

PROYECTO FIP N° 2014-77

“MANEJO E INTERPRETACION DE IMÁGENES SATELITALES DE ALTA RESOLUCION APLICADAS A LAS LABORES DE EXPLORACION DEL BORDE COSTERO Y CUERPOS DE AGUA DONDE SE DESARROLLE LA ACTIVIDAD DE ACUICULTURA (FASE II)”

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el borde costero acotado a las Áreas Apropriadas para el ejercicio de la Acuicultura en base a imágenes satelitales, que permitan identificar estructuras de cultivo de salmones y determinar parámetros ambientales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1. Asesorar en la selección de tipos de imágenes satelitales aplicado a los intereses de la acuicultura orientada a la identificación de estructuras de cultivo como también de análisis y estudios ambientales tales como batimetría, concentración de clorofila y temperatura superficial del mar, etc.*
- 2. Identificar sitios aptos para la acuicultura, capacidades de carga e impactos ambientales con el uso de imágenes satelitales.*
- 3. Instalar las capacidades técnicas en los profesionales que serán los responsables de administrar y procesar la información proveniente de imágenes satelitales.*

RESUMEN

En primer lugar, se obtuvieron de SUBPESCA los Barrios de interés en formato *.KMZ, correspondientes a 14 sectores de la Xa región de Los Lagos y XIa región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Este archivo *.kmz fue convertido a formato shape (.shp) en el software ArcGis 10.2. Además, se obtuvo de SUBPESCA el shape de las concesiones de

salmones de las dos regiones. Una vez conocidas las zonas se procedió a adquirir las imágenes considerando los polígonos de los barrios de interés, aquellas imágenes de fecha más actual y que contengan una baja (< 5%) cobertura de nubes. Se seleccionaron y adquirieron 3 imágenes Landsat 8 OLI/TIRS que abarcan las zonas de interés y que fueron captadas el 18 de junio de 2014 y 21 enero de 2015. Las imágenes (pancromático y multiespectral) en formato *.TIF fueron importadas al software ENVI y georreferenciadas de UTM 18N a UTM Zona 18S que es el sistema de referencia de la base cartográfica de la División de Acuicultura.

Se generaron productos de imágenes satelitales y mapas temáticos de acuerdo a necesidades existentes en la División de Acuicultura, en especial y prioritariamente se desarrolló un producto para la identificación de estructuras de acuicultura (balsas jaulas, línea de cultivo, pontones, muelles, etc.). Una vez importadas y georreferenciadas las imágenes Landsat 8 OLI/TIRS en ENVI se aplicó una transformación de las imágenes con una fusión o image pan-sharpening entre las imágenes multiespectrales y las pancromáticas. Se aplicó el modelo Gram-Schmidt Spectral Sharpening y el método de Low Resolution Pan llamado "Average of Low Resolution Multispectral File" con un método de remuestreo (resampling) del tipo Bilineal.

Las imágenes multiespectrales pan-sharpening generadas fueron desplegadas en ENVI como Color Natural (Banda azul (0,45 – 0,51 μm)) para R (canal rojo), Band 2 (Banda verde (0,53 – 0,59 μm)) para G (canal verde) y Band 3 (Banda roja (0,64 – 0,67 μm)) para B (canal azul), y se aplicaron diversos realces y contrastes de la imagen con el fin de poder tener el mejor producto para discriminar las estructuras de acuicultura, líneas de costa y otros patrones de interés. Cada imagen multiespectral pan-sharpening generadas y desplegadas como composición de Color Natural con realces fueron recortadas (Clip Raster) por Barrio de interés y guardadas en formato GeoTIF (*.TIF). Para la identificación de estructuras de acuicultura se elaboraron mapas temáticos en ArcGIS 10.2 para cada uno de los Barrios de interés. Para identificar las diversas estructuras de acuicultura basta con un análisis visual de las imágenes pan-sharpening de los Barrios de interés, ya sea directo en pantalla con el programa ENVI o imprimiendo los mapas temáticos, y esto sumado al juicio experto de los profesionales. Se realiza un análisis visual detallado de la superposición del polígono de concesiones sobre las

imágenes multiespectrales pan-sharp, obteniéndose tablas de datos por barrio con los siguientes campos: barrio, número de la concesión, número de estructuras de cultivo, dimensiones (m*m) del área de estructura, tipo de estructura (balsa jaula cuadrada o balsa jaula circular), tamaño jaula (m), configuración número de jaulas* número de jaulas, estructura posicionada dentro o fuera de concesión y observaciones. En total se identificaron 222 estructuras de cultivo en los 16 barrios (2, 3a, 3b, 4a, 6, 8, 9a, 9b, 9c, 10a, 10b, 17a, 17b, 25a, 25b y 27). Como síntesis de resultados sobre el número de estructuras de cultivo por barrio se obtiene que el Barrio 2 es el que tiene más estructuras de cultivo con un total de 41, mientras que el Barrio 25b es el que menos tiene con sólo una estructura de cultivo.

Se estimaron parámetros ambientales de las imágenes Landsat 8 OLI/TIRS usando el software ENVI, para ello se desarrollaron las siguientes etapas de procesamiento: calibración a radianza espectral, corrección atmosférica y cálculo de reflectancia espectral con el módulo FLAASH de ENVI, generación de batimetría de Landsat8, estimación de la temperatura superficial de brillo y absoluta y estimación de la concentración de clorofila Landsat 8 OLI/TIRS.

En la etapa de levantamiento de información para la generación de bases de datos de indicadores ecosistémicos necesarios para la identificación de sitios aptos para la acuicultura, se adquirieron y procesaron imágenes multiespectrales de sensores MODIS y VIIRS diarias del año 2012 con una resolución espacial de 1 km. En total se adquirieron y procesaron 148 imágenes diarias MODIS y 165 VIIRS. Con estas imágenes diarias se hacen composiciones mensuales y luego promedios estacionales de la temperatura superficial del mar (TSM), concentración de clorofila-*a* (C_{loa}), carbono orgánico particulado y carbono inorgánico particulado durante verano, otoño, invierno y primavera de 2012 generadas con datos del sensor MODIS y VIIRS. Adicionalmente, se usan imágenes de materia total particulada (mg/L) durante verano, otoño, invierno y primavera de 2011 generada con datos del sensor MERIS. Con Spatial Analyst de ArcGIS 10 se realiza una comparación entre la información de clorofila satelital MODIS y VIIRS con datos de muestreos *in situ*, con el objetivo de validar la información satelital. Para ello se cuenta con los datos de clorofila *in situ* integrada a 0-10 y 10-20 metros de profundidad proveniente de 88 estaciones de muestreo oceanográfico, todas pertenecientes al Programa de Manejo y Monitoreo de las Mareas Rojas que ejecuta el

Instituto de Fomento Pesquero y administra la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Se valida la información satelital mediante un ajuste lineal en un gráfico de dispersión, obteniéndose como resultado que la mejor relación es entre la clorofila satelital y la clorofila a 0-10 m, obteniéndose un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,79$ para un N igual a 66 observaciones.

Las imágenes fueron procesadas y se generaron archivo resultantes del Gram-Schmidt Spectral Sharpening con extensión *.TIF, los cuales fueron entregados en un DVD junto al primer informe de avance del proyecto. Adicionalmente, se almacenan y entregan a SUBPESCA adjunto al presente Informe Final las imágenes satelitales en una Geodatabase (GDB) de archivo de ArcGIS 10 donde están las imágenes pan-sharp como raster dataset de los distintos Barrios en estudio y variables ambientales como batimetría, clorofila y temperatura superficial del mar. Se estructura y genera la Geodatabase de archivo **Imag-fip2014-77.gdb** donde se almacenan como raster dataset las diversas imágenes y productos satelitales. Los raster dataset de los Barrios (por ejemplo barrio2_pansharp) se visualizan en ArcGIS del modo RGB donde la Banda 1 es Red (R), Banda 2 es Green (G) y Banda 3 es Blue (B). Para visualizar de forma correcta la batimetría Chiloé GEBCO08 (batim_chiloe_gebco08), batimetría absoluta LANDSAT8 (LC82330902013358LGN00_reflect_bathy_absolute_calib), clorofila LANDSAT8 (LC82330902013358LGN00_ratio_clorofila) y temperatura superficial del mar LANDSAT8 se deben cargar respectivamente las simbologías batimetría-gebco.lyr, batim-landsat.lyr, clorofila.lyr y temperatura.lyr. Cabe destacar que se entrega a Subpesca la Geodatabase y la carpeta con las simbologías.

Se adquirieron 2 licencias flotantes del software ENVI 5.1 para interpretación y procesamiento digitales de imágenes satelitales para la gestión territorial de la acuicultura y de estudios medio ambientales. El software fue adquirido el 17 de abril de 2015 y éste fue entregado a la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (Piso 21 oficina FIP) el 21 de abril.

Se identificaron sitios aptos para la acuicultura monoespecífica (cultivo de ostra japonesa) y multitrófica (cultivo de salmón atlántico + ostra japonesa), capacidades de carga e impactos

ambientales con el uso de imágenes satelitales y de otras fuentes de información siguiendo la metodología desarrollada por Silva et al. (2011 y 2012a). En primer lugar, se desarrolló el levantamiento de información de los indicadores ecosistémicos (TSM, Cloa, carbono orgánico particulado y carbono inorgánico particulado) determinados de imágenes satelitales y complementados con la información de batimetría satelital GEBCO08, salinidad del modelo hidrodinámico HYCOM, oxígeno disuelto del World Ocean Atlas 2013 y Silva (2013 y 2014) y magnitud de corrientes ($m s^{-1}$) obtenidas del modelo hidrodinámico HYCOM. Se generó una Tabla resumen con las características (fuentes datos, rango de valores de datos, metodo muestreo, criterio, Rango Aptitud por Factor [RAF], valor del RAF y fuente del RAF) de los datos de indicadores ecosistémicos usados como entrada para el modelo de selección de sitios de cultivo. En el modelo multivariado para la selección de sitios aptos en primer lugar se estimó la aptitud para el cultivo de ostra japonesa aplicando una evaluación de multicriterios. Se generó un diagrama que resume el enfoque de evaluación multicriterios (MCE) y los resultados obtenidos como mapas de aptitud de acuerdo a criterios de: a) zonas aptas por ley; b) áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos; c) aptitud física; y d) crecimiento y sobrevivencia; y e) mapa de aptitud final derivado de la evaluación multicriterios. Como resultado se obtiene que las áreas aptas cubren parte de los Barrios 2 (Seno Reloncaví), 3b (Estero Huito, Isla Puluqui), 4a (Río Maullín), 6 (Bahía Manao y Bahía Hueihue), 8 (Islas Chauques), 9b (Isla Meulín, Isla Querac, Isla Caguache), 9c (Isla Alao, Isla Apiao, Isla Chaulinec), 10b (Canal Lemuy), 17a (Estero Comau) y 17b (Isla Pelada, Isla Llancahue).

Para la selección de sitios, los diez barrios (2, 3b, 4a, 6, 8, 9b, 9c, 10b, 17a y 17b) que contienen áreas aptas se utilizaron en un análisis detallado de la producción, salidas socio-económicas y efectos ambientales aplicando el modelo de capacidad de carga FARM. Utilizando la imagen de áreas aptas de barrios y mediante procesos de superposición con ArcGIS se extraen los valores ambientales (temperatura, salinidad, clorofila *a*, carbono orgánico particulado, material particulado total y oxígeno disuelto) de las imágenes de la base datos espacio-temporal de indicadores ecosistémicos. En cada uno de los 10 barrios se selecciona un sitio apto para modelar la capacidad de carga bajo dos escenarios: cultivo mono-específico (ostra japonesa) y multitrofico (salmón atlántico + ostra japonesa). Con el fin de hacer un estudio comparativo, en cada sitio apto por barrio se utiliza el mismo diseño de

concesión, estructuras de cultivo y parámetros de cultivo de ostra japonesa, esto es: densidad de semilla estándar de 100 ind m⁻², superficie o área de concesión test (prueba) de 10 ha (500 m * 200 m), peso de semilla de 1,2 g, precio de semilla de 1.000 \$ kg⁻¹ (www.cultimar.cl), peso de cosecha de 90 g, mortalidad natural de 35 % año⁻¹, precio venta de 2.500 \$ kg⁻¹. Se usa un período estándar de 395 días de cultivo para ver el efecto de las variables ambientales en la producción del cultivo. Para el escenario de acuicultura multitrófica integrada (AMTI) se usa el mismo diseño de concesión, estructuras de cultivo y parámetros de cultivo de ostra japonesa, y para salmón atlántico se usa una cantidad de alimento por salmón por día de 25 gr/pez/día, porcentaje de pérdida de alimento de 10 %/día, número de jaulas de 15 y una densidad de 1.000 peces por jaula.

Respecto a los resultados de la modelación de la capacidad de carga, se observa una alta variabilidad espacial en el crecimiento alcanzado por las ostras, destacándose los altos valores (> 8 cm) alcanzados en los sitios aptos de los barrios 2, 4a, 8 y 17a, mientras que en los barrios 9c, 10b y 9b se simulan bajos tamaños individuales (< 5 cm). Bajo un escenario AMTI se observa un aumento y favorecimiento en el crecimiento de las ostras en todos los barrios debido al aporte de nutrientes orgánicos desde el cultivo de salmones, destacándose el alto crecimiento obtenido en el barrio 2 con 12,3 cm y por el contrario se simula un bajo tamaño en el barrio 9c con 3,6 cm de longitud alcanzada. Se observa una alta variabilidad espacial en la producción o producto físico total de los sitios aptos de cultivo de ostra por barrio, destacándose los altos valores (> 500 ton) alcanzados en los sitios aptos de los barrios 2 y 4a, mientras que en los barrios 9c, 10b y 9b y debido a que no se alcanza el tamaño de cosecha se simulan producciones nulas. Bajo un escenario de acuicultura multitrófica (salmón atlántico + ostra japonesa) AMTI se observa un aumento y favorecimiento en la producción del cultivo de ostras en todos los barrios debido al aporte de nutrientes orgánicos desde el cultivo de salmones, destacándose el alto crecimiento obtenido en el barrio 2 con 633,9 ton y por el contrario se simula una producción nula en los barrios 9c y 10b. Desde el punto de vista del análisis socio-económico, el sitio del barrio 2 obtiene el mayor beneficio de la cosecha con alrededor de 2.206.500 US\$. A esta densidad el PFM = 28,8, lo que indica que la biomasa cosechable ha terminado 29x la biomasa de la semilla. En un escenario de cultivo multitrófico AMTI los beneficios aumentan a 2.432.500 US\$ y el PFM a 31,7.

Respecto al impacto ambiental de los cultivos de ostra japonesa y como ejemplo, podemos afirmar que la sedimentación en el sitio del Barrio 2 del Seno Reloncaví a las densidades de stock simuladas darían lugar a una deposición bruta de alrededor de $0,18 \text{ kg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ de carbono orgánico particulado y una tasa de acumulación de sedimentos equivalente de $0,18 \text{ mm y}^{-1}$. La tasa efectiva de enriquecimiento orgánico del sedimento debido al cultivo es un valor bajo de aproximadamente 1,1%, teniendo en cuenta que no hay factores de mitigación. En un escenario de cultivo multitrófico se observa un aumento en la deposición bruta a $3,24 \text{ kg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ de carbono orgánico particulado, en la acumulación de sedimentos a $3,28 \text{ mm y}^{-1}$ lo que se traduce en una tasa de enriquecimiento orgánico del sedimento de 4,5%.

Los resultados de la aplicación del modelo ASSETS implementado en FARM proporcionan un indicador de la eutrofización a escala local para los sitios potenciales de cultivo de ostras. El valor del indicador de la eutrofización muestra una variabilidad espacial en los centros de cultivo de ostras y AMTI en los barrios de interés, alcanzando valores de calidad de agua buena (3b, 9c, 10b, 17a y 17b), moderada (2, 4a y 8) y pobre (6 y 9b). Cabe señalar, que para todos los sitios evaluados con distintos estados de la calidad del agua entrante, y a la densidad de cultivo (100 ind m^{-2}) utilizada no hay un efecto positivo (reducción clorofila) sobre la calidad del agua en el flujo de salida.

Con el objeto instalar las capacidades técnicas en los profesionales que serán los responsables de administrar y procesar la información proveniente de imágenes satelitales, se realizaron dos reuniones con los responsables de la Unidad de Ordenamiento Territorial de SUBPESCA para la coordinación del curso de capacitación. En base a los acuerdos emanados de las reuniones de coordinación, se elaboró una propuesta mejorada del Programa y Contenidos del curso de capacitación como así también del horario y fechas tentativas. El curso se compone de 8 unidades temáticas repartidas en 13 semanas con clases los días lunes o miércoles o viernes en la mañana. El curso de capacitación se realizó de forma exitosa entre el viernes 12 de junio y el viernes 11 de septiembre. El curso es apoyado con el Aula Virtual de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (<http://fc.aulavirtualpucv.cl/>) para potenciar las prácticas educativas y los procesos de enseñanza y aprendizaje con el uso de tecnologías TICs con el

objetivo de incorporar espacios virtuales como apoyo al curso de capacitación y como una garantía de soporte por 3 meses después de terminado el proyecto. El curso fue debidamente inscrito como Actividad de Extensión Académica (AEA) de la PUCV para obtener la certificación, se solicitó autorización AEA la cual fue otorgada en Resolución N°118/2015 la cual autoriza a la Escuela de Ciencias del Mar a impartir el curso "MANEJO E INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES APLICADAS A LA GESTIÓN TERRITORIAL DE LA ACUICULTURA FASE II". Actualmente está en proceso de cierre y certificación en la AEA. Se elaboró el Manual de Capacitación del curso el cual se entrega adjunto (en formato PDF) al presente Informe Final.