., 2024	20/11/2024
Criterio de Evaluación en el SEIA: Metodologías para la Consideración de los Impactos Acumulativos y Sinérgicos	1ª ed., 2024	22/11/2024
Guía Metodológica para la Consideración del Cambio Climático en el SEIA	1ª ed., 2024	08/11/2024
Criterio de Evaluación en el SEIA: Uso de Normas de Referencia	1ª ed., 2024	30/12/2024

Fuente: Centro de Documentación (SEA, s.f.).

El PVA se enmarca en un esquema de gestión adaptativa: los indicadores y umbrales de acción definidos en este documento se revisarán anualmente sobre la base de la evidencia recogida en terreno, los registros operacionales del SCADA, los hallazgos de las búsquedas sistemáticas de mortalidad y la literatura científica más reciente.

En este contexto, el PVA considera los siguientes componentes:

- Vigilancia en todo el parque con la búsqueda sistemática de individuos colisionados de aves bajo aerogeneradores durante toda la fase de operación. (Monitoreos cada 15 días durante el primer año y visitas mensuales en año 2 y 3 y trimestral o semestral en años posteriores (ajustable bajo gestión adaptativa). Esto se realizará priorizando en aquellos aerogeneradores con mayor Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE) moderado o cercano a moderado, conforme al Anexo 8.3 del EIA.
- Verificación operacional del sistema anticolisión por cámaras e inteligencia artificial (MM2) en aerogeneradores priorizados.
- Definición de indicadores cuantitativos con fórmulas estandarizadas y umbrales de activación de gestión adaptativa, alineados con los compromisos definidos en el Capítulo 9 del EIA.
- Reporte periódico a las autoridades sectoriales competentes (SAG, SMA) en los plazos establecidos.

A continuación, se desarrolla el Programa de Vigilancia Ambiental, detallando sus objetivos, alcances, metodologías, indicadores, umbrales de acción y mecanismos de reporte, en concordancia con la normativa ambiental vigente y los lineamientos técnicos del Servicio de Evaluación Ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un Programa de Vigilancia Ambiental (PVA) orientado a verificar, prevenir y gestionar impactos sobre aves, en específico el impacto FTV-OP-02 del Capítulo 8 del EIA, asociado a la operación del Parque Eólico Viento Pacífico Verde.

El presente PVA pone énfasis en:

- Aerogeneradores con mayor Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE) para la avifauna.
- Especies con alto Índice de Sensibilidad Relativa (RSI) para la avifauna
- Períodos biológicos críticos

El programa permitirá detectar tempranamente impactos no previstos sobre avifauna en vuelo, evaluar la efectividad de las medidas comprometidas y activar la gestión adaptativa de esto.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Verificar la efectividad de las medidas de mitigación MM1 y MM2 comprometidas en el Capítulo 9 del EIA.
- Detectar oportunamente eventos de colisión asociados a aerogeneradores o infraestructura del Proyecto.
- Caracterizar la ocurrencia de eventos de colisión y estimar tendencias de mortalidad asociadas a la operación del parque, aplicando correcciones a los sesgos conocidos.
- Evaluar patrones de actividad, tránsito aéreo y uso del espacio aéreo de aves, validando o ajustando la priorización por IVE realizada en el Anexo 8.3 del EIA.
- Generar información técnica que permita ajustar dinámicamente los parámetros operacionales del sistema IA-cámaras, asociado a la medida MM2, bajo el enfoque de gestión adaptativa.
- Asegurar el cumplimiento normativo y la trazabilidad documental y técnica de los compromisos ambientales del Proyecto.

3 ALCANCE Y ÁREA DE APLICACIÓN

3.1 GRUPOS FAUNÍSTICOS CONSIDERADOS

Se consideran aves terrestres, acuáticas y marino-costeras, incluyendo especies residentes y migratorias, registradas en terreno o potenciales, identificadas en el Apéndice 8.3.1 del EIA, con especial atención a las 31 especies en categoría de conservación con potencial presencia en el área

del proyecto, incluyendo a las 14 registradas en las campañas realizadas a la fecha. Las especies son:

- Vulnerable (VU): chorlo nevado *(Charadrius nivosus)* y gaviota garuma *(Leucophaeus modestus)* se encuentran amenazadas.
- Casi Amenazadas (NT): flamenco chileno (*Phoenicopterus chilensis*), pilpilén común (*Haemaptopus palliatus*), gaviotín monja (*Larosterna inca*), gaviotín elegante (*Thalasseus elegans*), chorlo de collar (*Charadrius chollaris*), Guanay (*Phalacrocorax bouganvillii*), Lile (*Phalacrocorax gaimardi*), Pelícano (*Pelecanus thagus*), Cóndor (*Vultur gryphus*), Chorlo de campo (*Oreopholus ruficollis*), Concón (*Strix rufipes*) y cuervo de pantano (*Plegadis chihi*).
- Preocupación menor (LC): perdiz chilena (*Nothoprocta perdicaria*), pato gargantillo (*Anas bahamensis*), cisne coscoroba (*Coscoroba coscoroba*), cisne cuello negro *(Cygnus melanchorhypus)*, pato rinconero (*Heteronetta atricapilla*), pato cuchara (*Spatula platalea*), Piquero (*Sula variegata*), garza cuca (*Ardea cocoi*), Bandurria (*Theristicus melanopis*), Peuquito (*Accipiter chilensis*), el halcón peregrino (*Falco peregrinus*), gaviota de Franklin (*Larus pipixcan*), becacina (*Gallinago magellanica*), zarapito (*Numenius phaeopus*), pitotoy chico (*Tringa flavipes*), perdicita (*Thinocorus rumicivorus*), y torcaza (*Patagioenas araucana*).

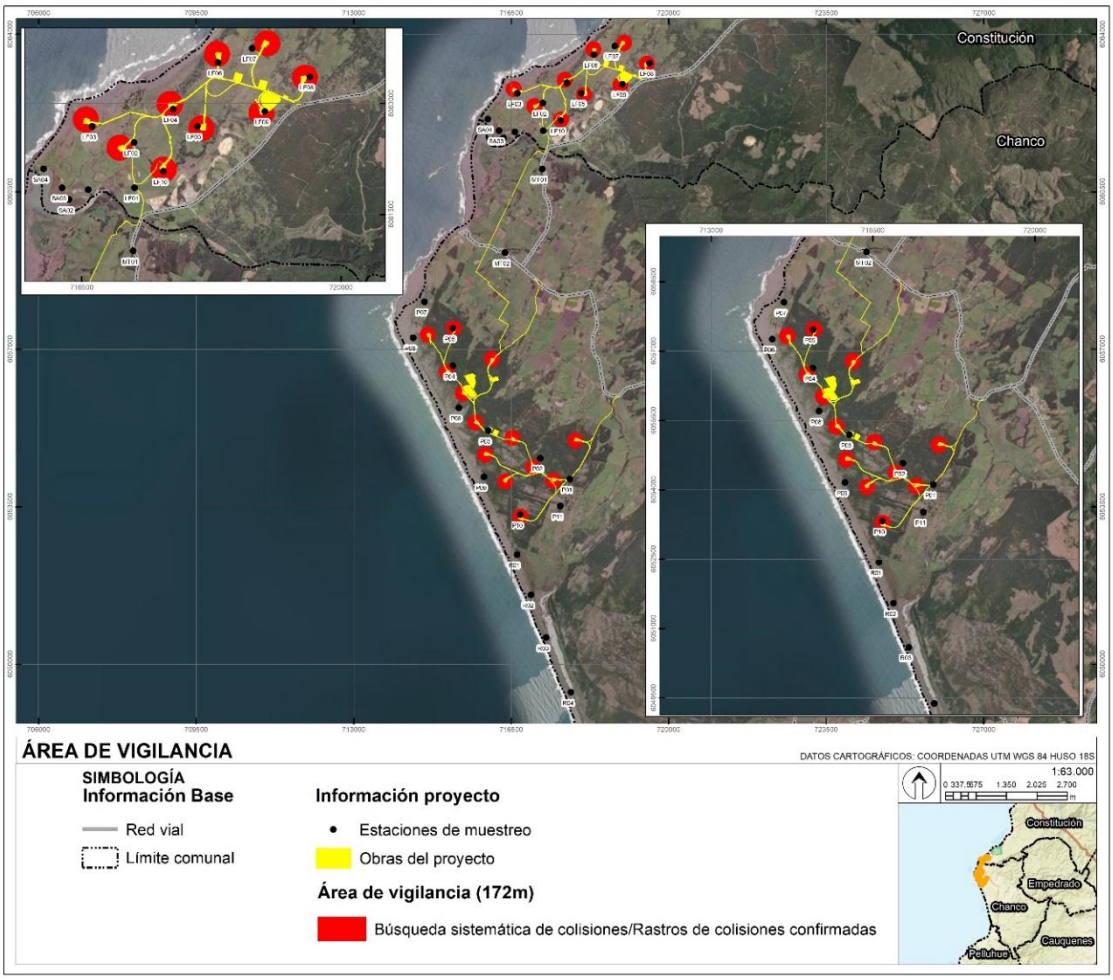
3.2 ÁREA DE VIGILANCIA PARA AVIFAUNA EN VUELO

El área de vigilancia tiene cobertura completa de los 22 aerogeneradores del parque, con esfuerzo de muestreo intensificado en los aerogeneradores priorizados por mapa de índice de vulnerabilidad espacial (IVE) para aves.

Se define a partir de la plataforma de cada aerogenerador y su entorno inmediato, abarcando un radio de búsqueda de rastros asociados a eventos de colisión de aves, incluidos restos o evidencias indirectas, desde el aerogenerador y equivalente al doble de la longitud de la pala (172 m), ajustable según resultados de los ensayos de distancia de caída para el modelo específico del aerogenerador instalado.

Además, se considera la vigilancia complementaria de las estaciones de observación utilizadas en el Anexo 8.3 (LF, P, SA, R, MT), para hacer un análisis comparativo pre-construcción/post-construcción.

Figura 3-1. Área de vigilancia para avifauna en vuelo



Fuente: Foco Ambiental, 2026.

4 MARCO METODOLOGICO Y REFERENCIAS

La metodología del PVA se sustenta en los siguientes referentes técnicos y normativos:

- Normativa nacional: Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, modificada por Ley 20.417; Reglamento del SEIA (D.S. 40/2012 MMA); Guía SAG (2015) para proyectos eólicos y líneas de transmisión en aves silvestres y murciélagos; Guías SEA 2022, 2023, 2024a, 2024b, 2025 y 2026.
- Estimadores de mortalidad: Huso (2010); Korner-Nievergelt *et al*. (2011, 2015); Bernardino *et al*. (2013); Dalthorp *et al*. (2018) — software GenEst del USGS, hoy estándar internacional para corrección estadística de los conteos de cadáveres.
- Índices de riesgo: Noguera *et al*. (2010) — base metodológica del RSI e IVE; GIZ-Myotis Chile (2025) — adaptación al contexto nacional, ya aplicada en el Anexo 8.3.

- Directrices europeas: Atienza *et al*. (2011) — SEO/BirdLife Directrices para evaluación del impacto de parques eólicos en aves y murciélagos.

5 PLAN DE VIGILANCIA PARA AVES

5.1 DEFINICIONES Y ALCANCES

5.1.1 Especies prioritarias de aves para vigilancia

Este plan de vigilancia considera a las 31 especies en categoría de conservación con presencia potencial en el área del proyecto; sin prejuicio de lo anterior, cabe señalar que la medida de mitigación MM2 requiere concentrar los esfuerzos en determinadas especies prioritarias, bajo criterios de presencia registrada en el área del proyecto, mayor RSI y encontrarse en alguna de las categorías de conservación amenazadas, es decir, Vulnerable (VU) o Casi Amenazada (NT), según se presentan en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Especies prioritarias para el Plan de Vigilancia Ambiental.

Nombre común	Nombre científico	RSI	Categoría conservación
Pilpilén común	*Haematopus palliatus*	10,83	NT
Cuervo de pantano	*Plegadis chihi*	8,00	NT
Gaviota garuma	*Leucophaeus modestus*	6,42	**VU**
Pelícano	*Pelecanus thagus*	8,25	NT
Gaviotín monja	*Larosterna inca*	5,33	NT

Fuente: Foco Ambiental, 2026, a partir del Anexo 8.3 del EIA.

5.1.2 Criterio de priorización de vulnerabilidad espacial (IVE)

De acuerdo con los resultados del Estudio de Tránsito Aéreo del EIA, la jerarquización de la vulnerabilidad se establece a partir del Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE), calculado por punto de muestreo (Tabla 5-2), interpolado en el área de estudio (Figura 5-1), y clasificado en tres categorías mediante percentiles:

- IVE Bajo: ≤ 31,71 (P50). Color verde en el mapa de calor (ver Figura 5-1). Predomina en plantaciones forestales del sector sur (Pahuil) así como en algunas zonas de pradera, donde la actividad de vuelo es menor. En esta zonificación se emplazan 4 de los 9 aerogeneradores de Estancia La Flora, y los 13 aerogeneradores del sector Pahuil.
- IVE Moderado: 31,71 < IVE < 54,26 (P50–P75). Color amarillo, se observa en las zonas de transición entre los niveles Bajo y Alto de vulnerabilidad espacial.
- IVE Alto: ≥ 54,26 (P75). Color rojo. se concentra principalmente en la zona de los humedales río Pinotalca y río Reloca, donde la frecuencia de especies sensibles es máxima. Si bien no se encuentra ningún aerogenerador en estas zonas, 1 de los 9 aerogeneradores de Estancia La Flora se emplaza en zona moderada, pero cercano a una de estas zonas.

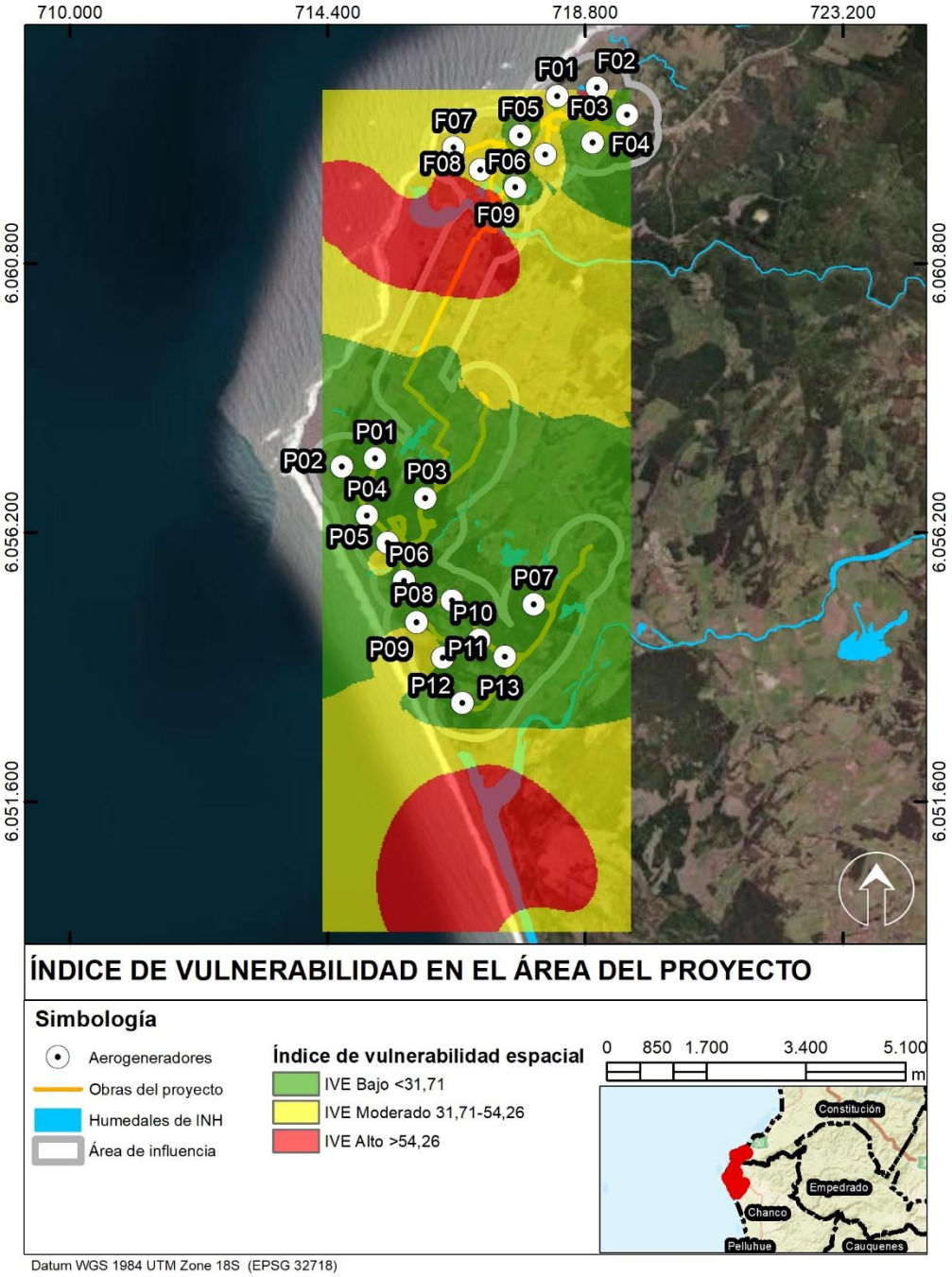
El índice de vulnerabilidad espacial depende también de la sensibilidad intrínseca de las especies registradas en cada punto de muestreo, reflejadas en el valor RSI. El Anexo 8.3 identifica al pilpilén común (*Haematopus palliatus*) con RSI 10,83 y al cisne de cuello negro (*Cygnus melancoryphus*) con RSI 9,33 como las especies de mayor sensibilidad biológica. Adicionalmente, la gaviota dominicana (*Larus dominicanus*, RSI 8,67) y la gaviota cáhuil (*Chroicocephalus maculipennis*, RSI 8,00) registran vuelos a la altura de barrido del rotor, concentrando un riesgo operacional relevante.

Tabla 5-2. IVE por punto de muestreo

Punto de Muestreo	IVE (Suma Parcial)
SA2	110,21
R2	97,71
R3	80,83
SA1	77,85
SA3	75,82
LF1	66,25
LF7	60,72
MT1	58,20
R4	50,31
R1	50,12
P9	47,47
LF5	46,06
LF2	37,42
P8	36,17
SA4	33,56
P11	31,71
LF6	30,77
MT2	30,34
LF3	29,73
LF4	20,87
LF8	16,36
P2	9,52
P3	9,02
P7	8,33
P4	8,32
LF10	4,16
P6	0,00
P5	0,00
P1	0,00
LF9	0,00
P10	0,00

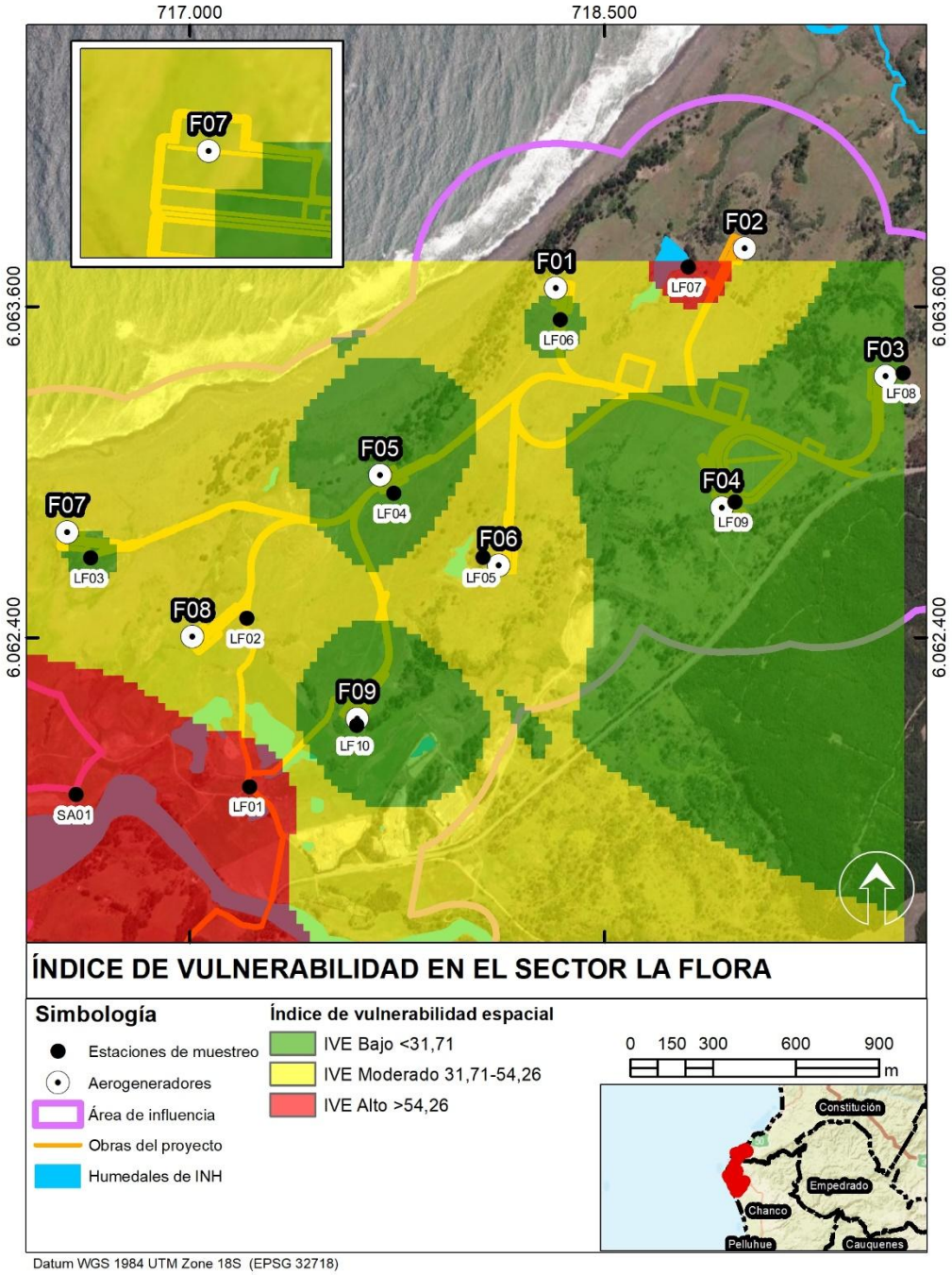
Fuente: Tabla 5-11 del Anexo 8.3 del EIA.

Figura 5-1. Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE) en el área del proyecto



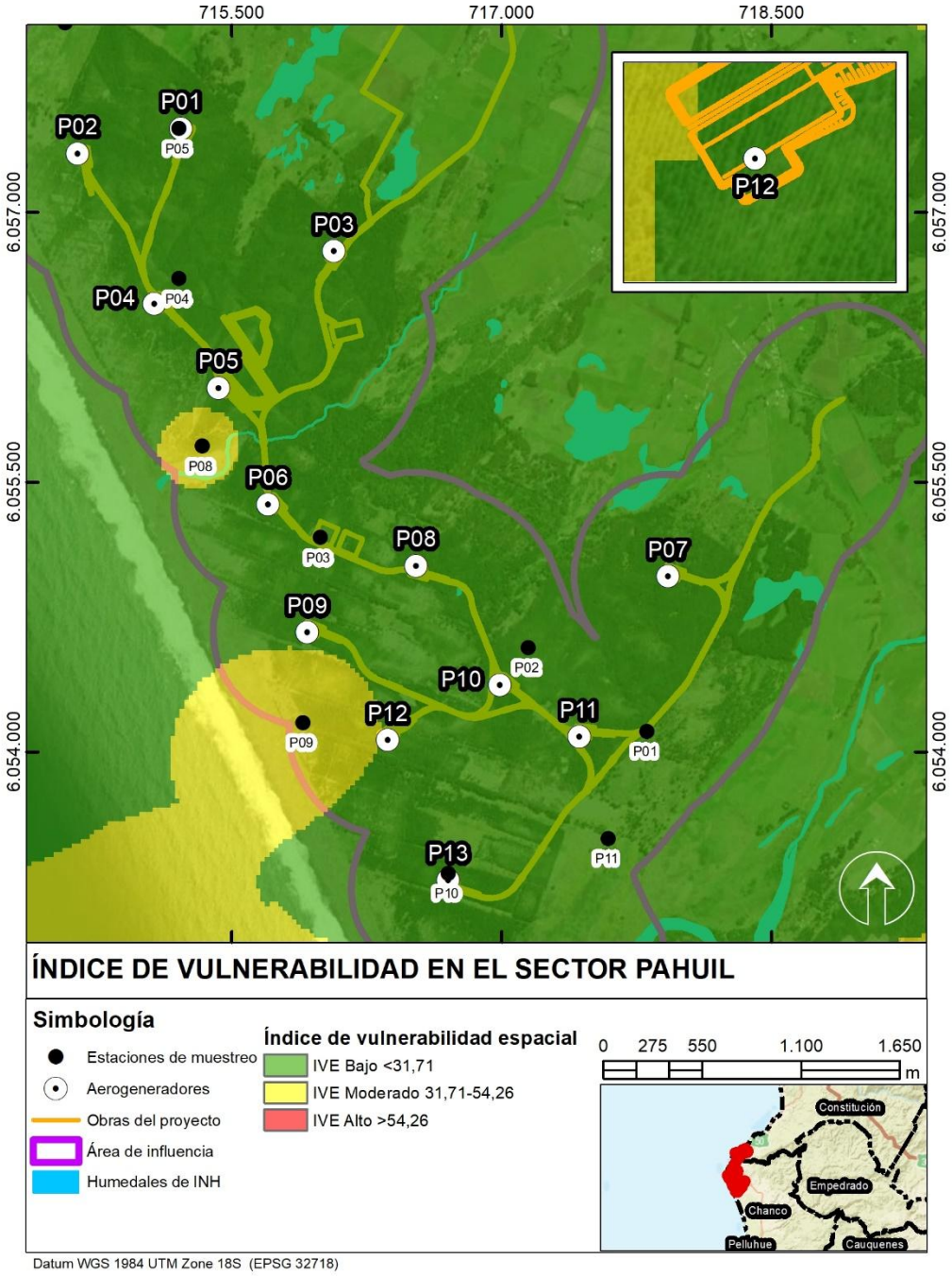
Fuente: Anexo 8.3 “Estudio de tránsito aéreo” del EIA.

Figura 5-2. Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE) en el área del proyecto – Sector La Flora



Fuente: Anexo 8.3 “Estudio de tránsito aéreo” del EIA.

Figura 5-3. Índice de Vulnerabilidad Espacial (IVE) en el área del proyecto – Sector Pahuil



Fuente: Anexo 8.3 “Estudio de tránsito aéreo” del EIA.

5.1.3 Aerogeneradores priorizados para Aves

El emplazamiento de los 22 aerogeneradores fue validado mediante el mapa interpolado de IVE (Figura 5-1). Del análisis se concluye:

- 16 aerogeneradores (72,7%) se localizan en zona de IVE Bajo, representando la vulnerabilidad al riesgo más bajo de la jerarquía calculada para el tránsito aéreo de aves del proyecto.
- 5 aerogeneradores (F01, F02, F06, F07 y F08, en sector Estancia La Flora) se localizan en zona de IVE Moderado.
- 1 aerogenerador (P12, en sector Pahuil) se localiza en zona de IVE Bajo, pero limítrofe con zona moderada.
- Ningún aerogenerador se emplaza en zona de IVE Alto. Los puntos de muestreo LF1 (IVE 66,25) y LF7 (IVE 60,72) — clasificados como Alto dentro del polígono — quedaron fuera del emplazamiento de turbinas. No obstante, F02 se ubica cercano a LF7, por lo que constituye la estructura de mayor potencial de riesgo dentro del Proyecto.

Estos 6 aerogeneradores (27,3% del total) serán las partes y obras sobre las que mantendrá un esfuerzo intensificado del PVA, sin perjuicio del monitoreo en los aerogeneradores restantes.

Tabla 5-3. Aerogeneradores priorizados para vigilancia ambiental intensificada en Aves.

Aerogenerador	Sector	Justificación
F01	Estancia La Flora	Emplazamiento en zona de Vulnerabilidad Espacial moderada.
F02	Estancia La Flora	Emplazamiento en zona de Vulnerabilidad Espacial moderada, limitando con zona alta.
F06	Estancia La Flora	Emplazamiento en zona de Vulnerabilidad Espacial moderada.
F07	Estancia La Flora	Emplazamiento en zona de Vulnerabilidad Espacial moderada.
F08	Estancia La Flora	Emplazamiento en zona de Vulnerabilidad Espacial moderada.
P12	Pahuil	Emplazamiento en zona de vulnerabilidad baja con cercanía a zona moderada del Mapa de vulnerabilidad

Fuente: Foco Ambiental, 2026, a partir del Anexo 8.3 del EIA y Capítulo 9 del EIA.

5.1.4 Aplicación práctica

El PVA para aves se aplicará bajo un esquema de esfuerzo de muestreo diferenciado:

- 100% de los aerogeneradores del parque, con búsqueda sistemática de mortalidad.

- Esfuerzo intensificado en los aerogeneradores F01, F02, F06, F07, F08 y P12, conforme a la priorización del Anexo 8.3 (mayor frecuencia de búsqueda y verificación adicional del sistema IA-cámaras de la medida MM2).
- Cobertura total temporal: toda la fase de operación, con esfuerzo intensivo durante el primer año, se efectuarán campañas bimensuales de búsqueda de carcasas considerando primavera, verano, otoño e invierno después de este primer año la búsqueda se realizará mensualmente en los años dos y tres. Con una reducción progresiva en años subsiguientes según gestión adaptativa.

5.2 VIGILANCIA DURANTE LA FASE DE OPERACIÓN

5.2.1 Objetivos específicos

- Detectar y cuantificar eventos de colisión de aves con aerogeneradores.
- Verificar la efectividad operacional y biológica del sistema anticolisión MM2 (cámaras + inteligencia artificial + parada automática) en los aerogeneradores priorizados.
- Validar empíricamente la priorización por IVE establecida en el Anexo 8.3, contrastando los eventos observados con la jerarquización pre-construcción.
- Generar evidencia técnica para activar gestión adaptativa cuando se sobrepasen los umbrales de acción definidos en el presente Plan.

5.2.2 Actividades

5.2.2.1 Búsqueda sistemática de colisiones o rastros de colisiones confirmadas

Sigue las recomendaciones de SAG (2015), Atienza *et al*. (2011) y los protocolos de Huso (2010) y Korner-Nievergelt *et al*. (2011, 2015):

- Radio de búsqueda mínimo de 84 m (longitud de pala) alrededor de cada aerogenerador, ajustado según ensayos sitio-específicos de distancia de caída.
- Patrón de búsqueda en transectos paralelos separados por 5 m, modificable según vegetación.
- Registro completo por evento: especie (incluyendo determinación taxonómica con material gráfico de respaldo), sexo y edad cuando sea posible, condición del cadáver, ubicación georreferenciada (precisión ≤ 3 m), distancia y azimut respecto del eje del aerogenerador, fecha estimada de muerte.
- Aplicación de factores de corrección obtenidos en terreno: ensayos de eficiencia de búsqueda con cebos (mínimo 30 cebos/temporada/observador) y ensayos de persistencia de cadáveres (mínimo 30 cadáveres-prueba/temporada por clase de tamaño). Cabe

destacar que estas actividades no se realizarán en las áreas directas del aerogenerador para no atraer aves de carroña y aumentar los riesgos de colisión.

5.2.2.2 Monitoreo de la operación del sistema anticolisión MM2

En los aerogeneradores priorizados (F01, F02, F06, F07, F08 y P12) se realizará:

- Auditoría mensual de los registros de detección, alerta y comando de parada/ralentización del SCADA.
- Verificación de la disponibilidad operativa del sistema (% horas operación efectiva).
- Verificación de la eficacia de detección con vuelos prueba calibrados (drones o cebos visuales) al menos dos veces al año.
- Análisis del tiempo de respuesta detección-activación SCADA.

5.2.2.3 Análisis de tránsito aéreo post-construcción

Réplica de las estaciones de observación del Anexo 8.3 (puntos de muestreo LF, P, SA, R, MT) durante el primer año de operación, con el mismo esfuerzo (4 campañas estacionales, 16 horas por punto), para:

- Comparación de la Tasa de Vuelos por Hora (V/h) y la altura de vuelo respecto de la línea base.
- Recálculo del IVE post-construcción y validación de la priorización original.
- Análisis de eventual efecto barrera o desplazamiento de rutas de vuelo.

5.2.3 Frecuencia

- Búsqueda sistemática de mortalidad: Bimensual durante el primer año de operación; mensual en los años 2 y 3; trimestral o semestral en adelante, ajustable bajo gestión adaptativa.
- Esfuerzo intensificado en aerogeneradores priorizados (F01, F02, F06, F07, F08, P12): quincenal durante el primer año.
- Monitoreo del sistema MM2: auditoría mensual de registros operacionales; vuelos de prueba calibrados semestrales.
- Análisis de tránsito aéreo: 4 campañas estacionales el primer año; reevaluación anual conforme a hallazgos.
- Reporte ante eventos críticos (mortalidad VU o NT ≥2 individuos cada 3 años): plazo máximo de 15 días hábiles ante SAG y SMA, conforme a MM2.

5.2.4 Indicadores

Los indicadores de la fase de operación se desarrollan en detalle en la sección 6 del presente Plan, resumidos en la Tabla 5-4:

Tabla 5-4 - Indicadores cuantitativos de vigilancia ambiental para aves – fase de operación

Indicador	Definición / Ecuación	Umbral / Referencia
Hallazgo de carcasas o rastros de colisión	Número de cadáveres o rastros compatibles con colisión detectados durante las búsquedas sistemáticas realizadas en terreno, con identificación taxonómica y georreferenciación. Corresponde a un indicador operacional directo, sin aplicación de factores de corrección estadística.	**Especies VU** (gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*) VU≤2 cadáveres confirmados por colisión cada 3 años. **Especies NT** (pilpilén común, pelícano, cuervo de pantano, gaviotín monja) NT≤ 5 cadáveres de la misma especie confirmado por colisión cada 3 años. **Especies LC** y no clasificadas: sin umbral específico, con registro y reporte anual. Se acciona protocolo de registro, verificación taxonómica, descarte de otras causas. Notificación y trazabilidad, Revisión focalizada de parámetros en sistemas: revisión logs MM2, revisión funcionamiento sistema general, verificación funcionamiento cámaras, verificación SCADA, clima y otras variantes disponibles.
Tasa de mortalidad anual ajustada por aerogenerador (M̂)	$\hat{M} = \frac{C}{g \cdot p \cdot s \cdot t}$ Donde:	La tasa de mortalidad anual ajustada (M̂) será evaluada considerando los compromisos ambientales del proyecto, la

Indicador	Definición / Ecuación	Umbral / Referencia
	• C: cadáveres encontrados en el año • g: eficiencia de búsqueda (ensayos con cebos) • p: probabilidad de persistencia (carroñeros) • s: fracción de cadáveres dentro del área buscada (corrección por densidad) • t: corrección por intervalo entre búsquedas Estimación con software GenEst (Dalthorp *et al.*, 2018) o estimador Korner-Nievergelt *et al*. (2011).	tendencia temporal observada y la comparación con antecedentes reportados para parques eólicos de características ecológicas y operacionales similares, utilizando como referencia valores obtenidos mediante metodologías equivalentes de corrección de detectabilidad y persistencia de cadáveres.
Tasa de mortalidad por MW instalado	$\widehat{M}_{MW} = \frac{\widehat{M}}{Potencia_{AG}}$ Donde $\widehat{M}_{MW}$ corresponde a la mortalidad anual ajustada por aerogenerador, estimada mediante GenEst o estimador equivalente, incorporando eficiencia de búsqueda, persistencia de cadáveres, fracción de área prospectada e intervalo entre búsquedas.	El resultado será utilizado como indicador de comparabilidad con parques eólicos de referencia, expresado en ind/MW/año. La tasa será contrastada con antecedentes nacionales e internacionales obtenidos mediante metodologías equivalentes de estimación ajustada. Como referencia general, el Estudio de Significancia SEA-GIZ (2025) reporta una media de 0,29 muertes/turbina/año, con alta variabilidad entre proyectos; por ello, dicho valor se considera referencial y no un umbral absoluto de cumplimiento.
Eficiencia operativa del sistema anticolisión (MM2)	$Disp_{op} = \frac{horas_{op}}{horas_{total}} \times 100\%$ $Disp_{op}$: Disponibilidad operativa	Disponibilidad operativa ≥ 95% (descontando mantenimiento)

Indicador	Definición / Ecuación	Umbral / Referencia
	$horas_{op}$: horas de operación efectiva	
	Eficacia de detección verificada en terreno (vuelos prueba con drones o cebos visuales)	Detección ≥ 75% a 300 m y ≥ 85% a 150 m
	Tiempo de respuesta detección–activación SCADA	Tiempo de respuesta ≤ 10 s
Concordancia IVE–mortalidad observada	Análisis estadístico de correlación entre IVE pre-construcción y eventos de mortalidad observados, por punto de muestreo cercano.	Permite validar el diseño del Plan y reasignar prioridad de monitoreo si la correlación no se confirma.
Distribución temporal de eventos	Frecuencia mensual y estacional de eventos. Análisis específico de otoño (mayor V/h registrada en Anexo 8.3) y temporadas de migración.	Si >50% de eventos se concentran en una temporada → ajustar frecuencia de búsqueda y considerar diseño de parada estacional programada (MM2).

Fuente: Foco Ambiental 2026, con base en SAG (2015), Huso (2010), Korner-Nievergelt *et al*. (2011), Dalthorp *et al*. (2018), Atienza *et al*. (2011), y compromisos del Capítulo 9 del EIA (MM2).

6 INDICADORES DE COLISIÓN: DEFINICIÓN TÉCNICA Y SUSTENTO

6.1 JUSTIFICACIÓN DEL ENFOQUE

La cuantificación directa de cadáveres en torno a aerogeneradores subestima sistemáticamente la mortalidad real, debido a tres fuentes de sesgo bien documentadas en la literatura científica internacional (Huso, 2010; Korner-Nievergelt *et al*., 2011; Bernardino *et al*., 2013; Dalthorp *et al*., 2018):

i) **Detección imperfecta del observador (g)**: no todos los cadáveres dentro del área buscada son encontrados; depende de la cobertura vegetal, el tamaño del cuerpo y la experiencia del personal.

ii) **Persistencia limitada del cadáver (p)**: una fracción es removida por carroñeros o se descompone entre búsquedas consecutivas; varía con la temporada, el clima y la presencia de carroñeros.

iii) **Cadáveres fuera del área buscada (s)**: una fracción cae más allá del radio efectivamente cubierto, en especial en aerogeneradores grandes; depende del modelo de turbina y de la masa corporal del individuo.

Por lo anterior, los indicadores de colisión del PVA se definen sobre la base de estimadores estadísticos validados, que aplican factores de corrección cuantificados empíricamente en terreno. La fórmula general aplicada es:

$$\hat{M} = \frac{C}{g \cdot p \cdot s \cdot t}$$

Donde C es el número de cadáveres encontrados en el período de análisis; g es la eficiencia de búsqueda; p es la probabilidad de persistencia del cadáver entre búsquedas; s es la fracción de cadáveres que caen dentro del área buscada; y t es un factor de corrección por intervalo temporal entre búsquedas.

Para la implementación práctica se recomienda el uso del software GenEst (Generalized Mortality Estimator) del USGS — Dalthorp *et al*. (2018) —, que integra los cuatro factores y permite estimación con intervalos de confianza, o alternativamente el método de Korner-Nievergelt *et al*. (2011, 2015) para estudios con escaso número de cadáveres.

6.2 INDICADORES PRINCIPALES

Los indicadores cuantitativos para avifauna fueron presentados en la sección 6 del presente documento. Los umbrales utilizados se sustentan en:

- Compromisos del Capítulo 9 del EIA (MM2): ≤ 2 mortalidades cada 3 años por colisión de la especie clasificada Vulnerable (gaviota garuma, *Leucophaeus modestus*) y ≤ 5 de cada una de las especies clasificadas NT (pilpilén común, pelícano, cuervo de pantano, gaviotín monja).

- Indicadores operacionales del sistema MM2: disponibilidad operativa ≥ 95% del tiempo de operación efectiva; eficacia de detección ≥ 75% a 300 m y ≥ 85% a 150 m; tiempo de respuesta detección-activación SCADA ≤ 10 segundos. Estos valores corresponden a la ficha técnica del sistema y a los compromisos asumidos en el Capítulo 9.
- En Chile, los antecedentes actualmente disponibles presentan heterogeneidad metodológica y limitada comparabilidad entre proyectos, por lo que no existe aún un benchmark nacional estandarizado de mortalidad ajustada expresada en muertes/turbina/año.

6.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y REPORTABILIDAD DE LOS INDICADORES

Cada estimación de mortalidad ajustada será reportada junto con su intervalo de confianza del 95%, como medida de la incertidumbre asociada al proceso de estimación, utilizando las herramientas estadísticas incorporadas en el software de análisis empleado (por ejemplo, GenEst).

- Se reportan los valores brutos (cadáveres encontrados) en paralelo a los valores corregidos, para mantener trazabilidad y comparabilidad con otros estudios.
- Los factores de corrección g, p y s se reestiman al menos una vez por semestre durante el primer año, y al menos una vez al año en adelante.
- En caso de registrarse mortalidad de especies en categoría de conservación, se evaluará la relevancia ecológica de los eventos considerando antecedentes poblacionales disponibles, sensibilidad de la especie y magnitud relativa de la mortalidad observada, conforme a los lineamientos de evaluación de fauna del SAG (2015).

7 UMBRALES DE ACCIÓN Y RESPUESTA DE GESTIÓN ADAPTATIVA

La Tabla 7-1 establece los umbrales de acción que activan respuestas correctivas específicas, en concordancia con las medidas del Capítulo 9 del EIA y la literatura técnica de referencia.

Tabla 7-1. Umbrales de acción y respuesta de gestión adaptativa.

Indicador	Umbral de acción	Medida correctiva (gestión adaptativa)
Mortalidad confirmada de gaviota garuma (Leucophaeus modestus, VU) en monitoreo de mortalidad por colisiones	≥ 2 evento cada 3 años en cualquier AG	Activación inmediata de gestión adaptativa: notificación a SAG y SMA en 15 días hábiles; ampliación buffer de detección por especie; calibración SCADA en AG priorizados.
Mortalidad de especies NT (pilpilén común, pelícano, cuervo de pantano, gaviotín monja) en monitoreo de mortalidad por colisiones	≥ 5 eventos para la misma especie cada 3 años en cualquier aerogenerador	Revisión del algoritmo del sistema IA-cámaras; aumento de frecuencia de búsqueda en AG afectado; análisis específico de causa-raíz.

Indicador	Umbral de acción	Medida correctiva (gestión adaptativa)
M̂ total (todas las especies)	Tendencia sostenida de mortalidad ajustada ≥ 4 ind/AG/año durante dos años consecutivos, estimada mediante metodologías de corrección reconocidas (ej. GenEst o equivalente).	Análisis de impacto poblacional; reforzamiento de medidas; evaluación de medidas adicionales (deflectores, marcas visuales en aspas).
Disponibilidad operativa MM2	< 95% mensual, descontando períodos programados de mantención o calibración	Ejecución de mantenimiento correctivo; revisión técnica de causas y trazabilidad operacional; evaluación de medidas de mejora y registro en los informes periódicos del Plan de Vigilancia Ambiental.
Uso de infraestructura como refugio o sitio de nidificación	Cualquier evento confirmado	Sellado inmediato de oquedades; reinspección a 30 días; protocolo específico si se trata de especie protegida.

Fuente: Foco Ambiental, 2026, con base en compromisos del Capítulo 9 del EIA (MM2), SAG (2015) y Atienza *et al*. (2011).

La activación de cualquier umbral genera, según corresponda:

- Notificación a SAG y SMA en el plazo de 15 días hábiles desde la detección, conforme a la medida MM2.
- Análisis de causa-raíz del evento, con respaldo técnico y científico.
- Implementación de las medidas correctivas indicadas, con bitácora documental de la implementación.
- Reevaluación del PVA en sus secciones afectadas (frecuencia, indicadores, umbrales).
- Reporte específico al órgano fiscalizador en el siguiente informe periódico.

8 GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN Y REPORTABILIDAD

El sistema de información del PVA se estructura en los siguientes niveles:

- Reportes inmediatos: ante eventos críticos (mortalidad VU, superación de umbrales operacionales, hallazgos no previstos), notificación a SAG y SMA en plazo no superior a 15 días hábiles.

- Informes trimestrales: durante el primer año de operación. Contienen los resultados de las búsquedas sistemáticas, los registros de mortalidad con identificación taxonómica, la operación del sistema MM2, los indicadores cuantitativos calculados y las eventuales medidas correctivas implementadas.
- Informes anuales: a partir del segundo año. Incluyen análisis estadístico completo (tasas corregidas con IC 95%), análisis de tendencias temporales y espaciales, evaluación de la efectividad de las medidas, y propuestas de ajuste bajo gestión adaptativa para el ciclo siguiente.
- Bases de datos: todos los registros se almacenan en una base de datos georreferenciada con identificadores únicos por evento, con respaldo en la nube y respaldo institucional.
- Documentación de respaldo: actas de terreno, fotografía digital, registros SCADA, protocolos de búsqueda, certificados de calibración de equipos.
- Trazabilidad: toda modificación de protocolos, umbrales o configuraciones operacionales bajo gestión adaptativa queda registrada con justificación científica, fecha de aprobación e identificación del responsable.

9 GESTIÓN ADAPTATIVA

El PVA opera bajo un esquema de gestión adaptativa, entendido como un proceso iterativo de aprendizaje basado en la evidencia que permite ajustar las medidas y los protocolos de monitoreo para optimizar la protección de la biodiversidad. Los resultados del PVA se utilizan específicamente para:

- Ajustar la frecuencia y metodología del monitoreo, manteniendo o intensificando el esfuerzo en los aerogeneradores donde se evidencien eventos.
- Recalibrar los algoritmos de detección y los buffers del sistema IA-cámaras (MM2) por especie y por aerogenerador.
- Reforzar o complementar las medidas comprometidas (por ejemplo, evaluar dispositivos disuasivos visuales adicionales para aves, paradas estacionales programadas, modificación del calendario de mantenimiento).
- Validar o ajustar la priorización por IVE conforme a los datos de mortalidad observada en operación.
- Proponer medidas adicionales si se identifican impactos no previstos o especies no previstas

La revisión integral del PVA se efectuará anualmente y será incorporada al proceso de mejora continua del sistema de gestión ambiental del Proyecto. Toda modificación significativa será informada a la autoridad ambiental competente con respaldo técnico.

10 MATRIZ DE VIGILANCIA AMBIENTAL

La Tabla 12-1 sintetiza el conjunto del programa de vigilancia, en formato matricial.

Tabla 10-1. Matriz integrada de vigilancia ambiental para aves

IMPACTO A VIGILAR	MEDIDA ASOCIADA	VARIABLE/INDICADOR	MÉTODO	FRECUENCIA	RESPONSABLE
Colisión con aerogeneradores (FTV-OP-02)	MM1 MM2	M̃ por AG; M̃ por especie VU/NT; eficacia detección sistema IA-cámaras	Búsqueda sistemática de cadáveres + revisión registros SCADA y vídeo	Bimensual año 1; mensual años 2–3; trimestral o semestral en adelante ajustables bajo gestión adaptativa	Especialista avifauna
Tránsito aéreo y uso del espacio	MM1	V/h; altura de vuelo; dirección; correlación con IVE	Estaciones de observación réplica de las del Anexo 8.3	Estacional (4 campañas/año, año 1)	Especialista avifauna
Cumplimiento operacional sistemas anticolisión	MM2	Disponibilidad operativa ≥95% (MM2); tiempo respuesta ≤10 s; logs SCADA	Auditoría de registros operacionales y mantenimiento	Trimestral año 1; semestral en adelante	Coordinador ambiental + Operación

Fuente: Foco Ambiental, 2026, con base en el Capítulo 9 del EIA y el Anexo 8.3 del EIA.

11 BIBLIOGRAFÍA

Atienza, J.C., Martín Fierro, I., Infante, O., Valls, J. & Domínguez, J. (2011). Directrices para la evaluación del impacto de los parques eólicos en aves y murciélagos (versión 3.0). SEO/BirdLife, Madrid.

Bernardino, J., Bispo, R., Costa, H. & Mascarenhas, M. (2013). Estimating bird and bat fatality at wind farms: a practical overview of estimators, their assumptions and limitations. New Zealand Journal of Zoology, 40(1), 63–74.

Dalthorp, D., Simonis, J., Madsen, L., Huso, M.M., Rabie, P., Mintz, J.M., Wolpert, R., Studyvin, J. & Korner-Nievergelt, F. (2018). GenEst statistical models—A generalized estimator of mortality. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 7, chap. A2, 13 p.

GIZ / Ministerio de Energía / SEA / MMA. 2025. Estudio identificación de criterios para la evaluación de impacto ambiental de proyectos eólicos y de transmisión eléctrica sobre aves y murciélagos.

Huso, M.M.P. (2010). An estimator of wildlife fatality from observed carcasses. Environmetrics, 22(3), 318–329.

IFC. 2023. Post-construction Bird and Bat Fatality Monitoring for Onshore Wind Energy Facilities.

Korner-Nievergelt, F., Korner-Nievergelt, P., Behr, O., Niermann, I., Brinkmann, R. & Hellriegel, B. (2011). A new method to determine bird and bat fatality at wind energy turbines from carcass searches. Wildlife Biology, 17(4), 350–363.

Korner-Nievergelt, F., Behr, O., Brinkmann, R., Etterson, M.A., Huso, M.M.P., Dalthorp, D., Korner-Nievergelt, P., Roth, T. & Niermann, I. (2015). Mortality estimation from carcass searches using the R-package carcass — a tutorial. Wildlife Biology, 21(1), 30–43.

Noguera, J.C., Pérez, I. & Mínguez, E. (2010). Impact of terrestrial wind farms on diurnal raptors: developing a spatial vulnerability index and potential vulnerability maps. Ardeola, 57(1), 41–53.

Ministerio de Energía de Chile. 2024. Cielo Seguro. Buenas prácticas para el resguardo de aves en el sector energía.

Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) (2015). Guía para la Evaluación del Impacto Ambiental de Proyectos Eólicos y de Líneas de Transmisión Eléctrica en Aves Silvestres y Murciélagos. Primera edición. Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). (sin fecha). Centro de Documentación, https://www.sea.gob.cl/documentacion/guias-y-criterios Consultado por última vez el 15 de mayo de 2026.