

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, URBANISMO Y GEOGRAFÍA  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA



“CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES COSTEROS MEDIANTE TÉCNICAS DE  
SENSORAMIENTO REMOTO. HUMEDALES DE ESTUDIO: ROCUANT-  
ANDALIÉN, LENGUA Y TUBUL RAQUI”



TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓGRAFO

Tesista:

Sergio Andrés González Paz

Profesor Guía:

Dr. Francisco De La Barrera Melgarejo

Profesor Co-guía:

Mg. Juan Munizaga

---

Concepción, 2019

## RESUMEN

Los humedales a nivel mundial y nacional han sido objeto de una presión constante de distintos usos de suelo que ha provocado una pérdida significativa de su superficie, por esta razón, y considerando la importancia de los servicios ecosistémicos que estos proveen, se debe estudiar constantemente su estado actual. La nueva posibilidad que ostentan las recientes imágenes gratuitas multiespectrales Sentinel 1 y de radar Sentinel 2, sumado a nuevos enfoques de clasificación supervisada (enfoque por objetos, OBIA), permite abordar esta problemática desde una nueva perspectiva. El caso de humedales marismas de la región del Bío Bío, como los humedales Rocuant-Andalién, Lengua, y Tubul-Raqui, serán incorporados al estudio para principalmente obtener las superficies de las morfologías internas presentes en estos. Finalmente, el resultado es la comparación (evaluación del desempeño) de los enfoques tradicional por pixel y enfoque por objetos, que nos permitirá evaluar su utilización.

Los resultados permiten afirmar la mejora en los porcentajes de desempeño del clasificador mediante el enfoque por objetos debido a que hay una mejora en el promedio de 15% para la fiabilidad global de las Cubiertas de Usos de Suelo (CUS), y un 3% de la fiabilidad global de las Morfologías internas de los Humedales (MIH) mediante el uso de OBIA-Random Forest.

Palabras claves: Humedal, marismas, Teledetección, OBIA, Sentinel 1 y 2.

## **Abstract**

Wetlands at global and national levels have been under constant pressure from different land uses that have led to significant loss of their surface area, and for this reason, and considering the importance of the ecosystem services they provide, their current status must be constantly studied. The new possibility offered by the recent free Sentinel 1 multispectral and Sentinel 2 radar images, added to new supervised classification approaches (object based approach, OBIA), allows this problem to be approached from a new perspective. The case of marshes in the Bío Bío region, such as the Rocuant-Andalién, Lenga, and Tubul-Raqui wetlands, will be incorporated into the study in order to obtain the surfaces of the internal morphologies present in these wetlands. Finally, the result is the comparison (performance evaluation) of the traditional pixel and object approaches, which will allow us to evaluate their use.

The results allow us to affirm the improvement in the performance percentages of the classifier by means of the object approach due to the fact that there is an improvement in the average of 15% for the global reliability of the land use covers, and 3% for the global reliability of the internal morphologies of the wetlands by means of the use of OBIA-Random Forest.

**Keywords:** Wetland, marshes, Remote sensing, OBIA, Sentinel 1 and 2.

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de esta tesis paso por varias etapas, en las cuales mucha gente formó parte. La importancia de cada una de estas permitió que cuyo realizador obtuviera un aprendizaje general de varias temáticas que excedían los límites impuestos por la problemática tratada. Siendo una persona de pocas palabras daré los agradecimientos a algunas de las tantas energías y personas que impulsaron mi ánimo para terminar esta tesis:

A Dios, por darme la posibilidad de vivir y estar escribiendo todo esto;

A mi familia, por estar en todos los momentos de mi vida, y brindar la compañía y comprensión en los peores días;

A conocidos y amigos, especialmente a Pablo barra y Silvana Fuentes, que estuvieron para levantarme y darme ánimo en este tramo de mi vida;

A la Dr. Carolina Rojas; por darme la posibilidad de formar parte del proyecto URBANCOST y de empezar la realización de esta tesis;

Al Dr. Francisco de la Barrera; por ayudarme a aclarar todas las dudas de la tesis y apoyarme;

A Catalina Esquivel; por reaparecer en mi vida después de años y entregarme la confianza y amor que siempre necesito.

A todos y muchos....Gracias Totales.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1.INTRODUCCIÓN</b> .....	12
1.1 Problemática.....	13
<b>2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b> .....	19
2.1 Hipótesis.....	19
2.2 Objetivo general.....	19
2.3 Objetivos específicos.....	19
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	20
3.1 Definición de “Humedales” .....	20
3.1.1 Definiciones Internacionales.....	21
3.1.2 Definiciones y legislación de humedales en Chile.....	24
3.1.3 Servicios Ecosistémicos como importancia tangible e intangible de los humedales y las pérdidas globales .....	28
3.1.4 Sistemas de clasificación definitorias de Humedales .....	30
3.1.5 Humedal y caracterización interna .....	34
3.2 Humedales en Chile .....	42
3.2.1 Estado y localización de nuestros humedales.....	42
3.3 Teledetección y Sensoramiento Remoto para la detección-clasificación de Humedales .....	47
3.3.1 Fundamentos de Percepción remota y conceptos de la imagen digital .....	47
3.3.2 Conocimiento preliminar de la imagen y propiedades de la información del sensor remoto.....	54
3.3.3 Imágenes Multiespectrales y Apertura de Radar Sintético en el mapeo de humedales.....	58
3.3.4 Clasificación de imagen.....	68
<b>4. ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	76
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	79
5.1 Definir y delimitar las imágenes de las áreas de estudio .....	82
5.1.1 Delimitaciones preexistentes de los tres humedales estudiados.....	82
5.1.2 Adquisición de imágenes satelitales.....	82

5.1.3 Corrección de imágenes.....	87
5.1.4 Cálculo de Índices Radiométricos .....	99
5.1.5 Conformación de stack de bandas .....	103
5.2 Clasificación de imágenes en Coberturas-usos de suelo (CUS) y morfología interna del humedal (MIH) .....	104
5.2.1 Clasificación supervisada basada en el enfoque tradicional .....	107
5.2.2 Clasificación supervisada basada en el enfoque OBIA .....	110
5.2.3 Delimitar y clasificar los tres humedales específicamente.....	111
5.3 Comparación del desempeño de cada tipo de enfoque.....	112
5.3.1 Diseño del muestreo .....	113
5.3.2 Recogida de datos .....	114
5.3.3 Medidas del error .....	115
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>119</b>
6.1 Objetivo específico 1 .....	119
6.1.1 Delimitaciones en estudios anteriores.....	119
6.1.2 Adquisición, preprocesamiento, y creación de stack.....	123
6.2 Objetivo específico 2 .....	141
6.2.1 Enfoque tradicional por pixel .....	141
6.2.2 Enfoque OBIA .....	150
6.3 Evaluación de precisión de las clasificaciones .....	166
<b>7. DISCUSIÓN .....</b>	<b>168</b>
<b>8. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>172</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>177</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: E HUMEDALES A NIVEL MUNDIAL.....	28
FIGURA 2: SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS HUMEDALES .....	29
FIGURA 3: CLASIFICACIÓN DE CANALES DE MAREA.....	39
FIGURA 4: COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS DEL CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO..	50
FIGURA 5: ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO CON ÉNFASIS EN EL VISIBLE .....	51
FIGURA 6: INTERACCIONES DE LA RADIACIÓN CON LA ATMOSFERA Y LA TIERRA .....	52
FIGURA 7: ILUSTRACIÓN DEL MODELADO ÓPTICO DE HOJAS BI-LAMBERTIANAS.....	53
FIGURA 8: REFLECTIVIDAD DE DISTINTAS CUBIERTAS .....	54
FIGURA 9: GENERACIÓN DE UNA IMAGEN DIGITAL MULTIESPECTRAL A PARTIR DE UNA ESCENA .....	55
FIGURA 10: PRINCIPIOS DE EMISOR-RECEPTOR DEL SENSOR ACTIVO .....	61
FIGURA 11: PRINCIPIO DEL EFECTO DOPPLER .....	63
FIGURA 12: PENETRACIÓN DE BANDAS COMÚNMENTE USADAS EN SENSORAMIENTO REMOTO .....	64
FIGURA 13: POLARIZACIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL .....	65
FIGURA 14: GEOMETRÍA DE VISUALIZACIÓN DE UN SENSOR SAR .....	67
FIGURA 15: VECTORES DE SOPORTE.....	73
FIGURA 16: EJEMPLIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN KERNEL.....	74
FIGURA 17: ESQUEMA BÁSICO DE UN BOSQUE ALEATORIO.....	75
FIGURA 18: ÁREA DE ESTUDIO.....	78
FIGURA 19: ESQUEMA METODOLÓGICO DE LA PRESENTE TESIS.....	81
FIGURA 20: ESCENAS DE LAS 2 IMÁGENES SENTINEL 2 Y DE LA IMAGEN SENTINEL 1 OCUPADAS.....	83
FIGURA 21: ESQUEMA DE CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA SENTINEL 2.....	89
FIGURA 22: DISTORSIONES GEOMÉTRICAS DEBIDAS A LA TOPOGRAFÍA .....	93
FIGURA 23: PROCESOS DE CORRECCIÓN APLICADOS A LA IMAGEN SENTINEL 1 GRD	94
FIGURA 24: TOPS SPLIT APLICADO A LA IMAGEN SENTINEL 1 .....	96
FIGURA 25: PROCESOS DE CORRECCIÓN APLICADOS A LA IMAGEN SENTINEL 1 SLC .	98
FIGURA 26: VENTANA DE REGIONES DE INTERÉS EN ENVI.....	108
FIGURA 27: PROPUESTA DELIMITACIÓN HUMEDAL ROCUANT-ANDALIÉN.....	120
FIGURA 28: PROPUESTA DELIMITACIÓN HUMEDAL LENGUA VAZQUEZ (2009) .....	121
FIGURA 29: PROPUESTA DELIMITACIÓN HUMEDAL TUBUL-RAQUI VAZQUEZ (2009)..	122
FIGURA 30: TABLA DE BÚSQUEDA Y VISTA PREVIA DE LA IMAGEN SENTINEL 1 GRD .	124
FIGURA 31: TABLA DE BÚSQUEDA Y VISTA PREVIA DE LA IMAGEN SENTINEL 1 SLC ..	125
FIGURA 32: VISTAS PREVIAS DE LAS DOS IMÁGENES SENTINEL 2 TRABAJADAS.....	126
FIGURA 33: VISTA EN COMPOSICIÓN COLOR (BANDAS 4-3-2) DE LAS IMÁGENES SENTINEL 2 DESCARGADAS .....	128

FIGURA 34: SUBSET HUMEDAL LENGA VALORES SIN CORREGIR VS VALORES CORREGIDO EN SIGMA CERO.....	134
FIGURA 35: IMAGEN SENTINEL 1 SLC, COMPARACIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA CORRECCIÓN .....	135
FIGURA 36: NIVELES DE ALTURA DEL SRTM OCUPADO PARA LA REGIÓN DE INTERÉS .....	138
FIGURA 37: CLASIFICACIÓN ENFOQUE TRADICIONAL CUS Y MIH ROCUANT-ANDALIÉN .....	147
FIGURA 38: CLASIFICACIÓN ENFOQUE TRADICIONAL CUS Y MIH LENGA.....	148
FIGURA 39: CLASIFICACIÓN ENFOQUE TRADICIONAL CUS Y MIH TUBUL-RAQUI .....	149
FIGURA 40: EJEMPLO DE SEGMENTACIÓN HUMEDAL ROCUANT-ANDALIÉN .....	151
FIGURA 41: CLASIFICACIÓN ENFOQUE POR OBJETO CUS Y MIH ROCUANT-ANDALIÉN .....	163
FIGURA 42: CLASIFICACIÓN ENFOQUE TRADICIONAL CUS Y MIH LENGA.....	164
FIGURA 43: CLASIFICACIÓN ENFOQUE TRADICIONAL CUS Y MIH TUBUL-RAQUI .....	165



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN ALGUNOS TIPOS DE CLASIFICACIONES CRONOLÓGICAMENTE .....	31
TABLA 2: COMPARACIÓN DE DIFERENTES CLASIFICACIONES DEFINITORIAS.....	32
TABLA 3: HUMEDALES RAMSAR EN CHILE .....	45
TABLA 4: COMPARACIÓN DE SENTINEL-2 CON MISIONES IMPORTANTES .....	59
TABLA 5: BANDAS DE RADAR, FRECUENCIAS Y LONGITUDES DE ONDA.....	64
TABLA 6: CAPACIDADES DE POLARIZACIÓN DE DISTINTOS SENSORES .....	66
TABLA 7: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ARCHIVOS DESCARGADOS .....	84
TABLA 8: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES SENTINEL-1B .....	85
TABLA 9: NOMBRE, RESOLUCIÓN ESPACIAL, Y RESOLUCIÓN ESPECTRAL DE SENTINEL 2 .....	86
TABLA 10: PARÁMETROS DEL COMPLEMENTO SEN2COR PARA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA .....	89
TABLA 11: BANDAS SENTINEL 2 CALIBRADAS .....	104
TABLA 12: COBERTURAS Y USOS DE SUELO .....	105
TABLA 13: TIPOS DE MORFOLOGÍAS INTERNAS PARA LOS TRES HUMEDALES ESTUDIADOS .....	112
TABLA 14: NIVEL DE CONCORDANCIA ÍNDICE KAPPA.....	118
TABLA 15: CARACTERÍSTICAS IMÁGENES SATELITALES DESCARGADAS .....	126
TABLA 16: ESTADÍSTICAS BÁSICAS Y NÚMERO DE PÍXELES DE CADA BANDA DE LA IMAGEN 1 SENTINEL 2.....	127
TABLA 17: ESTADÍSTICAS BÁSICAS Y NÚMERO DE PÍXELES DE CADA BANDA DE LA IMAGEN 2 SENTINEL 2.....	127
TABLA 18: PARÁMETROS USADOS PARA LA CORRECCIÓN ATCOR APLICADA EN EL COMPLEMENTO SEN2COR DE SNAP TOOLBOX PARA AMBAS IMÁGENES .....	131
TABLA 19: REFLECTANCIAS BOA CON CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA IMAGEN 1 SENTINEL 2.....	131
TABLA 20: REFLECTANCIAS BOA CON CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA IMAGEN 2 SENTINEL 2.....	132
TABLA 21: ESTADÍSTICA BÁSICA ÍNDICES ESPECTRALES SUBSET ROCUANT-ANDALIEN .....	136
TABLA 22: ESTADÍSTICA BÁSICA ÍNDICES ESPECTRALES SUBSET LENGA .....	137
TABLA 23: ESTADÍSTICA BÁSICA ÍNDICES ESPECTRALES SUBSET TUBUL-RAQUI.....	137
TABLA 24: ESTADÍSTICA BÁSICA DEL DEM PARA LOS SUBSET TRABAJADOS .....	139
TABLA 25: ESTADÍSTICAS BÁSICAS PCA ÍNDICES TEXTURALES DE LOS SUBSET TRABAJADOS.....	139
TABLA 26: CONFORMACIÓN DE STACK PARA CADA HUMEDAL .....	140
TABLA 27: ROIS CLASIFICACIÓN CUBIERTAS Y USOS DE SUELO .....	141
TABLA 28: ROIS CLASIFICACIÓN MORFOLOGÍA INTERNA HUMEDAL.....	142
TABLA 29: ROIS CLASIFICACIÓN CUBIERTAS Y USOS DE SUELO .....	142

TABLA 30: ROIS CLASIFICACIÓN MORFOLOGÍA INTERNA HUMEDAL.....	143
TABLA 31: ROIS CLASIFICACIÓN CUBIERTAS Y USOS DE SUELO .....	143
TABLA 32: ROIS CLASIFICACIÓN MORFOLOGÍA INTERNA HUMEDAL.....	144
TABLA 33: PARÁMETROS USADOS PARA EL CLASIFICADOR SVM PARA CUS Y MIH .	145
TABLA 34: HECTÁREAS PROCESADAS DE CUS PARA OBTENER EL LÍMITE DE CORTE ESPECÍFICO PARA CADA HUMEDAL EN EL ENFOQUE TRADICIONAL.....	145
TABLA 35: PARÁMETROS DE LA SEGMENTACIÓN MULTIRESOLUCIÓN CUS.....	151
TABLA 36: PARÁMETROS DE LA SEGMENTACIÓN MULTIRESOLUCIÓN MIH.....	152
TABLA 37: NÚMERO DE OBJETOS Y PÍXELES CUS ROCUANT-ANDALIÉN .....	152
TABLA 38: NÚMERO DE OBJETOS Y PÍXELES CUS LENGA.....	153
TABLA 39: NÚMERO DE OBJETOS Y PÍXELES CUS TUBUL-RAQUI .....	154
TABLA 40: NÚMERO DE OBJETOS Y PÍXELES MIH ROCUANT-ANDALIÉN .....	154
TABLA 41: NÚMERO DE OBJETOS Y PÍXELES MIH LENGA.....	155
TABLA 42: NÚMERO DE OBJETOS Y PÍXELES MIH TUBUL-RAQUI .....	155
TABLA 43: PARÁMETROS DE OBJETOS INDIVIDUALES PARA CUS ROCUANT-ANDALIEN .....	156
TABLA 44: PARÁMETROS DE OBJETOS INDIVIDUALES PARA MIH ROCUANT-ANDALIÉN .....	156
TABLA 45: PARÁMETROS DE OBJETOS INDIVIDUALES PARA CUS LENGA .....	156
TABLA 46: PARÁMETROS DE OBJETOS INDIVIDUALES PARA MIH LENGA.....	157
TABLA 47: PARÁMETROS DE OBJETOS INDIVIDUALES PARA CUS TUBUL-RAQUI .....	157
TABLA 48: PARÁMETROS DE OBJETOS INDIVIDUALES PARA MIH TUBUL-RAQUI .....	157
TABLA 49: PARÁMETROS DE OBJETOS APLICADOS A LA CLASIFICACIÓN DE CUBIERTAS Y USOS DE SUELO ROCUANT-ANDALIÉN .....	158
TABLA 50: PARÁMETROS DE OBJETOS APLICADOS A LA CLASIFICACIÓN DE MORFOLOGÍA INTERNA DEL HUMEDAL ROCUANT-ANDALIÉN .....	158
TABLA 51: PARÁMETROS DE OBJETOS APLICADOS A LA CLASIFICACIÓN DE CUBIERTAS Y USOS DE SUELO LENGA.....	159
TABLA 52: PARÁMETROS DE OBJETOS APLICADOS A LA MORFOLOGÍA INTERNA DEL HUMEDAL LENGA .....	159
TABLA 53: PARÁMETROS DE OBJETOS APLICADOS A LA CLASIFICACIÓN DE CUBIERTAS Y USOS DE SUELO TUBUL-RAQUI .....	160
TABLA 54: PARÁMETROS DE OBJETOS APLICADOS A LA MORFOLOGÍA INTERNA DEL HUMEDAL TUBUL-RAQUI.....	160
TABLA 55: PARÁMETROS DEL CLASIFICADOR RANDOM TREES PARA CUS Y MIH ....	161
TABLA 56: HECTÁREAS PROCESADAS DE CUS PARA OBTENER EL LÍMITE DE CORTE ESPECÍFICO PARA CADA HUMEDAL EN EL ENFOQUE POR OBJETO.....	161
TABLA 57: FIABILIDAD GLOBAL (OVERALL ACCURACY) CUS.....	166
TABLA 58: FIABILIDAD GLOBAL (OVERALL ACCURACY) MIH.....	166
TABLA 59: ÍNDICE KAPPA CUS .....	167

TABLA 60: ÍNDICE KAPPA MIH.....	167
TABLA 61: HECTÁREAS MORFOLOGÍAS INTERNAS HUMEDALES.....	167



## 1. INTRODUCCIÓN

El estado actual de los recursos naturales de las zonas costeras, se están transformando en un objetivo central en las zonas metropolitanas del planeta. Esto debido a que las zonas costeras albergan actualmente más del 45% de la población mundial, y es la localización de 3 de 4 de las megaciudades con más de 10 millones de habitantes (Crossland, Kremer, Lindeboom, Crossland, & Tissier, 2005). Se estima que para el año 2050 en las zonas costeras vivirán 134 habitantes por km<sup>2</sup>, siendo para las zonas interiores solo de 52 (Shi & Singh, 2003). Dada estas condiciones el uso de suelo en estas zonas exige una planificación constante, donde existe una amplia gama de intereses como el comercial, recreacional, portuario, pesquero de subsistencia, industrial, y donde el turismo, agricultura, y silvicultura necesitan un clima costero que les permita desarrollarse (World Meteorological/United Nations Environment Program, 1990).

En este contexto, existe un ecosistema enclavado en esta zona costera que es producto de la fuerza de las mareas y de los aportes de agua dulce del margen continental, las marismas. Según Mitsch y Gosselink (2015), existen tres clases de marismas costeras: marisma de marea; humedales de marea de agua dulce; manglares.

Al estar expuestos, los humedales son ecosistemas altamente amenazados, ya sea por la actividad humana o por cambios antrópicos globales como el cambio climático. Para abordar esta problemática, los esfuerzos deben empezar por las instituciones planificadoras del territorio e incorporar políticas adoptadas en instrumentos de planificación territorial. Por consiguiente, la detección y clasificación de los humedales se hace imperativo.

Como la realización de los estudios de estos ecosistemas implica un costo general elevado, se necesita buscar metodologías que permitan ser eficaces y eficientes. El sensoramiento remoto junto con el manejo de imágenes

pertenecientes a sensores pasivos (imágenes multiespectrales) y a sensores activos (imágenes de Radar), permite incorporar información del espectro electromagnético con resoluciones espaciales y temporales adecuadas para el estudio de humedales, entre ellas las vegetacionales. En esta línea, el presente estudio, calibra, optimiza y se pone en ejecución dos metodologías diferentes en humedales tipo marismas, la finalidad es elaborar un método suficientemente efectivo para apoyar la detección-clasificación y el monitoreo de los humedales.

### **1.1 Problemática**

La existencia de ecosistemas transicionales entre suelo y agua han sido muy importantes en la historia de nuestro planeta como escenarios que mezclan condiciones pertenecientes a distintos ambientes, gracias a esta característica es que los humedales presentan altos niveles de biodiversidad que permiten el desarrollo de muchas especies de plantas, invertebrados, peces, y vida silvestre (Mitsch & Gosselink, 2015). Al margen de esta condición rica en características propicias para la vida, los humedales se transforman en receptores de agua y desechos provenientes de aguas arriba, con lo cual han ayudado a la limpieza de agua contaminada (estabilización de los suministros de agua), proteger la costa (mitigación de inundaciones), y la recarga de acuíferos (sequía).

Según Tiner, Lang, y Klemas (2005), los humedales son tierras que están al menos húmedas periódicamente durante la estación de crecimiento en la mayor parte del ciclo hidrológico, o en regiones áridas durante la fase húmeda del mismo. Dentro de este marco definitorio se incluyen zonas de agua poco profunda, tierras permanentemente saturadas, planicies de inundación y depresiones temporalmente inundadas y otras tierras con el nivel freático alto.

La presencia del ecosistema en prácticamente todos los continentes, excepto en la Antártica, y en todos los climas existentes, implica la concientización de lo importante que pueden ser en el conjunto del paisaje en el que se insertan. Variados estudios estiman la extensión de humedales en la tierra entre los 7 a 10

millones de kilómetros cuadrados, siendo alrededor del 5 al 8 % de la superficie de suelo total del planeta (Mitsch & Gosselink, 2015). Las determinaciones de estas superficies han ido aumentando conforme se ha desarrollado las técnicas para calcularlas, incorporando técnicas basadas en imágenes aéreas y satelitales, analizadas en Sistemas de Información Geográficos (SIG).

¿Pero cómo ordenar la importancia de estos ecosistemas para la humanidad? Además de proveer servicios medioambientales esenciales (Costanza, y otros, 2014) y cumplir un rol fundamental en el desarrollo de la hidrología, suelo, bioquímica, y vegetación, de los espacios donde se encuentran, los humedales poseen tres servicios ecosistémicos vitales para la mitigación de la pobreza. Según el Millennium Ecosystem Assessment (2005)<sup>1</sup> estos servicios derivados cumplirían un rol fundamental en la regulación de ecosistemas: regulación de la calidad del aire; regulación del clima; purificación del agua; regulación de enfermedades; regulación de plagas; ayuda a la polinización; y la regulación de los riesgos naturales. También el ser un ecosistema proveedor: alimento; agua; madera; fibra; y recursos genéticos. Y un servicio directamente relacionado con el bienestar de las personas, el servicio cultural ecosistémico: enriquecimiento espiritual; recreación; ecoturismo; estética; educación informal y formal; fuente de inspiración; y patrimonio cultural.

Se deriva que la presencia de estos ecosistemas es importante, pero también lo es el nivel de pérdida o degradación que han experimentado principalmente durante los últimos 100 años (Ramsar, 2015). Por siglos la humanidad ha visto a los humedales como lugares que pueden ser drenados para usarlos por ejemplo en agricultura, produciéndose la pérdida de biodiversidad (FAO, 2002). Otras directas causas de las pérdidas de humedales del interior y costeros son: sobreexplotación de los recursos silvestres; canalización de ríos; presas; desvío de ríos a grandes escalas para uso de riego; reducción de bosques inundados

---

<sup>1</sup> (Millennium Ecosystem Assessment Board, 2005)

estacionalmente para la práctica de acuicultura; caminos e infraestructuras de control de inundaciones; e urbanización y polución industrial. Russi et al. (2013) elaboró un estudio cuantitativo de las pérdidas en el último siglo, las estimaciones son muy negativas debido a que de 25 millones de km<sup>2</sup> se pasó a 12,8 millones de km<sup>2</sup>. Davidson (2014) analizó reportes y publicaciones determinando que el 10,6 % de los humedales a largo plazo (hace múltiples siglos), siendo un 60,8 % de humedales internos y un 46,4 % de costeros.

Dentro del marco nacional la mayor parte de los humedales de importancia internacional están en el norte de nuestro país, sin embargo, la existencia del ecosistema está presente en gran porcentaje de la zona costera, es más, cerca de 412 humedales (38.167 ha) en esta ubicación están con serias posibilidades de desaparecer debido a la actividad antrópica, siendo particularmente importantes los ubicados en las comunas que contienen mayor densidad de habitantes como lo son Viña del Mar, Valparaíso, Talcahuano, Coquimbo, y Valdivia (Fariña & Camaño, 2012).

La seriedad respecto a la pérdida de estos ecosistemas se plasmó en la pequeña localidad de Ramsar, Irán, el 3 de febrero de 1971, 18 naciones adoptan un importante tratado que el año 1975 entraría en vigor. La convención Ramsar, el primer instrumento y esfuerzo moderno para la conservación de los recursos naturales del planeta, más específicamente las zonas húmedas. Los esfuerzos para la consecución del tratado empezaron once años antes: Project MAR (1962); St Andrews (1963); IWRB Proposals (1965); Noordwijk y First Dutch Draft (1966); Morges (1967); Leningrado (1968); Morges (1968); Vienna (1969); Moscú (1969); Espoo (1970); Knokke (1970).

En nuestro país la política nacional de desarrollo urbano en sus objetivos y principios rectores establece en su apartado número 3 el “Equilibrio ambiental”. Más específicamente la subdivisión 3.1.3 dice: “Incorporar en los Instrumentos de Planificación Territorial reglas y planes especiales para los bordes costeros

marítimos, lacustres y fluviales, de canales y humedales, incluyendo el tratamiento de los cauces como corredores o paseos urbanos que “introducen” la naturaleza en la ciudad, contribuyen a regular el clima y resguardan la biodiversidad”.

La promulgación de la Ley de Bases del Medio Ambiente y la ratificación por parte de nuestro país del Convenio sobre Diversidad Biológica, las dos en 1994 (Rovira, 2005), y la Estrategia Nacional de Biodiversidad pavimentaron la adopción del concepto de protección efectiva de los espacios húmedos. Chile suscribió a la Convención Ramsar el año 1971 y ésta entró en vigor el año 1981, décadas después se cuenta con 9 humedales de importancia internacional significando 286.213 hectáreas de superficie de un total de 12 sitios Ramsar.

Entendiendo la importancia y estado del ecosistema, para lograr realizar un estudio acabado de este, en ocasiones se necesita ingresar a zonas remotas o difícilmente accesibles lo que conlleva un alto gasto de tiempo y dinero (Harvey & Hill, 2001; Baker, Lawrence, Montagne, & Patten, 2006; Lang et al. 2015). Por esta razón se ha optado por otras alternativas que permitan reducir costos sin perder precisión por el camino.

De igual forma los últimos años se ha aumentado la disponibilidad gratuita de imágenes de radar y sensores activos, siendo estas de gran utilidad para discriminar ciertas características del suelo no apreciables en las imágenes multiespectrales, pero que aún no son utilizadas con tanta frecuencia en estos estudios quizás por el desconocimiento de los datos técnicos envueltos en esta tecnología (Adam, Mutanga, & Rugege, 2010).

El uso de sensores pasivos para la clasificación tiene algunos contras que dificultan la obtención de información precisa de la superficie estudiada, para solventar estos problemas, como se comentaba anteriormente, es necesario el uso de sensores activos. Con la apertura de datos de imágenes de radar en los últimos años a través de la web, más específicamente de la tecnología de

Apertura de radar sintético (Synthetic Aperture Radar), es posible capturar distintas entidades en tierra bajo condiciones desfavorables para los sensores pasivos. Estos sensores tienen la cualidad de lograr obtener información de la superficie a pesar de que sea día o noche, de que esté presente cubierta nubosa, de la presencia de humo en el ambiente, y de cualidades en la detección de inundación bajo la vegetación debido a la capacidad de penetración en el dosel (Lang, Bourgeau-Chavez, Tiner, & Klemas, *Advances in Remotely Sensed Data and Techniques for Wetland Mapping and Monitoring*, 2015).

Los métodos de clasificación más comunes para desarrollar clasificaciones derivadas de imágenes son la clasificación basada en los píxeles de una imagen, conocidas también como enfoque tradicional. Estos tipos de clasificación enfocados en los humedales podrían tener limitaciones debido a la alta variabilidad espaciales que ellos presentan. Según McCarthy et al (2005) en algunos casos los esfuerzos que utilizan métodos estadísticos tradicionales han sido inútiles, necesitando procesos de clasificación refinados con índices e información auxiliar para mejorar los resultados. Por otro lado, está el relativamente nuevo enfoque por objetos OBIA (Object Based Image Analysis), el que además de incorporar información espectral puede incorporar cientos de propiedades asociadas a los objetos, como su forma, tamaño, color, etc (Navulur, 2007).

Con la comparación de todos los procesos nombrados se llevará a cabo la búsqueda de una delimitación y clasificación de tres humedales marismas costeros de la región del BíoBío mediante distintos criterios asociados a la teledetección, incluyendo en este marco la comparación de dos métodos de clasificación con diferente enfoque y distintas imágenes de entrada. La virtud de lograr determinar el perímetro y superficie del humedal es enfocar la caracterización de la morfología interna de estos, para tener una visión amplia de

los canales de marea /Tidal creeks), planicie de marisma, depresiones (pannes), estanques de marea, llanura mareal, etc.

El proceso consistirá en la comparación de dos enfoques de clasificación de imagen, el enfoque tradicional o enfoque por píxel, y el enfoque basado en el análisis de los objetos (OBIA). Debido a la alta variabilidad interna de los humedales y considerando la resolución de los productos (imágenes satelitales), determina un escenario complicado para la clasificación y delimitación, lo que supondrá un desafío aplicar la técnica en busca de los mejores resultados.

Por lo tanto, para la correcta incorporación de estos ecosistemas a la planificación, y considerando la variación del ecosistema en nuestros días, se hace necesario actualizar constantemente la ubicación de los mismos, necesitando urgentemente mejorar los procesos utilizados para delimitarlos y clasificarlos.



## 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

### 2.1 Hipótesis

Las nuevas tecnologías en Sensoramiento Remoto y los más recientes sensores activos y pasivos abiertos a la comunidad, han aumentado considerablemente la resolución espacial, radiométrica y espectral de las imágenes, dada estas condiciones es posible detectar no sólo los contornos de una marisma, sino que también nos permite clasificar la morfología interna de los humedales para lograr un mapeo más específico y ampliado. La clasificación de análisis de imagen basado en objetos, incorpora una serie de posibilidades ausentes en el enfoque de clasificación clásico, lo cual permitirá aumentar la precisión en los resultados finales.

### 2.2 Objetivo general

-Comparar el desempeño de dos enfoques de clasificación para tres humedales de tipo marismas de la región del Bio-Bio, utilizando imágenes multiespectrales, Sentinel 2, e imagen de Radar Sentinel 1.

### 2.3 Objetivos específicos

- Definir y delimitar las tres áreas de estudio que se utilizarán, incorporando a cada subset las bandas procesadas seleccionadas para aplicar las clasificaciones.
- Aplicar las clasificaciones de los dos enfoques comparados: enfoque clásico por píxeles; y enfoque basado en objetos. Cada clasificación se realizará para determinar las cubiertas y usos de suelo de los subset y otra para las morfologías internas del humedal.
- Comparar el desempeño de cada tipo de enfoque, entregando los resultados de cada clasificación.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Definición de “Humedales”

En la variedad de paisajes que existen en la tierra existe un ecosistema de interface que además de representar un punto caliente de biodiversidad nos entrega funciones específicas para la actividad humana, que ya sea por ignorancia o distintos intereses, a ido disminuyendo considerablemente su superficie, evidenciando graves problemas de planificación sustentable y cuidado medioambiental. Antes de entrar en consideraciones normativas se debe ahondar en la definición y concepto de este ecosistema para comprender la importancia de su conservación y cuidado.

Cuando se habla de humedales muchas veces no se tiene claro de “que realmente es” o se tiende a confundir su definición debido a que su forma y localización es distinta, impidiendo dar una aproximación clara en pocas palabras. Precisamente se necesitan dos tipos de definiciones generales de humedales para distintos grupos de interés (Mitsch & Gosselink, 2015): (1) intereses científicos y (2) definiciones orientadas a la planificación y regulación. El primero como es de esperar es el avance en el conocimiento del ecosistema como tal, derivado de los variados campos disciplinares que se relacionan para mejorar y complementar su definición. La segunda definición debe constar con las características necesarias para que el significado no se haga engorroso, dificultando la toma de decisiones por parte de los organismos y entidades que tienen una incidencia directa en la creación de normas con el ecosistema como protagonista.

A continuación, se expondrán algunas de las definiciones más importantes del ecosistema desde el punto de vista de los términos anteriormente nombrados.

### **3.1.1 Definiciones Internacionales**

#### **3.1.1.1 Definiciones científicas**

##### **3.1.1.1.1 Servicio de Pesca y vida silvestre de Estados Unidos 1956 y 1979**

La definición que da este servicio en la “circular 39” el año 1956 (Shaw & Fredine, 1956) al término Humedal (Wetlands) se enfoca en las tierras bajas cubiertas superficialmente o intermitentemente con agua. Estas hacen referencia a nombres como marismas, ciénagas, pantanos, prados húmedos, baches, fangales, y zonas de desbordamiento de ríos. Esta circular hace énfasis en el hábitat de aves acuáticas y definiendo 20 tipos de humedales que servirían como base de las posteriores clasificaciones (Mitsch & Gosselink, 2015).

Posteriormente la misma entidad el año 1979 complementa la definición e introduce términos relacionados con los “suelos hídricos y las hidrófitas”. Fue presentada en el reporte “Clasificación de humedales y vida acuática de los Estados Unidos” (Cowardin, Carter, Golet, & LaRoe, 1979). La definición dice que los humedales son suelos transicionales entre sistemas terrestres y acuáticos donde el nivel freático está usualmente cerca de la superficie o el suelo está cubierto por agua superficial. Además, hace hincapié en tres atributos; (1) al menos periódicamente el suelo soporta hidrófitas; (2) el sustrato es predominantemente de suelos hídricos no drenados; (3) y el sustrato que no es suelo, debe estar saturado con agua o cubierto con agua superficial en algún momento en el crecimiento estacional.

##### **3.1.1.1.2 Definición de Humedales Canadiense**

El grupo de trabajo de humedales nacionales de Canadá, determina dos definiciones acordes a su caso específico. En primer lugar, Zoltai (1988) define humedal como:

“Las tierras que tienen el nivel freático, cerca, o sobre su superficie, y que están saturadas por un periodo de tiempo suficiente para generar un humedal o procesos acuáticos como lo indican los suelos hídricos, vegetación hidrofítica, y varios tipos de actividad biológica que se adaptan a un ambiente húmedo”

El mismo Zoltai (1988) incorpora a la definición de humedal a los suelos encharcados donde en algunos casos la producción de material vegetal excede la descomposición, describiendo respectivamente los extremos húmedos y secos del ecosistema como: (1) aguas superficiales abiertas, generalmente inferior a 2 metros; (2) áreas periódicamente inundadas únicamente en condiciones encharcadas que dominan el desarrollo del ecosistema.

En el mismo documento se propone otra definición que reformula ligeramente las anteriores y que sería utilizada a posteriori por los investigadores anteriores. Además, la definición de Tarnocai et al. (1988) es la oficial en Canadá:

“Tierras que están saturadas con agua el tiempo suficiente para generar un humedal o procesos acuáticos, como lo indican los suelos mal drenados, la vegetación hidrofítica, y diversos tipos de actividad biológicas que se adapten a condiciones húmedas”

### **3.1.1.1.3 Academia Nacional de ciencias de Estados Unidos 1995**

El Consejo Nacional de Investigación (NRC) de Estados Unidos el año 1995 creó un reporte a pedido del Congreso de dicho país para revisar los aspectos científicos que caracterizan a los humedales. El resultado fue llamado “Humedales: Características y límites” (NRC, 1995)<sup>2</sup>, el cual dio una definición de referencia que no tenía la potestad de influir a nivel político regulatorio. La definición dice:

---

<sup>2</sup> (National Research Council (NRC), 1995)

“Un humedal es un ecosistema que depende de un constante o recurrente inundación o saturación, superficial o en la superficie del sustrato o cerca de ella. Las características mínimas esenciales para un humedal son la inundación recurrente, sostenida o la saturación en o cerca de la superficie y la presencia de características físicas, químicas, y biológicas que reflejen una inundación o saturación recurrente y sostenida. Las características diagnósticas más comunes de los humedales son los suelos hídricos y la vegetación hidrofítica. Estas características estarán presentes, excepto cuando factores específicos físico químicos, bióticos, o antropogénicos los hayan eliminado o impedido su desarrollo”

### **3.1.1.2 Definiciones legales**

#### **3.1.1.2.1 Definición del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos**

La definición de esta institución se basa en el requerimiento de la sección 404 de 1977 para la implementación de dragados y rellenos. Esta definición se ha mantenido en las normas por varias décadas. Básicamente lo que aporta esta definición es que bajo circunstancias normales prevalece la vegetación típicamente adaptada a la vida en condiciones de suelo saturado, incluyendo ciénagas, marismas, fangales y áreas similares.

#### **3.1.1.2.2 Definición de la ley de seguridad alimentaria de U.S**

Las tierras agrícolas de Estados Unidos que antes de diciembre de 1985 estaban exentas de regulación, a posterior de la regulación los humedales estaban protegidos. La definición consta de: (1) son predominantemente formados por suelos hídricos; (2) están inundadas o saturadas superficialmente o agua superficial con frecuencia y duración suficiente para soportar vegetación hidrofítica típicamente adaptada para la vida en suelos con condiciones saturadas; y (3) en circunstancias normales prevalece tal vegetación.

### 3.1.2 Definiciones y legislación de humedales en Chile

En nuestro país el tratamiento formal de los humedales se comenzó a desarrollar cuando Chile suscribió a la Convención sobre los humedales (Convención Ramsar) y se promulgó como ley de la República el año 1981 en el Decreto Supremo N° 771 del Ministerio de Relaciones Exteriores. Posteriormente la protección del ecosistema cayó bajo el alero de la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300) creada el año 1994 y modificada en el año 2010 (ley 20.417), la cual buscaba darle institucionalidad ambiental a nuestro país.

Antiao (2013) en su trabajo “Legislación aplicable a los humedales en Chile: Análisis crítico de su protección en la normativa vigente”, hace un revisado de la protección de los humedales en Chile, los cuerpos legales que han incidido sobre estos, y las Políticas Públicas relacionadas con los humedales. Las siguientes definiciones corresponden a la Corporación Nacional Forestal (CONAF), (1) la primera perteneciente al “Programa Nacional para la Conservación de Humedales insertos en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado” y la (2) segunda en el “Reglamento de Suelos, Aguas y Humedales”:

(1)

“Extensiones de marismas, pantanos, turberas y aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

(2)

“Ecosistemas asociados a sustratos saturados de agua en forma temporal o permanente, en los que existe y se desarrolla biota acuática y, han sido declarados Sitios Prioritarios de Conservación, por la Comisión Nacional del Medio Ambiente, o sitios Ramsar. Para efectos de delimitación, se considerará la presencia y extensión de la vegetación hidrófila. Tratándose de ambientes

que carecen de vegetación hidrófila se utilizará, para la delimitación, la presencia de otras expresiones de biota acuática”

### **3.1.3.1 Legislación Nacional**

La protección a nivel mundial se ha retrasado bastante llegando solo cuando las políticas, leyes, y regulaciones, han permitido darles importancia a estos ecosistemas. Para la correcta inclusión del término humedal en el apartado legal en nuestro país se necesita conocer los principales cuerpos legales que tienen algún tipo de incidencia sobre ellos.

Si bien Chile se suscribió a la convención RAMSAR el año 1981, la evolución para la conservación de los humedales ha sido lenta, en un principio por la inexistencia de una institucionalidad ambiental que velara por la protección de este apartado, siendo sólo incorporada a la constitución el año 1994 en un contexto de transición política. Es así cuando ese año se creó la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (19.300, ahora 20.417) que permitió entregar estándares ambientales mínimos y ordenar las normas sectoriales ya existentes en la creación de un Ministerio del Medio Ambiente. De esta forma los ecosistemas, como los humedales, tenían un mayor grado de importancia y protección en el país, dándole además un lazo de unión con la convención RAMSAR.

El nuevo ministerio y la ley general del medio ambiente lograron generar la inclusión de los humedales en lo referido a la protección, entregándole el rol al sistema de evaluación ambiental y la responsabilidad de si un proyecto tiene o no impacto (ambiental) o si se ajusta o no a las normas. De esta forma ya no estaba omitido este ecosistema y presentaba ya un tipo de protección. Lo anterior se ve reflejado en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y de su organismo a cargo el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), siendo el SEIA un procedimiento administrativo que busca determinar si el impacto ambiental de una actividad o proyecto se encuentra en las normas vigentes a través de una

Declaración de impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de impacto Ambiental (EIA). En este marco se encuentra el artículo 10 de esta ley (19.300) el cual indica las actividades o proyectos que deberán ser sometidos al proceso, siendo las siguientes letras claras referencias al ecosistema estudiado:

a) Acueductos, embalses o tranques y sifones que deban someterse a la autorización establecida en el artículo 294 del Código de Aguas, presas, drenaje, desecación, dragado, defensa o alteración, significativos, de cuerpos o cursos naturales de aguas;

e) Aeropuertos, terminales de buses, camiones y ferrocarriles, vías férreas, estaciones de servicio, autopistas y los caminos públicos que puedan afectar áreas protegidas;

i) Proyectos de desarrollo minero, incluidos los de carbón, petróleo y gas comprendiendo las prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos y estériles, así como la extracción industrial de áridos, turba o greda;

p) Ejecución de obras, programas o actividades en parques nacionales, reservas nacionales, monumentos naturales, reservas de zonas vírgenes, santuarios de la naturaleza, parques marinos, reservas marinas o en cualesquiera otras áreas colocadas bajo protección oficial, en los casos en que la legislación respectiva lo permita;

Las anteriores letras del artículo 10 hacen algún tipo de alusión a la protección de los humedales en la instancia de la generación de algún tipo de impacto ambiental. En caso de que este proyecto produzca efectos que lo obliguen a someterse a una EIA por su impacto, existen algunas alusiones al ecosistema. La letra B) del artículo 11 de esta la ley General de Medio Ambiente dice:

“b) Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire;”

n.1. vegas y/o bofedales ubicados en las Regiones I y II, que pudieren ser afectadas por el

ascenso o descenso de los niveles de aguas subterráneas;

n.2. áreas o zonas de humedales que pudieren ser afectadas por el ascenso o descenso de los

niveles de aguas subterráneas o superficiales”

Si bien parte de estos artículos consideran el impacto que recibirían algunos tipos de humedales con la construcción de un proyecto, cabe mencionar que la protección no es para nada completa ni menos exclusiva y las decisiones finales en la otorgación de la aprobación están sometidas a una decisión política.

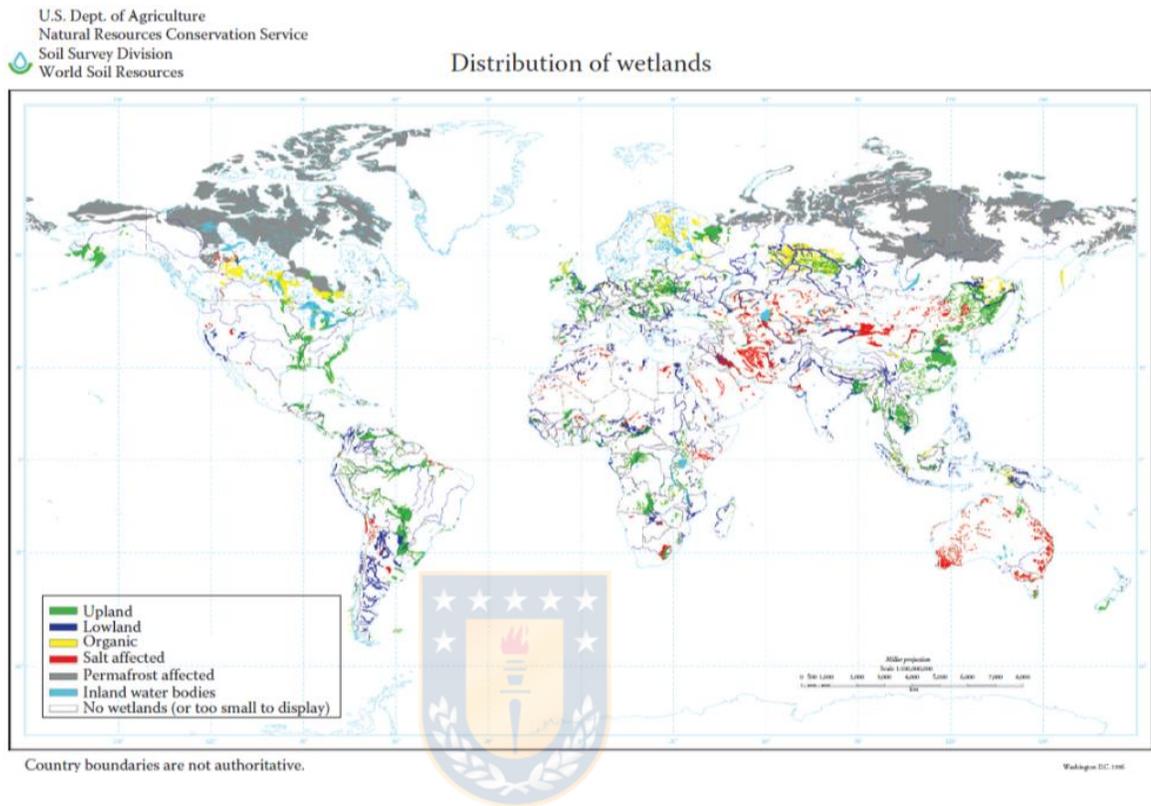
Antes de la ley N° 19.300 algunos cuerpos legales incorporaron a los humedales en sus párrafos, sin embargo, ninguno con la capacidad de protección de la ley antes citada. Según Antiao (2013) las leyes son:

- El código Civil
- Código de aguas
- Ley de caza
- Ley sobre recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal
- Ley General de Urbanismo y Construcción
- Ley Fomento al riego y drenaje

Documentos políticos:

- Estrategia Nacional de Biodiversidad
- Estrategia Nacional sobre el uso Racional de los Humedales en Chile
- Estrategia de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas

Figura 1: Localización de humedales a nivel mundial



### 3.1.3 Servicios Ecosistémicos como importancia tangible e intangible de los humedales y las pérdidas globales

Si bien la conservación y protección de ciertos ecosistemas parece un acto instintivo por considerar una serie de aspectos biológicos y químicos esenciales para la fauna-biota presente en estos espacios, como es el caso de los humedales, existen algunas cualidades que no se deducen inmediatamente en concordancia con los beneficios hacia la humanidad. En esta línea el Millennium Ecosystem Assessment (2005) reemplaza el término de “valor de un ecosistema” por “servicios ecosistémicos”. La anterior terminología derivaba los valores de los humedales en tres niveles jerárquicos: población; ecosistema; y global. El nuevo término divide en tres categorías los servicios ecosistémicos, enfocando un servicio al bienestar humano.

Figura 2: Servicios ecosistémicos de los humedales



Fuente: elaboración propia en base a Millennium Ecosystem Assessment (2005)

Debido a esta importancia intrínseca del ecosistema se deriva inmediatamente la idea de conservación y protección, a la cual se le suma el concepto de fragilidad. Su fragilidad radica en los componentes vivos que los componen, tanto las plantas como los animales son sensibles a los cambios ambientales, además de esto, las alteraciones que ocurran en el sector superior de la cuenca afectarán la parte inferior de esta en muchos casos (Moore, 2007) (Moore, 2008).

Así desde las primeras concepciones de humedal se ha tenido la idea de que representan tierras baldías sin un valor específico, lo que ha significado que sea objeto de menoscabo. Esto se ha traducido en el drenaje y relleno de grandes superficies de humedales alrededor del mundo.

La extensión de los humedales alrededor del mundo es de aproximadamente entre 7 a 10 millones de km<sup>2</sup>, cerca del 5 al 8 % de la superficie de tierra del planeta (Mitsch & Gosselink, 2015) y según Russi et al. (2013) son 12,8 millones de km<sup>2</sup>. La pérdida se ha acrecentado en el siglo XX incluso perdiendo la mitad de la superficie total, debiéndose principalmente a 5 razones expuestas por los autores anteriores: (1) Drenaje, dragado, y relleno de humedales; (2) modificación del régimen hidrológico; (3) construcción de autopistas; (4) minería y extracción de minerales; (5) y contaminación del agua.

#### **3.1.4 Sistemas de clasificación definitorias de Humedales**

Seguramente uno de los apartados con mayor variación dentro del marco definitorio del ecosistema es su clasificación. Si la definición varía según la perspectiva en que se le mire, la clasificación no se escapa demasiado de esta premisa debido a los diferentes campos científicos y propósitos por los cuales recorrerá la idea general. Por lo tanto, las clasificaciones variarán dependiendo del enfoque, pero seguramente irán enfocadas hacia objetivos similares. Cowardin et al. (1979) propone que las clasificaciones van en la dirección de imponer límites a los ecosistemas naturales para el efecto de inventariar, evaluar, y gestionarlos. Cuatro objetivos principales de una clasificación son identificados por los autores anteriores, estos son: (1) describir unidades ecológicas que tengan ciertos atributos homogéneos; (2) organizar estas unidades en un marco unificado con objetivo de la caracterización y descripción de los humedales, que permitirán tomar decisiones sobre la gestión de los recursos; (3) identificación de unidades de clasificación para inventariar y mapear; y (4) proveer una cierta uniformidad en los conceptos y terminología.

Existen dos tipos de clasificaciones: las horizontales y verticales. Las primeras se basan en un listado simple de distintos tipos basados en características importantes, siendo a veces muy generales por la necesidad de limitar su número en función de su uso en cartografías u otros fines. En su contra está el hecho de

ser términos muy comunes sin ser definiciones aceptadas universalmente. El concepto horizontal se ha usado en mayor medida en las clasificaciones automatizadas obtenidas del procesamiento de imágenes.

El sistema de clasificación vertical emplea un enfoque jerárquico el cual nombra en primera fila las características generales para posteriormente subdividir en unidades más pequeñas para especificar cada tipo. Esta clasificación considera más variables y una más detallada caracterización que la horizontal. Los niveles altos de la jerarquía se relacionan por ejemplo con su ubicación y fuentes principales de agua, en cambio los niveles bajos jerárquicamente son más detallados como por ejemplo tipos de vegetación, substrato, niveles de agua, vida acuática, etc. Este tipo de clasificación ha sido mayormente diseñada mediante una interpretación manual rutinaria.



Tabla 1: Resumen algunos tipos de clasificaciones cronológicamente

Nombre de Sistema	Autor y año
Clasificación de Turbas	Davis (1907)
Circular 39	Servicio de Pesca y Vida Silvestre U.S (1956)
Sistema Internacional de Humedales	RAMSAR (1971)
Clasificación de Humedales Costeros	H.T. Odum et al.(1974)
Clasificación de Humedales y Hábitat de Aguas Profundas de U.S	Cowardin et al. (1979)
Clasificación Hidrogeomórfica de Humedales	Brinson (1993)

Fuente: Elaboración propia en base a Mitsch & Gosselink (2015)

La clasificación mayormente aceptada por representar una convención a nivel mundial, es el “Sistema de Clasificación Internacional de Humedales Ramsar”. La convención, que fue creada el año 1971, pretendía ser un tratado internacional el cual promoviera la conservación de los humedales en sus distintas características representativas como la económica, cultural, científica, y valor

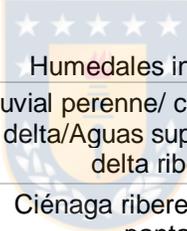
recreacional, dándole un énfasis especial al hábitat de las aves acuáticas migratorias. El número de miembros ha crecido considerablemente desde sus inicios con solo 18 naciones, la cual a la fecha ya suma 169 miembros. Nuestro país, Chile, se unió el 27 de noviembre de 1981 y tiene 13 sitios en la convención.

En la actualidad la red de conservación tiene más de 2,1 millones de kilómetros cuadrados de superficie, significando 2200 sitios en sus 169 miembros activos. Cada uno de estos miembros al formar parte de la lista, según el artículo 3.1 de la Convención deberán “Elaborar y aplicar su planificación de forma que favorezca la conservación de los humedales incluidos en la lista”. Además, dos de sus resoluciones indican la elaboración de planes de manejo para los sitios en cuestión implicando la inclusión de fondos para su ejecución y para la capacitación de personal.

Regresando con la clasificación Ramsar, se debe decir que es un sistema de tipo horizontal en su generalidad, el cual se divide primariamente en tres grupos de humedales: marino/costeros; humedales interiores; y humedales hechos por el hombre. En el Tabla 2 se muestra una comparación de tres sistemas de clasificación, omitiendo el tercer gran grupo del sistema Ramsar. El tipo trabajado en la presente tesis varía de Planos intermareales a Marismas intermareales, siendo la letra G y H respectivamente para las definiciones de la Convención Ramsar.

Tabla 2: Comparación de diferentes clasificaciones definitivas

Convención Ramsar	Servicio de Pesca y Vida Silvestre U.S	Sistema Canadiense
Humedales Marino/Costeros		
A Agua marina < 6m	Marinos submareales	Marisma de aguas superficiales (<2m)
B Sub Estuarios marinos y lechos acuáticos	Marinos submareales de lecho acuático	
C Arrecifes de Corales	Marinos submareales de arrecife	-

D Costas marinas rocosas	Marinos intermareales con fondo rocoso	-
E Playa de arena o dunas	Marinos intermareales no consolidados	-
F Aguas estuarinas	Estuario submareal	Marisma estuarial, agua
G Planosintermareales	Estuarinointermareal con fondo no consolidado	Aguas estuariales, aguas de marea
H Marismas intermareales	Humedal emergente conestuarinointermareal	Marisma de marea
I Humedal intermareal boscoso	Humedales boscosos conestuarinointermareal	Pantano de marea
J Lagoon costero salino	Estuario submareal no consolidado, salino	Aguas estuariales
K Lagoon costero dulce	Estuario submareal no consolidado, dulce	Aguas estuariales
Zk(a) Marino/costero kárstico	Estuario submareal con orilla rocosa	-
 Humedales interiores		
L Deltas permanentes interiores	Fluvial perenne/ ciénaga estuario delta/Aguas superficiales del delta ribereño	Delta ribereño pantanoso
M Ríos y arroyos permanentes	Ciénaga ribereña perenne, pantano	Aguas ribereñas superficiales
N Ríos y arroyos intermitentes	Ribereño intermitente	-
O Lagos de agua dulce permanente Aguas ribereñas (Oxbows)	Litoral lacustre o limnetico	Aguas lacustres superficiales
P Lagos de agua dulce intermitente	Lacustre o litoral ripariano	-
Q Lagos salinos permanentes	Litoral lacustre no consolidado, salino	-
R Lagos salinos intermitentes	Litoral lacustre intermitente, salino	-
S p Pantanos/estanques salinos permanentes	Humedal palustre emergente o fondo no consolidado, salino	Ciénagas estuarinas, pantanos salinos interiores
Ss Pantanos/estanques salinos intermitentes	Humedal palustre emergente o fondo no consolidado, intermitente	Manantial, vertiente o cuenca pantanosa
Tp Pantanos/estanques dulces permanentes (<8 ha)	Humedal palustre emergente o fondo no consolidado, dulce	Cuenca de agua superficial, ciénaga lacustre
Ts Pantanos/estanques dulces intermitentes, suelos inorgánicos	Humedal palustre emergente, intermitentemente inundado	Cuenca de agua superficial

U Turbas no forestadas	Humedal palustre emergente, persistente	Fangal, marismas
Va Humedales alpinos	Humedal palustre emergente, persistente	-
Vt Humedales de tundra	Humedal palustre emergente, persistente	Fangal, marismas, cuenca de aguassuperficiales
W Zonas húmedas dominadas por arbustos	Humedales palustres matorrales arbustivos	Ribereño, planicie, vertiente, flujo o aumento de minerales de pantano
Xf Humedales dulces forestados en suelos inorgánicos	Humedales palustres boscosos	Ciénagas ribereñas
Xp Turbas forestados	Palustres boscosos o humedal de arbustos y matorrales	Fangales planos, plana o turberas pantanosas elevadas
Y Manantiales de agua dulce, oasis	-	Ciénaga Hummock
Zg Humedalesgeotérmicos	-	-
Zg(b) Sistemas cársticos interiores, subterráneos	-	-

Fuente: Modificado de Mitsch & Gosselink (2015)



### 3.1.5 Humedal y caracterización interna

Diferentes tipos de humedales se pueden desarrollar dependiendo de varios factores, la clase marisma intermareal, o con influencia de las mareas, se produce por flujos permanentes de las mareas en zonas costeras, donde la salinidad alta (35 ppt) del océano influencia a zonas más altas en tierra. Nature Serve y NOAA (2008) denomina Marisma costera a las comunidades dominadas por vegetación halofítica herbácea emergente a lo largo de áreas intermareales de baja energía o desembocaduras mareales. El desarrollo de los humedales costeros a nivel mundial se produce generalmente por los deltas de los ríos y zonas estuarinas que desembocan en costas de baja energía, donde en los trópicos los deltas con influencias mareales producen manglares, y en latitudes mayores a 25° comienzan a desarrollarse marismas salados. Según la clasificación de Chapman

(1960<sup>3</sup>, 1976<sup>4</sup>), en América del sur las costas son demasiado frías, accidentadas, y aisladas, lo que impide el desarrollo de manglares, teniendo como especies únicas a *Spartina*, *Limonium*, *Distichlis*, *Juncus*, *Heterostachys*, y *Allenrolfea*.

Factores morfológicos primordiales en este paisaje intermareal poco profundo lo definen tres principales componentes: 1) barras de marea sin vegetación; 2) plataformas de marismas; 3) y los canales. No obstante, morfologías como el estuario, llanura mareal, estanques de marea interiores, cuerpos de agua, son también constituyentes y definitorias de la estructura del humedal. Más adelante se explicarán algunos de estos conceptos.

Características constitutivas como los sedimentos, entradas de agua dulce, morfología de la costa, características de las mareas, y el concepto de estuario, van formando la estructura y dimensiones de la marisma salado.

Hidrológicamente las marismas saladas se encuentran posicionados en áreas que ocasionalmente son inundadas por las mareas altas, pero no por mareas bajas. La hidrología impone una poderosa entrada de distintos componentes que le dan la identidad a este tipo de humedales, los cuales influyen los procesos biológicos-químicos, y los procesos asociados a la fisiografía como la depositación de sedimentos. Tan importante es la hidrología asociada al humedal que puede transformarse en una cualidad que precise los límites bajos y altos de la marisma debido al rango de las mareas, así, por ejemplo, el límite bajo de la marisma será dado por la profundidad y duración de la inundación junto con las características del oleaje, erosión y depositación. Por el otro lado, el límite alto de la marisma, que da paso a las tierras más altas, ya no será inundado frecuentemente por las mareas altas, estando al menos 10 días expuesto a la atmósfera, mientras que la marisma bajo, nunca más de 9 días (Mitsch & Gosselink, 2015).

---

<sup>3</sup> (Chapman V. J., 1960)

<sup>4</sup> (Chapman V. J., 1976)

Considerando lo anterior, el concepto de estuario se hace imprescindible a tomar en cuenta para la definición del ecosistema como tal. Definiendo estuario como un cuerpo de agua costero semi-cerrado que tiene una conexión libre con el mar abierto al menos en forma intermitente, y dentro del cual la salinidad es mensurablemente diferente de la que tiene el mar abierto adyacente (Pritchard, 1967), y por otro lado, el sistema estuarino como el hábitat mareal y de humedales adyacentes normalmente semi-enclaustrados por masas de tierra pero con un acceso, parcial o temporal, a mar abierto (Nature Serve y NOAA, 2008), podemos decir que los conceptos de marisma salado y estuario están ligados fuertemente desde su concepción.

Como el apartado hidrológico, existen patrones de desarrollo influenciados por las condiciones geomorfológicas de la costa que generan esta clase de marisma, uno de estos patrones está asociado a sedimentos marinos reelaborados por la dinámica costera, y el otro, por áreas deltaicas con ríos como principal fuente de sedimentos minerales. Para el primer caso, que es el más común alrededor de las costas del mundo, las condiciones de la costa necesitan tener algunas características dominantes, como por ejemplo, el tener un resguardo de la acción directa del oleaje que impida sedimentación y produzca la suficiente erosión para alterar la dinámica necesitada. En esta línea de costa algunas formas deposicionales permiten este refugio necesario como lo son las “flechas”, “barreras”, y “tómbolos”, que se generan por deriva y corriente litoral (Tarbuck & Lutgens, 2005). Sumado a la característica anterior, los estuarios son asociados comúnmente con marismas, donde en la boca de los ríos se incorpora un nuevo contenido sedimentario y aportes de agua dulce al sistema.

### **3.1.6.1 Canales de marea**

En el interior de la marisma existen dos rasgos fisiográficos característicos que permiten definir de mejor forma su morfología. El primero de ellos son los canales de marea (tidal creeks-tidal channels), los cuales se desarrollan como una red de

irregularidades que posteriormente son rellenadas por el agua bidireccionalmente, sirviendo de nexo para el intercambio de materia-energía entre el cuerpo de agua (estuario) y la marisma. La importancia de los canales de marea es tal que se transforman en un primer control del desarrollo de la costa, impactando en la evolución morfológica de la región (Davis & Dalrymple, 2012). Estos canales al estar expuestos a las subidas de la marea tienen un nivel de salinidad similar al que tiene el estuario circunscrito.

Como se nombraba anteriormente la inundación repetitiva del agua de las mareas en áreas con una superficie plana con drenaje por canales, va generando una constante circulación y transporte de fluidos, nutrientes y sedimentos, los cuales se desarrollan en diferentes escalas (micro-meso-macro). Si bien las condiciones de génesis de estos canales son determinantes para diferenciarlos de canales fluviales, la característica primordial de distinción es el fuerte gradiente espacial del ancho del canal, el cual ocurre en canales de marea superficiales de todo orden.

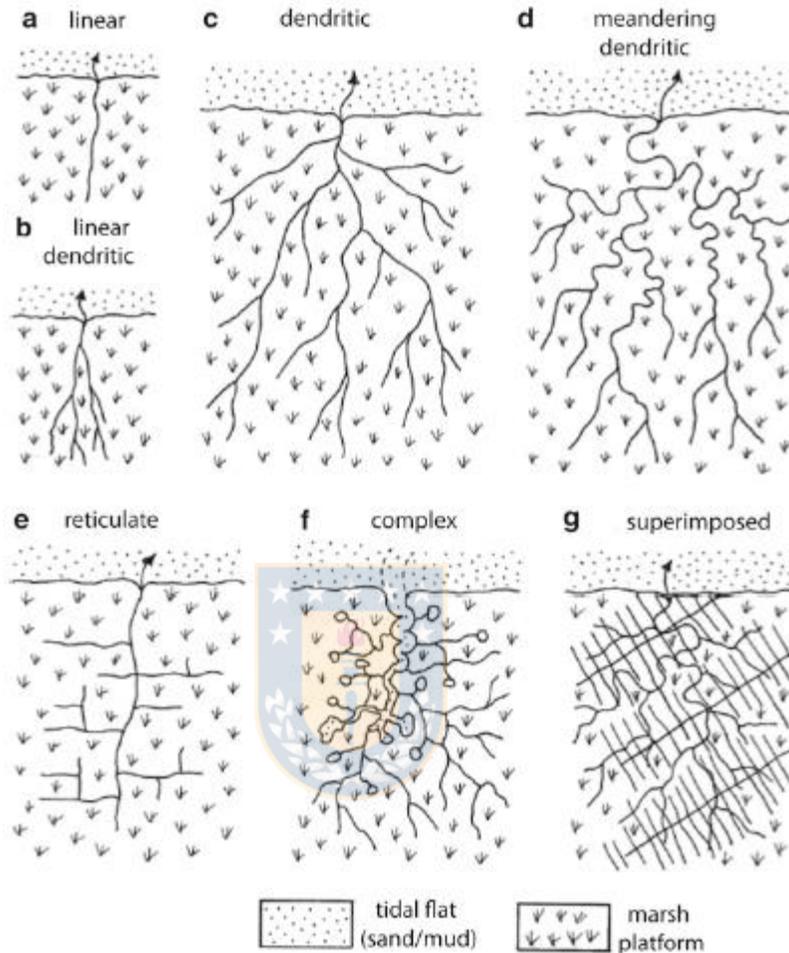
¿Pero entonces, cuál es la génesis de estos canales de marea? La discusión expuesta sobre el mecanismo de creación de estos canales y su morfología rara vez es abordada, por lo que la literatura afín no es amplia sobre la temática (Perillo, Ripley, Piccolo, & Dyer, 1996). Sin embargo, existen algunas definiciones que aclaran el concepto. Chapman (1960), describió este posible mecanismo de génesis de los canales de marea en base a la concentración de agua en las depresiones, guiadas por el flujo laminar durante el retroceso de la marea (ebb). El proceso comienza con el aumento de velocidad del agua en la entrada durante el reflujó de las mareas, acrecentando al ancho y profundidad de las entradas. Los canales se van erosionando y creciendo en tamaño hasta formar meandros, que sería el patrón final. Por otro lado otros autores (Yapp, Johns, & OT, 1917) describen el mecanismo de origen basado en sedimentos asociados a un tipo de

planta herbácea, que al formar montículos, crea la posibilidad de retención de agua que posteriormente alterarán los canales existentes.

Ya explicado parte de su génesis, se debe conocer los tipos de morfología de la red de canales de marea que existen. De acuerdo Pye y French (1993) existen siete categorías de redes en sistemas de marismas: Lineal; dendrítico; dendrítico lineal; meándrico dendrítico; reticulado; complejo; y superpuesto. La variación de tipos de redes se debe principalmente a distintos tipos de sedimentación, vegetación, y diferentes comportamientos de las mareas, pero también existe la presencia de zanjas o acequias realizadas por el hombre que son generalmente identificables por su forma. La figura 3 muestra la clasificación de canales de marea realizada por Pye y French (1993).



Figura 3: Clasificación de canales de marea



Fuente: Pye y French (1993)

Uno de los patrones más comunes de red de canales de marea en planicies mareales y marismas salados, es el dendrítico. En este patrón generalmente el orden que tienen las redes no excede el tercer orden, siendo su relación de bifurcación más cercana a 4. Por otro lado, el patrón reticular tiene su principal característica en el ángulo de 90° formado por los canales. También existen los canales trenzados, los cuales se desarrollan en los sectores más profundos del estuario interior, y se componen de una serie de complejos canales dominados por el reflujó de las mareas, los cuales pueden formar pequeñas barras de arena

con vegetación en su interior. En una similar catalogación están los canales distributarios y los canales interconectados, los primeros son canales dominados por reflujos formados en deltas de pequeño tamaño los cuales nacen en entradas de canales de marea más grandes. Los interconectados nacen y terminan en un canal o unen lagunas con el océano. Por último, están los sistemas con canales paralelos o con ausencia de ellos, los cuales son los más raros de encontrar. Los canales paralelos son indicativos de un patrón de drenaje aún inmaduro desarrollados en sedimentos erodables como limos y arenas de la planicie mareal, además, al ser un patrón no bien definido son asociados a planicies costeras azotadas regularmente por tormentas.

#### **3.1.6.2 Pannes**

Por otro lado, están las llamadas “depresiones” o “pannes”, que definen a las zonas desnudas, expuestas o rellenadas con agua en la marisma. Según Perillo e Iribarne (2003)<sup>5</sup>, estas depresiones se generan por subsidencia debido a la compactación de sedimentos y/o de turba. Más específicamente existen los pannes (channels pans) relacionados con la eliminación de canales de marea, y los pannes salados (salt pans) generadas por hiperzalinización debido al retiro de plantas en zonas bajas o definitivamente la pérdida de vegetación ubicada debajo de restos arrastrados por las mareas.

#### **3.1.6.3 Llanura mareal**

Las planicies de marea, que se forman en áreas donde existe una entrada continua de granos finos (arcillas, limos, arenas finas y muy finas), y donde la principal fuente hidrodinámica es la correspondiente a las mareas y las corrientes de marea (Klein, 1985), son planicies ubicadas en el sector superior de la zona intermareal, teniendo pendientes de lecho muy suaves (Gao S. , 1995). Jackson

---

<sup>5</sup> (Perillo & Iribarne, Processes of Tidal Channel Development in Salt and Freshwater Marshes, 2003)

(1997) lo define como “un área relativamente nivelada de material de grano fino a lo largo de una orilla o alrededor de una isla, alternativamente cubierta y descubierta por la marea o cubierta por aguas poco profundas estériles en vegetación”.

#### **3.1.6.4 Estuario**

Comentado anteriormente, el estuario es una estructura importante dentro del ecosistema de un humedal debido a las propiedades del agua que provee a la fauna y flora del lugar. Perillo (1995) mediante un análisis de las definiciones de otros autores define al estuario como un cuerpo de agua costero semi-cerrado que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de las mareas, dentro del cual el agua de mar entra por una o más conexiones libres con el mar abierto, o cualquier otro cuerpo salino, diluyéndose significativamente con agua dulce derivada del drenaje de la tierra, logrando sostener especies biológicas eurhalinas de cualquier parte o de todo su ciclo de vida.

#### **3.1.6.5 Plataforma de marisma**

Las marismas saladas, características de zonas templadas y latitudes altas (Moore, 2008), se forman existiendo la disponibilidad de sedimento fino (Bartholdy, 2012), en donde la curva deposición debe ser mayor que la curva de erosión. En estas condiciones se da la posibilidad de colonización de hierbas tolerantes a la sal, pastos, y pequeños arbustos, dónde ecológicamente se forma un hábitat rico para invertebrados, aves, y herbívoros salvajes.

#### **3.1.6.6 Estanques de marea interior**

Los estanques de marea interiores tienen tres fuentes de agua (California State Coastal Conservancy and U.S. Army Corps of Engineers, 1998 ), la que

generalmente prevalece es la relativa a las mareas altas, pero además están las fuentes provenientes de las aguas lluvias y del agua subterránea emergente. La pérdida y variación de sus niveles se producirá por drenaje superficial, infiltración, y evaporación.

## **3.2 Humedales en Chile**

### **3.2.1 Estado y localización de nuestros humedales**

Nuestro país por su alto desarrollo latitudinal y bioclimático (Di Castri & Hajek, 1976) presenta distintos tipos de humedales, siendo algunos de estos catalogados con importancia internacional (Sitios Ramsar). Estudios de CONAF-CONAMA en 1999 establecieron en 4,5 millones de hectáreas de humedales en la superficie nacional, significando en ese entonces un 6% del total y un 24,8% protegidas dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas. Este valor hoy en día según muchos estudios espacio temporales debe haber decrecido por algunas de las 5 razones expuestas anteriormente.

Esfuerzos por parte de CONAMA (Comisión Nacional de Medio Ambiente, ahora Ministerio del Medio Ambiente) ha permitido mejorar el conocimiento global de los humedales a lo largo del país. El año 2006 este órgano y entidad realizaron un estudio enfocado en una visión ecosistémica para realizar un sistema de clasificación dentro del marco de la protección y manejo sustentable de la cuenca hidrográfica. Además, autores como Stuardo y Valdovinos (1989), Hauenstein et al. (2005), CAACH (Corporación Ambientes Acuáticos de Chile, 2005), Faúndez et al. (2006), EULA (2011), Fariña y Camaño (2012), y Martínez (2014), han colaborado con mejorar el entendimiento y catastro de los humedales en nuestro país.

Valorando los trabajos anteriores se puede hacer un recorrido general por las zonas y regiones del país, logrando agrupar distintos tipos de humedales asociados fuertemente a las condiciones climáticas.

Desde norte a sur el desarrollo del ecosistema tiene cambios de tipo y ubicación, lo que seguramente no cambia el marco global de manejo asumiendo ésta en la cuenca hidrográfica. Pero enfocándonos en el desarrollo de los humedales en las distintas zonas, debemos empezar inmediatamente con el sector norte de nuestro país. En primer lugar, se encuentran los humedales Altoandinos, ubicados en la región denominada La Puna de los Andes Centrales. Los humedales presentes en estos lugares se asocian con vegas y bofedales vinculadas a cuencas andinas endorreicas altamente frágiles, siendo vulnerables a la intervención antrópica, significando el hábitat de aves migratorias o estacionarias y de gran variedad de organismos se hace indispensable el manejo de estos espacios. CONAF (2003) elaboró un plan de acción para la conservación y uso sustentable de humedales altoandinos, entre los cuales se distinguen los siguientes: Lago Chungará; Laguna Cotacotani; Salar de Sutre; Salar de Huasco; Salar de Coposa; Salar de Ascotán; Salar de Tara; Salar de Aguas Calientes; Salar de Pujsa; Sistema Hidrológico de Soncor; Sistema de Lagunas Miscanti y Miñiques; Salar de Punta Negra; Salar de Lagunas Bravas; y Complejo Lacustre Lagunas del Negro Francisco y Laguna Santa Rosa de Maricunga.

Más al sur, en la región de Coquimbo, se enclavan en la zona costera un sistema de humedales diferenciados, según CAACH (2005), en humedales de playa y humedales lagunares. Las características físicas del enclave del sistema costero son bahías abiertas y protegidas, y en desembocaduras de los ríos y esteros. Cada uno de estos humedales son estuarios de origen natural y de alimentación continental y litoral.

Ya insertos en la zona centro sur, Fariña y Caamaño (2012) identifican entre la latitud 30°S y 41°40'S, 412 humedales costeros con una superficie que abarca

las 38167 ha. El anterior trabajo concluye que los humedales costeros de esta zona tienen superficies menores a 10 ha, concentrándose la mayor área en el río cruces, desembocadura del río Bío Bío, y Puerto Saavedra. Los autores hacen hincapié en darle importancia a los ecosistemas localizados en las comunas con mayor densidad poblacional que contienen alrededor de 25% de los humedales costeros de la zona estudiada como Coquimbo, Viña del Mar, Valparaíso, Talcahuano, y Valdivia.

Algunos de los humedales más representativos de esta zona son: Humedal de Mantagua; Humedal el Batuco; Vichuquén; Mataquito-Maule; desembocadura río laguna reloca; ciénaga del Name; Colbún-Machicura; Laguna el Maule; humedal Rocuant-Andalién; humedal Lengua; Humedal Los Batros; Humedal Tubul-Raqui; Lago Budi; Lago Caburgua; Lago Colico; Lago Villarrica; (48° S – 56° S); Río Valdivia; etc.

Más al sur de nuestro país en las regiones de Aysén - Magallanes las condiciones climáticas y geológicas dan el paso a humedales con distintos tipos de factores de creación y forma. De alrededor el Golfo de Penas hasta la latitud de 56° S existe la “turba magallánica”, superficie correspondiente al 17% del territorio continental de Magallanes (Región), y significando el uso como sustrato y componente en la mejora de suelos. Los musgos y especies anfibias son los principales formadores de estas superficies. Además, están los “Mallines”, con mayor ubicación en el extremo sur, que tienen como lugares de formación sectores hundidos donde el agua se acumule y tenga el impedimento de percolación debido a sustratos geológicos impermeables. Su condición generadora es a partir de sedimentos eólicos y aluviales junto con albergar una gran cantidad de vegetación que producirá suelos ricos en materia orgánica (CONAMA, 2006).

En nuestro país existen 12 humedales catalogados RAMSAR y que gran parte de ellos incluyen un grado de protección, ya sea, como monumento natural,

parque nacional, reserva nacional, y santuario de la naturaleza. Estos sitios están bajo la responsabilidad de CONAF en su rol de secretaría técnica de la convención de humedales en Chile desde el año 2005. Como se explicaba anteriormente la mayor parte de estos humedales se ubican en el norte de nuestro país (8) y el resto se reparte en la zona centro sur (4).

Tabla 3: Humedales Ramsar en Chile

Sitios RAMSAR	Localización	Tipo de humedal	Superficie hectáreas	Otra protección
Salar de Surire	Región de Arica Parinacota, Provincia de Parinacota	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos	15858	Monumento Natural
Salar de Huasco	Región de Tarapacá, Provincia de Iquique	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos	6000	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos
Salar de Tara	Región de Antofagasta, Provincia del Loa	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos	96439	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos
Sistema Hidrológico Soncor	Región Hidrológico Antofagasta, Provincia HidrológicoLoa	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos.	67133	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos.
Salar de Pujsa	Región Hidrológico Antofagasta, Provincia HidrológicoLoa	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos	17397	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos
Aguas Calientes IV	Región de Antofagasta, Provincia de Antofagasta	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos.	15529	Lagunas salobres permanentes asociadas a salares altioplánicos
Laguna del Negro	Región de Atacama, Provincia de Copiapó	Lagunas salobres permanentes	62460	Lagunas salobres

Francisco y Laguna Santa Rosa		asociadas a salares altioplánicos		permanentes asociadas a salares altioplánicos
Laguna Conchalí	Región de Coquimbo, Provincia de Choapa	Humedal costero de origen albuférico	34	Humedal costero de origen albuférico
Parque Andino Juncal	Región de Valparaíso, Provincia de los Andes	Vegas, ríos, manantiales, esteros, flujos subsuperficiales de agua y glaciares, insertos en estepas altoandinas, de la zona de Matorral Mediterráneo	13796	Vegas, ríos, manantiales, esteros, flujos subsuperficiales de agua y glaciares, insertos en estepas altoandinas, de la zona de Matorral Mediterráneo
El Yali	Región de Valparaíso, Provincia de Valparaíso	Lacustre, palustre, costero. Albuférico, cuerpos de agua naturales y artificiales. Salinas artificiales	520	Lacustre, palustre, costero. Albuférico, cuerpos de agua naturales y artificiales. Salinas artificiales
Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter	Región de los Ríos, Provincia de Valdivia	Ribereño, léntico, perenne con bañados intermareales	4877	Ribereño, léntico, perenne con bañados intermareales
Bahía Lomas	Provincia de Magallanes, Provincia de Tierra del Fuego	Marino costero, con extensas planicies intermareales	58946	Marino costero, con extensas planicies intermareales

Fuente: Elaboración propia

### **3.3 Teledetección y Sensoramiento Remoto para la detección-clasificación de Humedales**

#### **3.3.1 Fundamentos de Percepción remota y conceptos de la imagen digital**

Para llevar a cabo los objetivos con su respectiva metodología se necesitan conocer fundamentos del sensoramiento remoto junto con ciertos conceptos clave que inciden en el tratamiento de imágenes de sensores - multiespectrales y de radar -, con la finalidad de introducir sin ahondar en conceptos matemáticos profundos afines.

El sensoramiento remoto es la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno mediante un análisis de los datos obtenidos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno (Anji, 2008). Esta capacidad abrió muchas variantes para obtener información en zonas a primeras luces inaccesibles o con un costo de exploración elevado, lo que sugirió un desarrollo prolífero en pocas décadas de desarrollo. Así en el área de la percepción remota, las imágenes de satélite son empleadas como un apoyo valioso en la prospección del medio ambiente en áreas tan variadas como agricultura, silvicultura, urbanismo y pesquería, entre otras (Lira, 2010).

De este modo a fines de los 60's, los satélites meteorológicos con una escasa resolución espacial como el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de la administración Oceanográfica y atmosférica de Estados Unidos (NOAA), abrieron una nueva era para la humanidad. Posteriormente el programa Landsat en los 70's se enfocaba en la adquisición de información de recursos naturales, de ahí en más los avances en tecnologías de cohetes y sensores a aumentado largamente la obtención de imágenes por percepción remota (Gao J. , 2008 ). Los primeros tipos de satélites fueron los meteorológicos con el AVHRR y sus cinco bandas espectrales, por otro lado, los satélites oceanográficos como el SeaWIFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) aprovechó las 8 bandas espectrales que ostentaba para adquirir datos cuantitativos de las propiedades

biópticas y biogeoquímicas oceánicas a escala mundial. En lo relacionado a los satélites de recursos naturales multiespectrales, existe una gran variedad que aprovechan la luz visible y el infrarrojo cercano como Landsat, SPOT, IRS, ASTER, MODIS, ALOS, Sentinel (2-3), etc. También están las imágenes satelitales de alta resolución con una muy fina resolución espacial que lograron equiparar a las realizadas por vuelos, llegando a los metros y sub metros de resolución. Estas imágenes en su mayoría son pancromáticas siendo algunos ejemplos, IKONOS, Quickbird, OrbView-3, Cartosat, WorldView, GeoEye-1, etc.

Por otro lado, están las imágenes Hiperespectrales y las de Radar. Las primeras tienen la bondad de ser más finas espectralmente que las multiespectrales logrando un ancho de banda menor en la misma longitud de onda, logrando así una mayor precisión en la detección de los objetivos en tierra. Algunas de las fuentes de esta información son los sensores aerotransportados como el AVIRIS y el satélite Hyperion. Las segundas (Radar) miden las variaciones espectrales de las microondas, y la arquitectura de su sensor activo le permite obtener información independientemente de las condiciones atmosféricas actuales, además de no depender de una fuente de luz natural para la captación de los datos en tierra debido a que poseen su propia fuente de radiación de microondas, permitiendo obtener imágenes nocturnas.

Con el objetivo de aclarar ciertos temas se verán más adelante con mayor profundidad las variantes de imágenes multiespectrales y radar (Apertura de radar sintético).

### **3.3.1.1 Fuentes de energía, radiación y espectro electromagnético**

Cuando partimos del principio de obtener información a distancia de un objeto se deberán tener en cuenta tres principales elementos de un sistema de teledetección los cuales permiten ver el objetivo enmarcado. Estos elementos son: el sensor, el objeto observado y un flujo de energía que construya una relación entre ellos (Chuvieco, 2002). Esta relación se puede desarrollar

mediante reflexión, emisión, o emisión-reflexión, logrando de esta forma la toma de información por parte del sensor. Una vez conocido esto se necesita comprender cuál es el mecanismo por el que la fuente de energía provee de información al sensor, esta energía se desarrolla en forma de radiación electromagnética.

Esta radiación electromagnética consiste de dos campos, uno eléctrico y uno magnético. El primero consiste en un campo eléctrico el cual varía en magnitud y dirección perpendicular a la dirección en que viaja la radiación. El segundo es el campo magnético, el cual se ubica en ángulo recto al campo eléctrico. Estas dos características de la radiación son muy importantes para entender la física de las ondas electromagnéticas formadas por la longitud de onda y la frecuencia.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos picos continuos de onda o la longitud de un ciclo de onda. Esta se puede medir en metros o por factores de metros como nanómetros (nm,  $10^{-9}$  metros), micrómetros ( $\mu\text{m}$ ,  $10^{-6}$  metros) , o centímetros (cm,  $10^{-2}$  metros) (Kumar, 2005). La frecuencia hace alusión al número de ciclos de una onda pasando por un punto fijo por unidad de tiempo, la que es medida en hertz (Hz) o 1 ciclo por segundo.

La longitud de onda se expresa en la siguiente fórmula:

$$c = (\lambda) * n$$

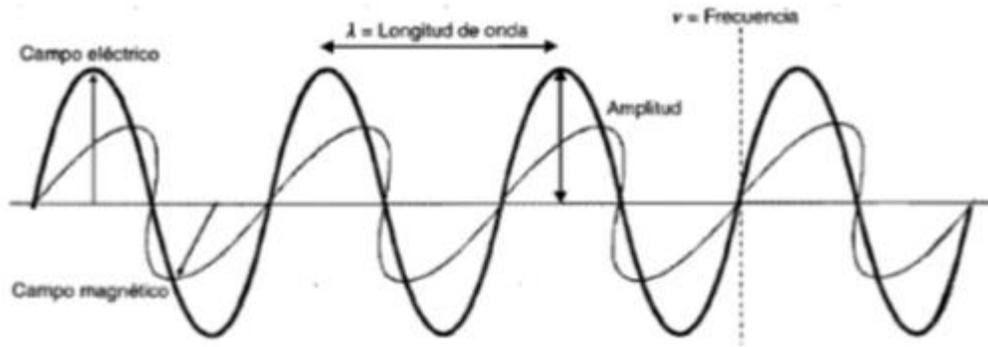
donde:

( $\lambda$ )= Longitud de onda (m)

n = Frecuencia (ciclos por segundo, Hz)

c = Velocidad de la luz ( $3 * 10^8$  m/s)

Figura 4: Comportamiento de las ondas del campo eléctrico y magnético



Fuente: Chuvieco (2002)

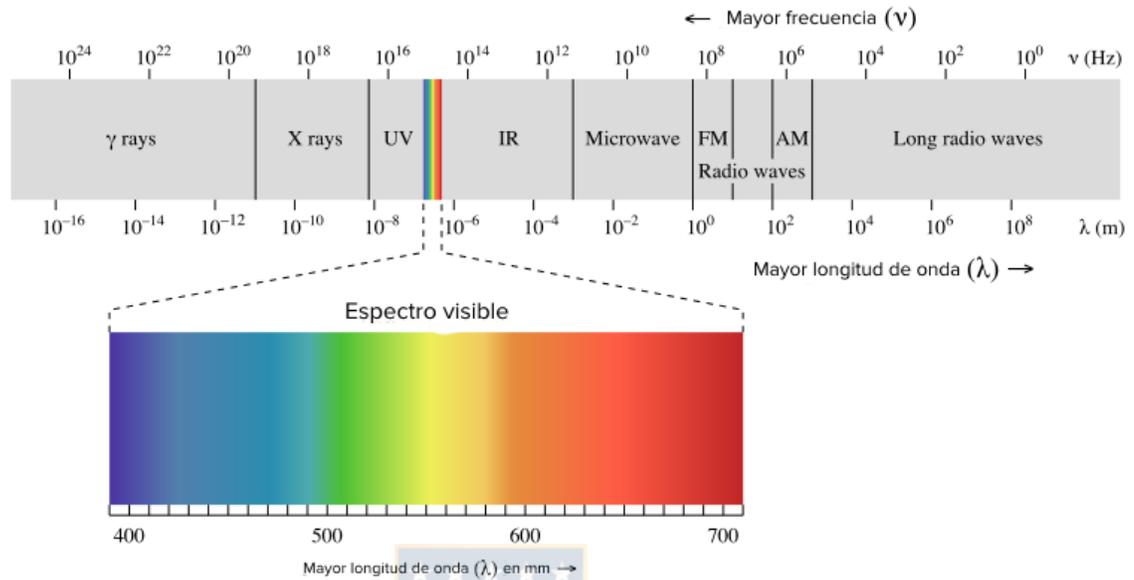
### 3.3.1.2 Espectro electromagnético

Todo lo que nuestro ojo puede ver e interpretar en base a la luz disponible, realmente es solo una porción de la radiación que existe en realidad en nuestro alrededor. Lo que podemos ver, y ésta gran porción de energía que no puede ver el ser humano, se denomina Espectro Electromagnético. Este busca dar un orden a la longitud de onda, frecuencia, o energía de la radiación que nos rodea, expresándola en distintas unidades de medida (m-cm- $\mu$ m-nm-Å).

La partícula fundamental que da la posibilidad a las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético se denomina fotón. Esta partícula subatómica sin masa comprende la radiación emitida por la materia cuando se excita térmicamente o por procesos nucleares (Kumar, 2005), siendo la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética.

De acuerdo a la posibilidad de medir y definir la energía radiante en relación a su longitud de onda o frecuencia, se puede ordenar en una serie de bandas de comportamiento similar en base a su radiación electromagnética. Así, para una mayor comprensión gráfica del espectro, la figura 5 simplifica lo anterior:

Figura 5: Espectro electromagnético con énfasis en el visible



Fuente: <https://es.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

### 3.3.1.3 Interacciones de la radiación electromagnética con la atmósfera y con los materiales de la superficie de la tierra

Cuando la radiación electromagnética es recibida por un sensor, ésta ya ha pasado dos veces por la atmósfera. Esta ruta provoca varias alteraciones en la energía que se traslada, modificando su velocidad, frecuencia, intensidad, distribución espectral, y dirección (Anji, 2008). La atmósfera está compuesta de varios gases, entre los cuales tienen una mayor interacción con la energía electromagnética el anhídrido carbónico, ozono, oxígeno atómico, y vapor de agua. En conjunto estos gases producen algunos efectos que provocan una disminución de la energía inicial en el proceso, resultando un 50% de la que llega al suelo. Estos efectos son: la absorción; dispersión; y emisión. El primero ocurre cuando la energía de algunas bandas del espectro es absorbida, determinando la observación a las bandas que menos presentan este efecto. La dispersión

ocurre cuando la energía electromagnética reacciona con partículas y gases de la atmósfera, produciéndose dispersión de Rayleigh cuando las longitudes de onda afectadas son menores al diámetro de la partícula, y dispersión de Mie cuando los diámetros son similares. Por último, la emisión, es un efecto que se desarrolla en mayor medida en el infrarrojo termal producto de la energía emitida por la atmósfera.

Con el resultado de las anteriores interacciones de la radiación con la atmósfera, la energía que prosigue su camino e incide en la superficie de la tierra, presenta tres distintas interrelaciones de energía con las entidades localizadas en tierra. Esta incidencia de energía ( $E_I(\lambda)$ ) puede ser reflejada ( $E_R(\lambda)$ ), absorbida ( $E_A(\lambda)$ ), y/o transmitida ( $E_T(\lambda)$ ). La figura 6 desglosa las interacciones que ocurren.

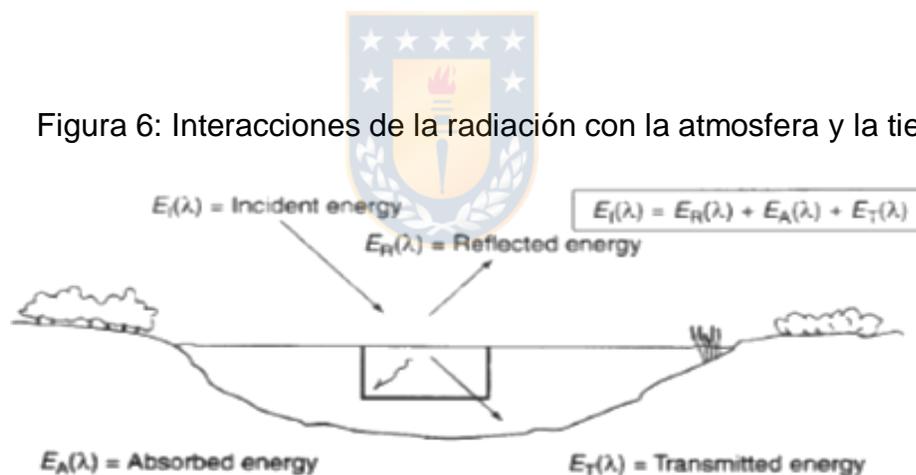


Figura 6: Interacciones de la radiación con la atmósfera y la tierra

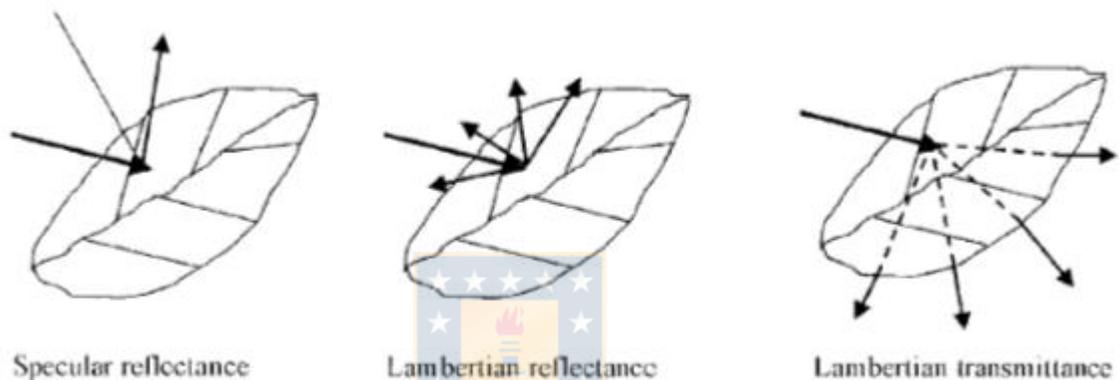
Fuente: (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004)

La energía reflejada ocurre cuando la radiación rebota en el objetivo y es redirigida. La absorción resulta cuando la energía es absorbida dentro del objetivo. Por último, la transmisión, ocurre cuando la radiación pasa a través del objetivo en tierra.

La forma geométrica en que el objetivo refleja la energía es también una importante consideración (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004). La superficie de

la tierra es rugosa lo que provoca una reflexión diferente dependiendo de la situación, de esta manera cuando la superficie tiende a ser plana la reflexión es especular generándose un ángulo de incidencia igual al de reflexión. Cuando la superficie tiende a ser rugosa la reflexión es difusa o lambertiana, en la cual la energía toma diferentes direcciones.

Figura 7: Ilustración del modelado óptico de hojas bi-lambertianas



Fuente: Liang (2004)

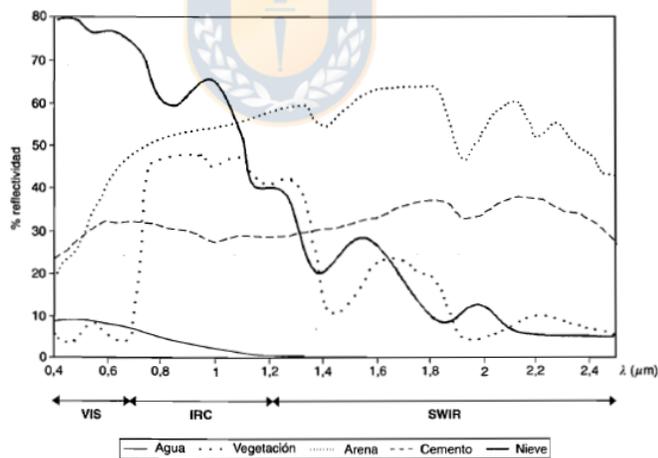
#### 3.3.1.4 Respuesta espectral de las reflectancias

Como se ha dicho anteriormente los objetos en la superficie reflejan la radiación incidente, interacción que se conoce como respuesta espectral (Anji, 2008). Cada objeto y material en la superficie tiene una curva de reflectancia distinta dependiendo de su longitud de onda en el espectro electromagnético. Al margen de que un material pueda tener una reflectancia única, no significa que este no pueda cambiar este valor. Varios factores influyen en la curva de reflectancia del material, entre los cuales están: orientación del sol; la altura de sol o el ángulo de elevación del sol; la dirección en que apunta el sensor con respecto al nadir; y la naturaleza misma del material u objetivo.

Algunas cubiertas importantes para el análisis de ciertos patrones en la tierra han sido estudiadas en base a su característica espectral y desde el punto de vista

de la teledetección. Estas cubiertas son: la vegetación; el suelo: y el agua. Para el tipo de material compuesto por vegetación es importante considerar las propiedades de la hoja (geometría) y las características de esta que generan una energía reflejada con una determinada longitud de onda (pigmentación de la hoja, su espesor, composición, cantidad de agua, etc). El suelo descubierto a su vez también depende de varios factores que determinan su reflectancia como su color, contenido de humedad, contenido de carbonato, y el contenido de óxido de hierro. En el caso del agua, la reflectancia se caracteriza por ser baja con respecto a las dos anteriores, siendo a lo más un 10 % de energía incidente la que es reflejada (Tempfli, y otros, 2009), con variación al ser turbia (contenido de material en suspensión) o tener distintos niveles de plantas en su interior, variando el contenido de clorofila.

Figura 8: Reflectividad de distintas cubiertas



Fuente: Chuvieco (2002)

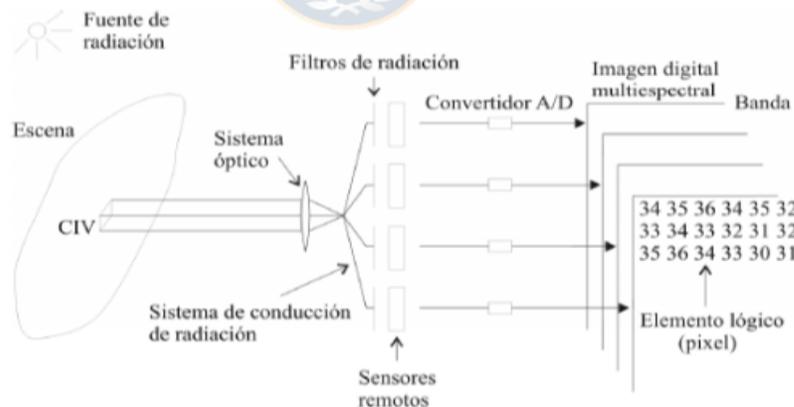
### 3.3.2 Conocimiento preliminar de la imagen y propiedades de la información del sensor remoto

#### 3.3.2.1 Conceptos preliminares

El producto principal de los sensores remotos básicamente es una matriz de valores que en su representación gráfica (lógica) es una imagen. El proceso de

obtención de esta imagen va a depender de una fuente de radiación ondulatoria o corpuscular que interaccione con un elemento físico de la escena llamado campo instantáneo de vista (CIV) (Lira, 2010), que representa una subárea de una escena que forma parte de un sistema físico, cuyo resultado es también radiación no asociada necesariamente a la misma energía o longitud de onda original. Posteriormente, esta radiación es guiada por unos sensores hacia diferentes filtros que seleccionan la energía en varios intervalos o longitudes de onda. Así los sensores o detectores generan una gráfica recalibrada con valores de 255 para el CIV con mayor brillo de escena, y 0 para el con mayor oscuridad. En este punto se almacena el valor en algún medio de almacenamiento en un orden determinado por su energía, formando al elemento lógico llamado pixel, el cual es elemento fundamental de la imagen. El proceso anterior es explicado en en la figura 9.

Figura 9: Generación de una imagen digital multispectral a partir de una escena



Fuente: Lira (2010)

### 3.3.2.2 Número digital (DN)

Este es una de las dos propiedades básicas del pixel, la otra es su ubicación bidimensional. Los DN de un pixel es la representación de la radiación recibida por el sensor por cada banda espectral, ésta a su vez es afectada por varios

factores que modifican el valor en la imagen, como la radiación de la atmósfera, la sensibilidad del sensor, y la porción de tierra que muestrea el sistema, aspectos nombrados anteriormente. Este DN es un número entero y varía de banda a banda, donde el rango teórico de valores de píxeles en la imagen es determinado por un número de bits para cuantificar niveles de energía. El rango de píxeles más común es el de 8 bits, que se desglosaría como  $2^8$  o 256 valores de DN. Esta propiedad se relaciona con la resolución radiométrica definida a continuación.

### **3.3.2.3 Propiedades del sensor remoto**

Uno de los aspectos principales de la imagen es su resolución, siendo esta no solo importante en su componente espacial, sino que además cobran relevancia otras propiedades fundamentales para entender la imagen. Existen cuatro dimensiones en una imagen, estas son: (1) espacial; (2) espectral; (3) radiométrica; (4) temporal.

#### **3.3.2.3.1 Resolución espacial**

Como se anteponeía anteriormente, la resolución espacial es la propiedad de lograr distinguir dos objetos adyacentes espacialmente en el suelo (Gao J. , 2008 ), o también como el objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen (Chuvienco, 2002). La resolución espacial se asocia íntimamente con la longitud focal de la cámara y la altura que tiene esta sobre la superficie, determinando el nivel de detalle que tiene la imagen.

Esta propiedad de la imagen es importante a la hora de establecer marcos de separación de píxeles cuando se utilizará un método de clasificación, debido a la mezcla de información que pueda existir en un píxel con una resolución grande, siendo más preciso cuando la resolución es más fina.

### **3.3.2.3.2 Resolución espectral**

Esta propiedad de la imagen va directamente enfocada en el número de bandas espectrales que pueda captar el sensor en el espectro electromagnético. Las disponibilidades de imágenes con distintos tipos de resolución espectral varían dependiendo de la cantidad de bandas que estas tengan, así, cuando la imagen tiene alrededor de 10 bandas se le llama multiespectral, superespectral cuando tiene más de 10, y cuando tiene 100-200 o más se les designa el nombre de hiper-espectral. Cada una de estas imágenes tienen además las otras propiedades vistas en este apartado y existen de libre acceso en páginas web como disponibles bajo un precio específico.

### **3.3.2.3.3 Resolución radiométrica**

La resolución radiométrica es determinada cuando la señal reflejada es capturada como una señal analógica y es convertida a un número digital o a un valor en escala de gris. Así, esta se define como el número de escala de grises (Kumar, 2005) que puede ser grabado en un pixel, y el rango de valores (N) que puede tener la imagen como niveles digitales se representa como  $2^R$ , donde r es la profundidad radiométrica. En la imagen los valores más cercanos a 0 son más oscuros y los más grandes son más claros, de esta forma existen sistemas de 256 niveles (8 bits) como de 2048 (11 bits), entre otros. La imagen mientras mayor resolución radiométrica contenga, mejor se interpretará (Chuvieco, 2002).

### **3.3.2.3.4 Resolución temporal**

Esta propiedad de la imagen es muy importante debido a la posibilidad de conocer la frecuencia del sensor de pasar por un mismo lugar y obtener información. Además, será un aspecto primordial a tener en cuenta en cualquier trabajo con el objetivo preponderante de temporalidad, como por ejemplo en la variable meteorológica se necesitaría información de un sensor que tenga una alta periodicidad.

### **3.3.3 Imágenes Multiespectrales y Apertura de Radar Sintético en el mapeo de humedales**

El trabajo posterior se enfocará principalmente en el tipo de imágenes multiespectral y SAR (apertura de radar sintético), por lo cual se considera esencial repasar conceptos asociados a estos dos tipos de imágenes.

#### **3.3.3.1 Sensor pasivo e imágenes multiespectrales**

La virtud de los sensores que captan este tipo de imágenes, es recoger información procedente de la energía reflejada por los rayos del sol y la temperatura que desprenden las cubiertas terrestres. Según Chuvieco (2002) existen tres tipos de sensores pasivos, estos son: sensores fotográficos; exploradores de barrido y empuje; y las cámaras de vidicon. El primer tipo de sensor funciona en base a la impresión de los objetos que capta sobre películas fotosensibles, controlando las condiciones de exposición con un sistema óptico. Este tipo de imagen emplea el tipo de película pancromática, puede poseer una cámara mono o multibanda, el ángulo de observación permite definir la imagen como vertical u oblicua, y su altura se define como aérea o espacial. El segundo tipo de imagen, obtenidas por un explorador de barrido y capturadas por sensores óptico electrónicos, captura la radiancia convirtiéndola en una señal eléctrica codificada en un valor numérico. El otro explorador, de empuje, mejora al anterior método de captación de información eliminando la oscilación del espejo en el caso anterior, produciendo una mejora en la resolución espacial y reduciendo algunos problemas geométricos. El último sensor es el sistema vidicon, el cual puede recolectar información en forma pancromática o multibanda.

Una de los productos de los sensores anteriores son las imágenes multiespectrales, que permitieron abrir grandes posibilidades al sensoramiento remoto posteriores a las imágenes aéreas. Este tipo de imágenes es capturada por estos sensores pasivos con la capacidad de poder reunir información en las porciones del espectro electromagnético del visible y el infrarrojo cercano. Sin

embargo, hoy en día existen sensores multiespectrales que pueden captar la reflectancia de longitud de ondas mayores a las nombradas anteriormente e incluso datos de infrarrojo medio y bandas termales (Tiner, Lang, & Klemas, 2015), un claro ejemplo son las imágenes captadas por el sensor Landsat 8 Oli-Tirs lanzado el año 2013.

Una gran variedad de sensores con la capacidad de captar imágenes multiespectrales se han lanzado desde hace ya más de cuatro décadas, mejorando sus propiedades y logrando una mayor capacidad de utilización en la detección de humedales.

Tabla 4: Comparación de Sentinel-2 con misiones importantes

Descripción	Landsat 1-8	SPOT	Rapideye	Sentinel - 2
Vida de la misión	1972 - Presente	1986 - Presente	2009 - Presente	2015 - Presente
Instrumento Principal	Scanner	Pushbroom	Pushbroom	Pushbroom
Repetición de ciclos (días)	16	26	Diario	5
Ancho de franja (km)	185	2x60	77	290
Bandas espectrales	7	4	5	13
Resolución espacial (metros)	30, 60	2.5, 10, 20	5	10, 20, 60
Costo	Gratis	Pagadas	Pagadas	Gratis

Fuente: León (2015)

Muchos autores han considerado particularmente beneficiosa para mapear humedales la porción del espectro electromagnético del infrarrojo. Esta porción del espectro tiene una alta reflectancia para la vegetación en el infrarrojo cercano y una alta absorción para el agua. Diferentes procedimientos se utilizan para aprovechar las propiedades de estas bandas y lograr mapear humedales, siendo alguna de estas la utilización de índices vegetacionales y la clasificación supervisada o no supervisada en base a las entidades con peak de reflectancias para valores buscados (vegetación). Pero, además de la resolución espectral, la resolución espacial cobra mucha importancia para realizar un mapeo de humedal

mediante algún tipo de clasificación. La resolución espacial es una propiedad que se hace importante al buscar un tipo de clasificación, debido a que la estructura morfológica y lo pequeño de los parches de los humedales es compleja, haciendo difícil determinar los límites que varían por temporada y estación. Por lo anterior, no cualquier imagen serviría para obtener una clasificación con un porcentaje alto de exactitud, dependiendo la elección de la imagen a trabajar en gran medida del objetivo que se busca, por lo que el investigador y usuario de los datos captados por el sensor remoto debe tener un conocimiento sólido de los factores que deben considerarse y las técnicas utilizadas para realizar cualquier tipo de evaluación centrados en la precisión (Jin, 2014). Entonces, la resolución espacial para mapear humedales no es comúnmente trabajada con resoluciones demasiado gruesas, aunque estas tengan una alta resolución temporal (Tiner, Lang, & Klemas, 2015). Según este mismo autor, respaldado por diferentes investigadores, algunos tipos de imágenes multiespectrales captadas por sensores de mediana resolución espacial como Landsat TM y ETM+ (30 metros) y SPOT (8-20 metros), son insuficientes para identificar pequeños parches de humedales con una morfología compleja. Además, la unidad mínima de mapeo o MMU, por sus siglas en inglés (minimum mapping unit), que especifica el humedal más pequeño que puede salir en el mapa, debe ser considerada en base a la resolución espacial disponible.

Por todas estas razones, imágenes como Landsat mss (80 metros de resolución espacial) y posteriores misiones (30 metros), como de los sensores MODIS (250-500-1000 metros) y las primeras misiones IRS, tendrían desventajas para el uso de clasificación de humedales al presentarse con mayor frecuencia píxeles mezclados.

Por otra parte, la resolución temporal también cobrará importancia debido a la dinámica fenológica e hidrológica del sector correspondiente. Esta característica

se resalta en cuando se busca realizar investigaciones o estudios multi-temporales y ver las relaciones con una alta frecuencia de tiempo.

### 3.3.3.2 Sensor activo, Radar, e imágenes de Apertura de Radar Sintético

Hablando de los sensores activos se debe partir por nombrar la capacidad que estos tienen de emitir un haz energético que hace posible obtener reflexión de los objetos o retrodispersión, así, una vez se produzca, pueda ser captada por el sensor. Los sensores activos se pueden separar en dos categorías: con imágenes y sin imágenes (ejemplos: Lidar-Radar-SONAR). El radar es un sistema sensor activo que permite obtener imágenes empleando radiación coherente en la región de microondas, siendo uno de los más conocidos sensores activos.

Figura 10: Principios de emisor-receptor del sensor activo



Fuente: <http://cartografiatematicaequipo2.blogspot.com/p/eficacia-sde-los-mapas.html>

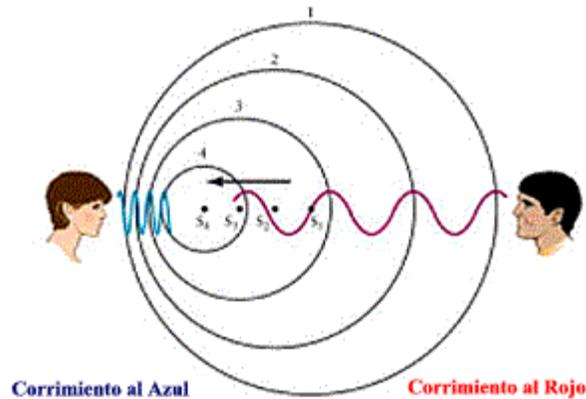
La palabra radar es un acrónimo de “radio detection and ranging” o en español “detección y medición de distancias por radio”. Como su nombre lo indica, el radar fue desarrollado como medio para detectar la presencia de objetos, distancia, y

a veces su posición angular mediante el uso de ondas de radio. Este proceso implica la transmisión de ráfagas cortas, o pulsos de energía de microondas en la dirección de interés, registrando así la fuerza y el origen de ecos o reflejos recibidos desde el campo de visión del sistema (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004). Según Lillesand (2004) las principales características de este sensor activo es que es capaz de penetrar la atmósfera bajo prácticamente cualquier condición, así, dependiendo de la longitud de onda en acción, la energía de microondas puede traspasar la neblina, la lluvia ligera, nieve, nubes, y humo.

También cabe mencionar que el segundo tipo de sensor activo, que no contiene imagen, son los altímetros y dispersómetros. Estos dispositivos sensores en gran medida toman información en forma de perfil en una dimensión. Los altímetros de radar se utilizan para medir la altitud (en aeronaves), y para elaboración de mapeo topográfico junto con medir la altura sobre el nivel del mar (Natural Resources Canada, 2003).

El problema en un comienzo de estos sensores era la baja resolución que presentaban debido al estrecho diámetro de la antena que portaban. Este era el problema del radar lateral aero-transportado (SLAR). Sin embargo, el radar de apertura sintético (SAR), logró evitar este problema a través de un procesado y registro que le permitían sintetizar efectos de una antena muy larga con una antena física corta. El sistema SAR opera mediante la detección de la frecuencia Doppler, la cual se produce cuando la frecuencia de onda cambia en función de las velocidades relativas de un transmisor y un reflector, registrándose los pulsos de un objetivo en dos tiempos distintos de la trayectoria.

Figura 11: Principio del efecto doppler



Fuente: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/lentiscal/2-CD-Fiisca-TIC/2-5VibracionesyOndas/efectodoppler.htm>

### 3.3.3.2.1 Ondas de radar y longitud de onda

Como toda onda electromagnética, las ondas de radar también tienen su lugar en el espectro con su determinada frecuencia y longitud de onda, representando una región bastante extensa. Estas microondas tienen códigos específicos designados para garantizar la seguridad militar en los comienzos del desarrollo de la investigación del radar, algunas provistas en la segunda guerra mundial. Si bien las ondas de radar no captan información de temperatura o color, el plus que incorporan es la capacidad de detectar la rugosidad de la superficie, conductividad eléctrica, e información de humedad del suelo. Las longitudes de microondas comúnmente usadas en el sensoramiento remoto son: la banda X (2,4-3,8 cm); La banda C (3,9-7,5 cm); la banda L (15-30 cm); y la banda P (30-100 cm) (Tiner, 2015).

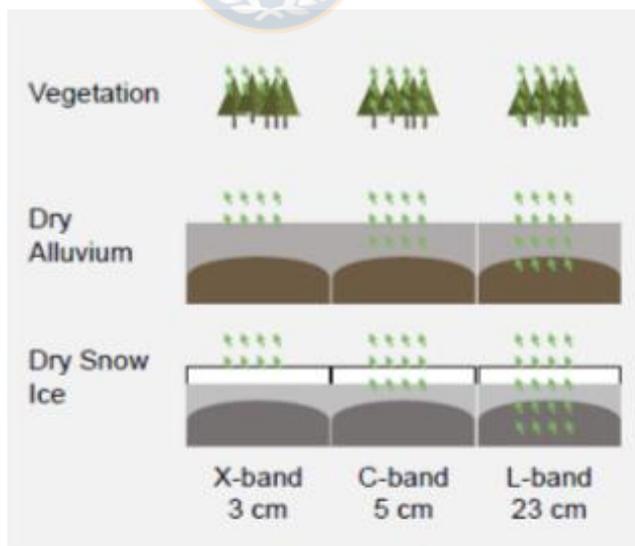
Cada una de estas bandas tiene el potencial de penetrar el dosel de la vegetación y registrar áreas inundadas, así, mientras mayor sea la longitud de onda mayor será la penetración de estas.

Tabla 5: Bandas de radar, frecuencias y longitudes de onda

Nombre de banda	Longitud de onda (cm)	Frecuencia (MHz)
Ka	0.75 - 1.111	40000 - 26500
Ka	1.111 - 1.667	25500 - 18000
Ku	1.667 - 2.4	18000 - 12500
X	2.4 - 3.8	12500 - 8000
C	3.9 - 7.5	8000 - 4000
S	7.5 - 15	4000 - 2000
L	15 - 30	2000 - 1000
P	30 - 100	1000 - 300

Fuente: Fernandez y Soria (2016)

Figura 12: Penetración de bandas comúnmente usadas en sensoramiento remoto

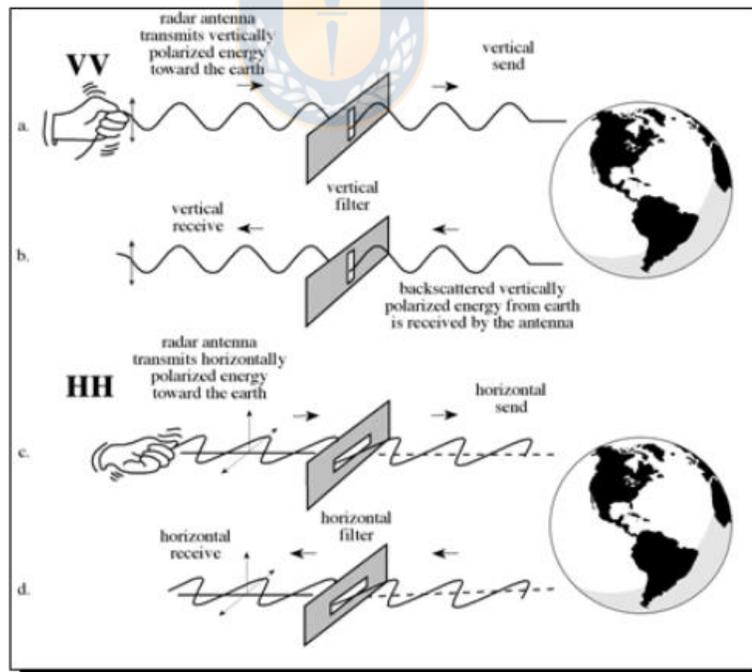


Fuente: Podest (2017)

### 3.3.3.2.2 Polarización y Polarimetría

Una de las características importantes de la propagación de la energía de microondas y dispersión es la polarización. Una onda electromagnética está compuesta de dos componentes que varían en el tiempo: el campo eléctrico y el campo magnético. Verma (2012), define polarización como la orientación y regularidad de los componentes del campo eléctrico o magnético en un plano orthogonal a la dirección de propagación de la onda. De esta forma los sistemas de radar transmiten ondas polarizadas horizontalmente o verticalmente, midiendo la señal retrodispersada que devuelven los objetivos en tierra, también con un tipo de polarización específica. En resumen, la orientación del vector del campo eléctrico define la polarización de una onda electromagnética, por ejemplo, como horizontal H, o vertical V (Fernández & Soria, 2015).

Figura 13: Polarización vertical y horizontal



Fuente: Freeman (2007) <https://slideplayer.com/slide/5932623/>

De acuerdo a la capacidad que tenga el sensor, este puede transmitir y recibir la energía de distintas formas. Así, algunos responden a la combinación HH o VV, que significa que transmiten y reciben la energía en la misma polarización, al contrario de las combinaciones HV o VH las cuales representan una transmisión cruzada. Cada una de estas polarizaciones tiene distintas propiedades de representar las características del suelo.

Hoy en día existen sensores capaces de transmitir y recibir la energía retrodispersada en varios tipos de polarización.

Tabla 6: Capacidades de polarización de distintos sensores

Clase	Capacidades de polarización en transmisión/recepción
De polarización única	HH, VV (también HV o VH)
De polarización dual	HH y VV, VV y VH o HH y VV
De polarización alternada	HH y HV, alternando con VV y VH
Polarimétrico o quad-pol	HH, VV, HV, VH

Fuente: Fernández y Soria (2016)

Cuando se tienen diferentes combinaciones de polarización se pueden analizar las propiedades de la señal de las antenas transmisoras y receptoras en cualquier estado de polarización para el objeto estudiado en el terreno. Esta capacidad se denomina como Polarimetría SAR aplicada sobre estas imágenes, y puede ser explicada en su génesis por las ecuaciones de Maxwell, polarización de la elipse, Vector Jones, Vector de Stokes, y la matriz de covarianza de la onda. Estas ecuaciones base dan paso a una serie de matrices que definen el comportamiento de la interacción de las ondas con los objetivos en terreno.

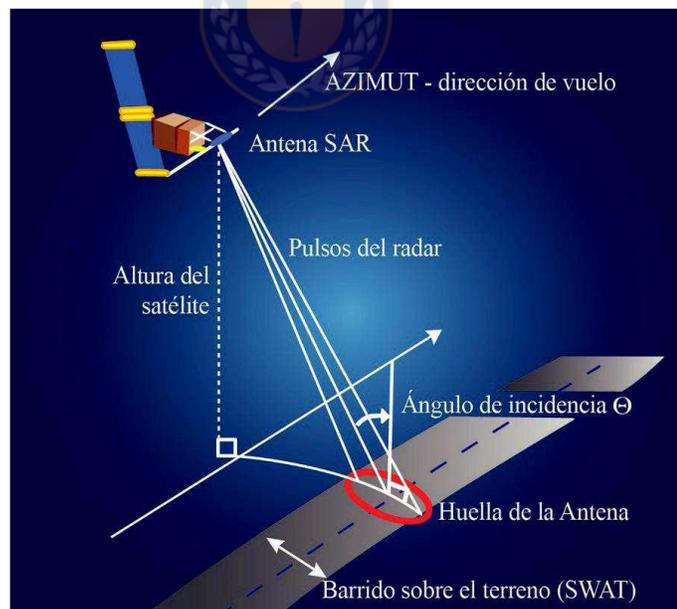
Antes de obtener parámetros definitorios de los patrones de dispersión de los objetos en el terreno se debe aplicar algunos filtros para reducir un ruido

inherente a las imágenes SAR llamando ruido Speckle el cual corrompe la información obtenida por el sensor. Una vez aplicado el filtro se puede calcular las descomposiciones de las matrices obtenidas anteriormente con el fin de obtener los parámetros de dispersión presentes en la imagen SAR estudiada.

### 3.3.3.2.3 Ángulo de incidencia

Otro parámetro a considerar en la manipulación de la imagen de radar, es el ángulo de incidencia. Este ángulo se define como el ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la vertical del terreno. La importancia de este ángulo se debe a que representa una medida de la orientación relativa del objetivo en tierra, siendo este dependiente de la altura del radar provocando que la geometría de la imagen sea distinta punto a punto. Además, este ángulo incorpora la inclinación local de la superficie, otorgando distintos niveles de brillo en la imagen.

Figura 14: Geometría de visualización de un sensor SAR



Fuente: Fernández y Soria (2015)

### **3.3.4 Clasificación de imagen**

La concatenación de procesos en el tratado de imágenes tiene una finalización en la categorización de las mismas por algún método específico. Esta información temática será usada para reconocer las distintas cubiertas presentes en la superficie terrestre. La clasificación de imagen asistida por computadora ha acelerado exponencialmente el estudio de la superficie de la tierra a partir de datos obtenidos por satélites (Gao J. , 2008 ), así, la clasificación multiespectral a tomado un fuerte rol en la categorización automática de las cubiertas usando la información espectral de diferentes bandas. Si bien esta clasificación es automática, no es replicable en la mayoría de las ocasiones para dos imágenes distintas debido a las condiciones únicas y particulares de cada lugar, así como también de las condiciones fenológicas del lugar estudiado. El resultado final de cualquier clasificación variará en gran porcentaje de los datos que se tiene entre manos, refiriéndose por ejemplo a la exactitud del clasificador cuando se tiene una imagen con resolución espacial más fina y otra más gruesa.

En concordancia con lo anterior la clasificación de una imagen es el procedimiento automático de categorización de todos los pixeles de la imagen de un terreno dentro de clases de cubiertas de suelo (Anji, 2008). De esta forma se transforman los datos obtenidos de los sensores remotos a información de clases.

Ahora bien, el tipo de clasificación multiespectral podría realizarse, según Jensen (2005), mediante cinco distintos métodos, de los cuales dos de ellos se profundizarán en el desarrollo del presente trabajo como conjunto: la clasificación lógica supervisada; y los clasificadores lógicos con enfoque en el pixel y en los objetos.

#### **3.3.4.1 Enfoque de clasificación basado en el análisis de los píxeles de la imagen (enfoque tradicional)**

Para la categorización numérica de los píxeles de una imagen, el enfoque tradicional basa mayormente su análisis en los patrones espectrales de la imagen. Vale decir, los valores derivados de la reflectancia espectral y de emisión inherentes, son ocupados para el conjunto de procedimientos de la clasificación automatizada en la búsqueda de coberturas terrestres. Si bien el patrón espectral se asociará con la agrupación de ciertos píxeles con un comportamiento similar, el enfoque acepta la incorporación de información auxiliar, como por ejemplo índices espectrales y variables continuas.

#### **3.3.4.2 Enfoque de clasificación basado en el análisis de los objetos de la imagen (OBIA)**

Las técnicas de análisis tradicional de imágenes, como se comentaba anteriormente, se basan en el estudio de la variación espectral basado en los píxeles, traduciendo la información obtenida en datos temáticos. Con el aumento de la resolución espacial de las imágenes por los sensores remotos, el análisis orientado en los objetos aprovecha esta condición agrupando los píxeles de una misma respuesta espectral y espacial, captando aspectos contextuales, morfológicos y temporales para la extracción de información (Navulur, 2007). El proceso que desarrolla nuestro cerebro al distinguir ciertas formas, colores, tamaños, texturas, orientaciones, etc, es el que desarrolla este paradigma, incorporando varias técnicas del sensoramiento remoto y de campos de la inteligencia artificial (IA). Durante los últimos 20 años la comunidad enfocada en la teledetección a promovido fuertemente el uso de esta tecnología basada en los objetos para el mapeo de la cubierta terrestre (Ma, y otros, 2017), realizando el 2006 en Austria la primera conferencia sobre OBIA a nivel mundial.

La base de este enfoque radica en la segmentación, la cual tiene sus orígenes en el procesamiento industrial de imágenes y solo siendo incorporada en

aplicaciones geoespaciales en la década de los 80`y 90s`, cuya tarea principal es producir un conjunto de segmentos no superpuestos homologando a polígonos (Blascke, 2010 ). Esta técnica crea los “objetos” en base a los pixeles, formando regiones con propiedades comunes y otorgando la posibilidad de incorporar diferentes tipos de información estructurante de las cubiertas del suelo.

Esta capacidad de incorporar información adicional le otorga ventajas al enfoque basado en objetos los cuales según Navulur (2007) se pueden resumir en:

- Tomar las ventajas de todas las dimensiones de los sensores remotos: espectral; espacial; morfológico; contextual; y temporal.
- Incorporar varios métodos y técnicas usadas para el correspondiente análisis como la clasificación supervisada, lógica difusa, y la clasificación basada en una regla.
- Incluir información auxiliar para la clasificación temática.
- La capacidad de extraer entidades de la misma escena a diferentes escalas.

La llamada segmentación es la base de este enfoque que se mencionaba anteriormente, envuelve uno de estos dos procesos: fusión de regiones de acuerdo a un tipo de homogeneidad; y la separación de los objetos mediante la búsqueda de bordes utilizando gradientes de números digitales. El primer proceso a su vez también se puede dividir en dos: Regiones de crecimiento; y división y fusión de la región. La técnica de regiones de crecimiento parte como base con píxeles y puntos semilla, los que posteriormente compondrán las regiones que irán creciendo mediante la fusión de píxeles vecinos con propiedades similares. La división y fusión de regiones parte con una partición de la imagen inicial en varias más pequeñas sin ningún tipo de conexión entre ellas para luego fusionarse y/o dividirse basándose en el criterio de similitud que tienen los objetos.

Por otro lado, la segmentación basada en bordes, crean los objetos mediante los contornos delimitados por los niveles grises que contiene la imagen. La forma de encontrar los bordes es similar a la creación de los límites de una cuenca, donde se utiliza el gradiente topográfico para subdividir las cuencas de mayor y menor grado. En adición, las técnicas de modelo de contorno activo, la cual mediante una forma inicial creada por curvas spline modificadas por energías internas, evoluciona en relación a gradientes y datos de la región. Un último modelo de contorno activo nace del enfoque probabilístico bayesiano.

### **3.3.4.3 Clasificación Supervisada**

La clasificación supervisada parte de la premisa de conocer ciertas áreas objeto de la imagen estudiada, exigiendo un conocimiento empírico y espectral de la imagen. La razón de este proceso radica en la correcta elección de lugares con características especiales basadas en algún tipo de cubierta común, estos conjuntos de píxeles son conocidas como áreas de entrenamiento (training fields), y tendrán un rol clave en la posterior clasificación. De esta forma los métodos de clasificación que incorporan el uso de patrones de entrenamiento se les designará el nombre de clasificaciones supervisadas.

En el proceso anterior y posterior a la elección del tipo de clasificador se deberá realizar ciertos pasos para que este pueda entregar resultados más precisos. Según Chuvieco (2002) algunos de estos son:

#### **3.3.4.3.1 Selección de las bandas espectrales**

En este proceso es fundamental considerar el número de bandas que se utilizarán posteriormente en la clasificación, no solo centrándose estrictamente en las bandas suministradas por las imágenes multiespectrales e hiperespectrales comunes, sino también en información procedente de otras fuentes espectrales (Índices vegetacionales, texturales, SAR, etc). Este proceso de elección posteriormente debe ser filtrado debido a la inevitable correlación que

puedan tener algunas de las bandas elegidas con el objetivo de reducir la redundancia y seleccionar los datos que mayor información entregan.

#### **3.3.4.3.2 Áreas de entrenamiento**

Cuando se tiene claro las bandas espectrales (spectral features) que se ocuparan se procederá a la importante etapa de elección de áreas de entrenamiento (Training areas). La base de una clasificación exacta se deriva de una correcta elección de las áreas de entrenamiento, por ende, requiere de un cuidado y tiempo especial para mejorar la representatividad de las cubiertas. En esta etapa generalmente no basta con utilizar la información que se entrega en las bandas espectrales, sino que además la interpretación de fotografías aéreas y el trabajo e inspección en terreno son necesarios. Para acabar con este paso es necesario calcular las estadísticas de cada banda espectral utilizada para verificar cualquier error.

#### **3.3.4.3.3 Elección del clasificador**

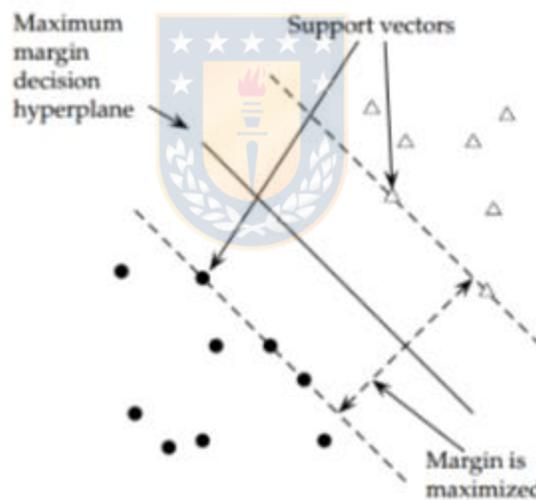
La elección del método de clasificación supervisada va a depender exclusivamente por quién realice la clasificación. Los tipos de clasificación más usadas son: Paralelepipedo; mínima distancia; máxima probabilidad; máquina vector de soporte, bosques aleatorios. Para el caso de estudio se trabajará con la clasificación máquina vector de soporte (Support vector machine) y Bosques Aleatorios (Random trees). La elección de este tipo de clasificación se debe a su buen fundamento teórico e intuitividad, además de haber demostrado éxito (Boswell, 2002) y buenos resultados de clasificación a partir de datos complejos y ruidosos, justamente los que presentaría una cubierta como los humedales.

#### **3.3.4.4 Máquina Vector de Soporte y Random Trees**

Máquina vector de soporte o Support Vector Machine (SVM), en inglés, es formulado por Vladimir Vapnik el año 1979 pero solo incorporado en su artículo científico del año 1995. Este método de aprendizaje utilizado para la clasificación binaria en su comienzo, posteriormente útil para más de dos variables, es

relativamente nuevo y básicamente lo que busca es encontrar el hiperplano que separe lo mejor posible las clases que se quieren clasificar. Para esto SVM busca una línea que maximice la distancia entre dos ejemplos de cada clase que no contengan elementos entre ellos, siendo los elementos usados para definir la línea los vectores de soporte. En ocasiones se hace complicado encontrar un separador lineal para diferenciar dos clases por lo que SVM traspasa los vectores de entrada hacia un espacio de más dimensiones, lo que se realiza con una función “kernel”. La nueva dimensionalidad permitirá buscar un separador lineal.

Figura 15: Vectores de soporte



Fuente: Manning et al. (2009)

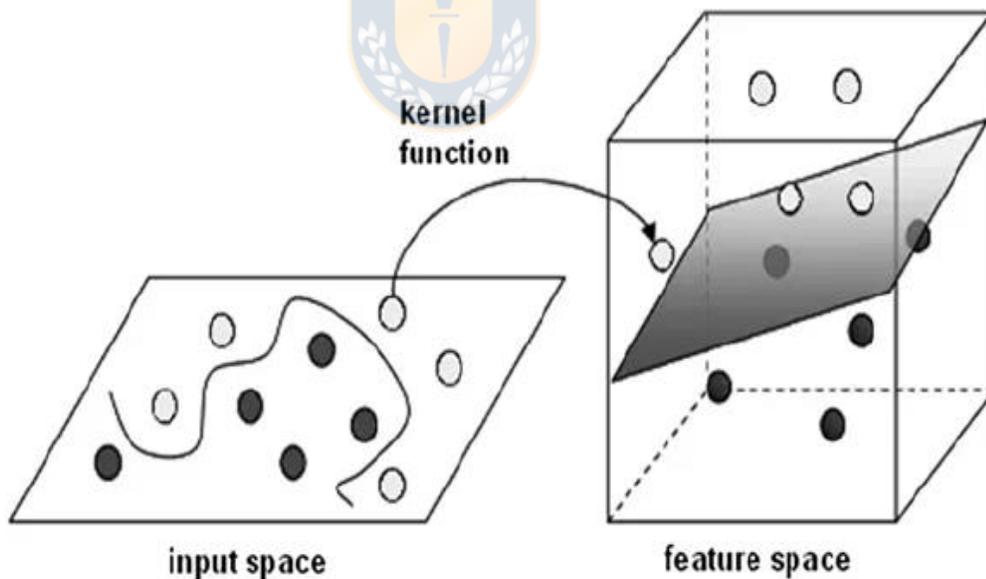
Según Manning et al. (2009)<sup>6</sup>, el 90 % de los trabajos con kernels usan uno de las dos sencillas familias de funciones de dos vectores. Estas dos familias de kernels son las polinomiales (polynomial) y las funciones de base radial (radial

---

<sup>6</sup> (Manning, Raghavan, & Schütze, 2009)

basis functions, RBF). El kernel polinomial tiene un parámetro “p” (varía entre 1 y 10) ajustable en su fórmula, el cual si es mayor aumenta la dimensionalidad del espacio de características, siendo la separación de los datos más fácil y a la vez conduciendo a una generalización mayor debido al espacio dimensional (Boswell, 2002). La función de base radial o Gaussiana, es una opción razonable de elegir sobre otros kernel debido a tres razones (Hsu et al., 2016). El primero se refiere al manejo del caso cuando las etiquetas de clases y los atributos no son lineales por sobre el kernel lineal, además de representar un caso especial del mismo. La segunda razón es el número de hiper parámetros (número de parámetros de cada función kernel) que contiene la función de base radial, siendo la del kernel polinómico mayor. Y la última razón es que el kernel RBF tiene menos dificultades numéricas, pudiendo ser para el kernel polinómico infinito o cero.

Figura 16: Ejemplificación de la función kernel

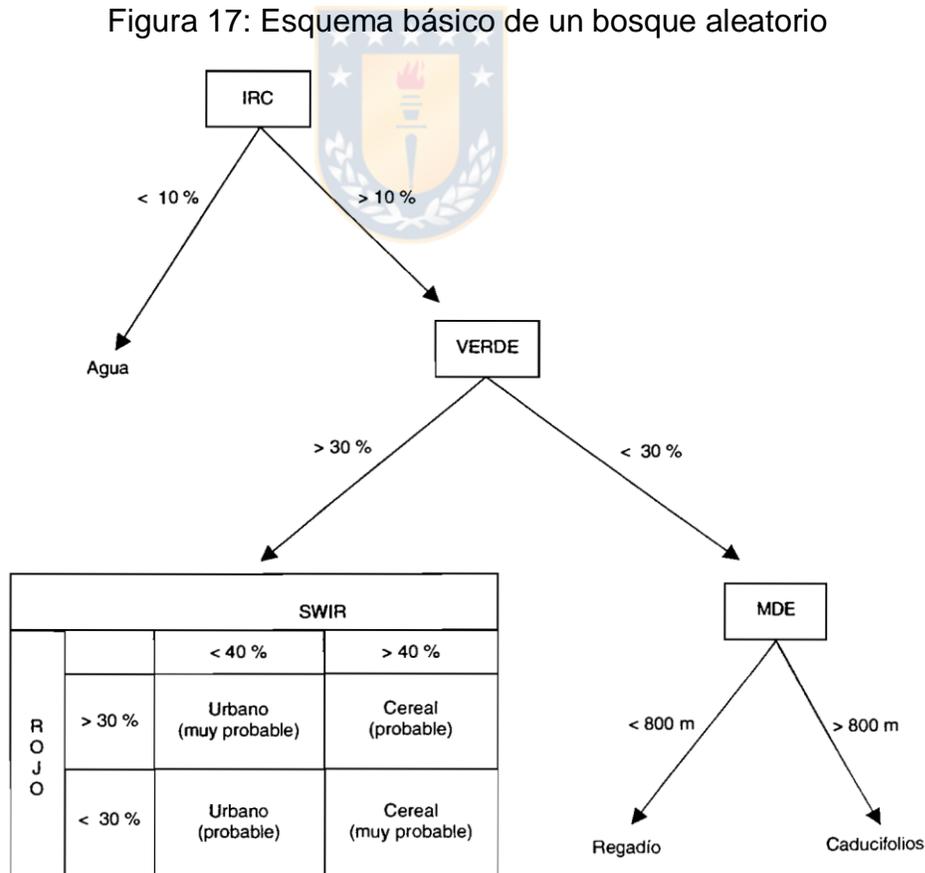


Fuente: <https://www.lasseschultebraucks.com/support-vector-machines/>

Otro método de aprendizaje ocupado en regresión y clasificación, derivado de los árboles de decisión, son los Bosques aleatorios o Random trees. Ho (1998)

introdujo el concepto de bosques como un método de subespacio aleatorio para la construcción de bosques de decisión. Este algoritmo, conocido también como máquina de aprendizaje Random Forest, representa una colección de árboles de decisión, siendo cada uno entrenado en una muestra inicial de los datos en cada nodo del árbol, buscando un subconjunto aleatorio de las características para determinar una división. Posteriormente para clasificar un vector de entrada en un bosque aleatorio, el vector se envía como entrada a cada árbol del bosque, produciéndose una clasificación en forma de voto para una clase específica. Así la clasificación elige al bosque que tiene la clase con más votos (Chen, 2008). En la figura nº 17 se representa el funcionamiento de un árbol de decisión, el cual representa la base de método de bosques aleatorios.

Figura 17: Esquema básico de un bosque aleatorio



Fuente: Chuvieco (2002)

#### 4. ÁREA DE ESTUDIO

Dentro del marco nacional la mayor parte de los humedales de importancia internacional están en el norte de nuestro país, sin embargo, la existencia del ecosistema está presente en gran porcentaje de la zona costera, es más, cerca de 412 humedales (38.167 ha) en esta ubicación están con serias posibilidades de desaparecer debido a la actividad antrópica (Fariña & Camaño, 2012), siendo particularmente importantes los ubicados en las comunas que contienen mayor densidad de habitantes como lo son Viña del Mar, Valparaíso, Talcahuano, Coquimbo, y Valdivia.

Dentro del contexto de nuestra región del Bío Bío, existen cuatro “importantes” humedales que caen en la definición de estuarios y esteros intermareales (Valdovinos, Muñoz, Sandoval, Vásquez, & Olmos, 2010), estos son de norte a sur: humedal Rocuant Andalién; Lenga; Carampangue; y Tubul Raqui. Los dos primeros humedales pertenecen al área metropolitana de Concepción en la cual según Pauchard, et al (2005)<sup>7</sup> más del 23 % de la superficie de humedales se ha perdido en el transcurso de las últimas tres décadas. Una investigación realizada por Smith y Romero (2009), proporciona los resultados negativos del crecimiento urbano del área metropolitana de Concepción sobre humedales insertos. En base a la localización de áreas de alta calidad ambiental los autores concluyeron en una vasta pérdida de superficie del ecosistema, siendo la fragmentación en el caso de Lenga y Rocuant el principal proceso espacial, el cual se ve justificado por el progresivo aumento del área urbana, siendo los últimos años aún más intensa. Por otro lado Munizaga (2015) contempla una pérdida del 16,54 % (154,06 ha) del humedal Rocuant Andalién, teniendo una visión futura no menos negativa con la construcción del proyecto plataforma logística que ocupará 900 hectáreas de superficie, acotando aún más el área del ecosistema. En el caso de Tubul-Raqui, el cual se vio muy modificado por el terremoto del año 2010 en base

---

<sup>7</sup> (PAUCHARD, AGUAYO, PEÑA, & URRUTIA, 2005)

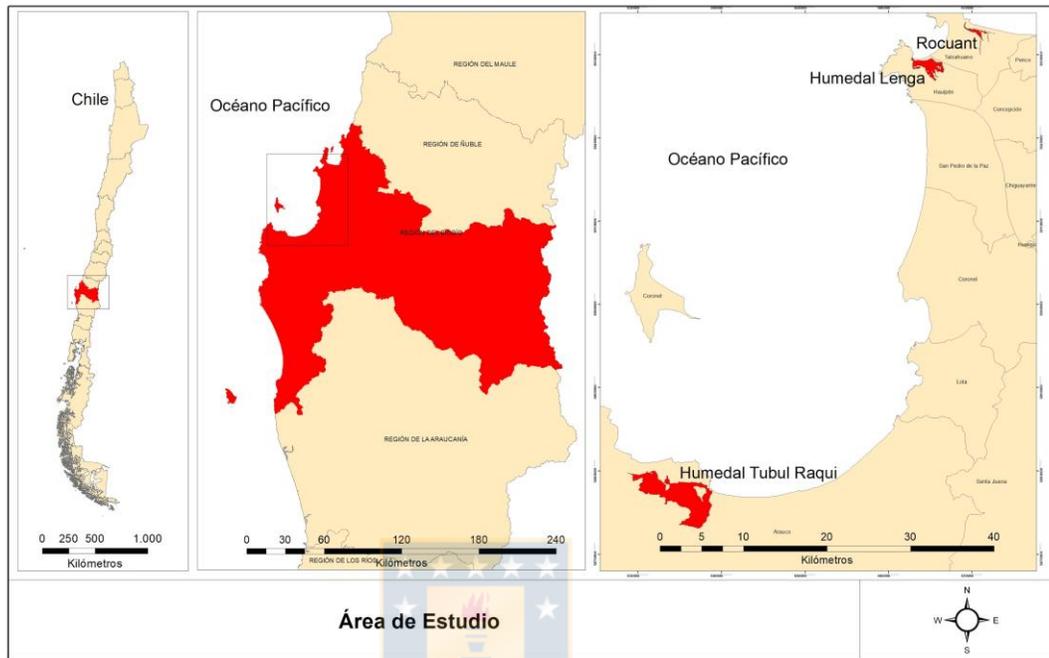
a alzamientos del continente, por consecuencia la disminución del flujo mareal, afectando la dinámica natural de la marisma. Este humedal es uno de los más importantes de Chile en base al cuidado y conservación de la biodiversidad que se encuentra en él, referida a la nidificación, refugio y paso temporal de aves residentes junto con especímenes migratorios (Valdovinos, Muñoz, Sandoval, Vásquez, & Olmos, 2010). Vásquez (2009)<sup>8</sup> estudiando los humedales Lengua y Tubul-Raqui, cataloga al primero como mayormente intervenido por la presión antrópica siendo el 55% de su superficie expuesta a actividades económicas de alto impacto procurando una inmediata conservación. En este último aspecto el “Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile” desarrolla un diagnóstico y propuesta para el uso sustentable de los humedales lacustres y urbanos principales de la región del Bío-Bío (2011), el cual genera un índice de estado de conservación para cada humedal con el correspondiente plan de gestión que precisa darle la mayor importancia a la subcuenca como unidad básica de acción, para esto se concluye que el ciclo de manejo y gestión de cuencas es el más adecuado para estos fines.

El área abarcada en esta tesis, la cual se sub-dividirá en tres escenas distintas, corresponde a tres humedales marismas antes nombrados de la región del Bío-Bío, Chile. El criterio elegido para la elección de estos humedales se basa en el área que comprenden y su cercanía con centros urbanos. Enumerando estos cuerpos de norte a sur serían: Humedal Rocuant-Andalién (Comuna de Talcahuano, 36° 44` S y 73° 03` O); Humedal Lengua (Comuna de Hualpén, - 36°46'04" Longitud -73°10'16); y Humedal Tubul Raqui (Comuna de Arauco, 37°13´ S – 73°26´ O).

---

<sup>8</sup> (Vásquez, Propuesta Metodológica de Delimitación de Humedales Costeros para el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile, 2009)

Figura 18: Área de estudio



Fuente: elaboración propia

## 5. METODOLOGÍA

El resultado buscado se concretó en base a una serie de procesos en modo de objetivos específicos que satisfagan la hipótesis y objetivo general de la presente tesis, como tal, cada uno de los objetivos específicos tienen el mismo grado de importancia y deberán responder también a una metodología propia. La precisión y exactitud mejorada de clasificación e identificación en humedales promovida por el nuevo enfoque, se realizará con cuatro imágenes de distinto sensor para cada humedal, siendo las dos clasificaciones utilizadas para las imágenes Sentinel 1-2, en primer orden se llevará a cabo la clasificación basada en píxeles y posteriormente la clasificación basada en objetos. Cada una de estas clasificaciones tendrán un principio diferente, en el caso del enfoque tradicional o de pixel se utilizará el clasificador de máquinas de vector de soporte, y para el enfoque basado en objetos se utilizará el método clasificatorio de árboles aleatorios.

Como la presente tesis basa su metodología en teledetección, el uso de sistemas de información geográficos (SIG) y software de análisis de imagen se hace esencial para procesar las variables que se ingresarán en los modelos.

Con este apronte preliminar se desarrollarán los tres objetivos específicos. El primero consta de delimitar y crear los subconjuntos de imágenes para los humedales estudiados, con el fin de tener una visión general del área abarcada por cada uno de estos. Este objetivo específico comenzará con la búsqueda y elección de las imágenes, las cuales cumplirán algunos requisitos necesarios para garantizar un estado común en todas ellas, como por ejemplo, cubierta nubosa, estacionalidad, rango diario acotado, etc. Cada una de estas imágenes se obtendrán de la web, siendo gratuitas y solo necesitando registrarse en las páginas contenedoras.

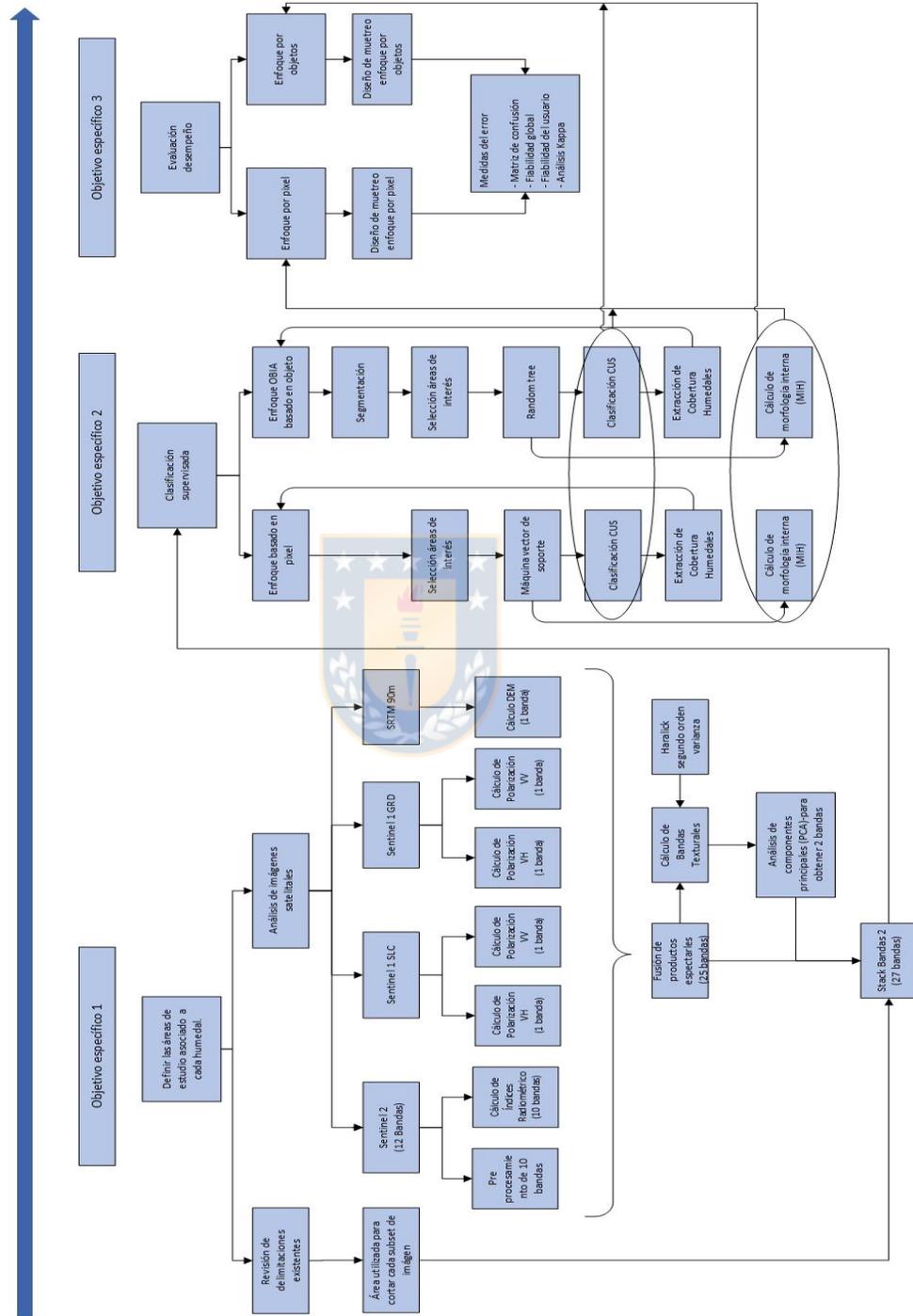
Por otro lado, estará el proceso directamente enfocado en la calibración y procesamiento de las imágenes ya que para obtener un buen resultado en la clasificación se necesita tener los valores digitales que representen más

fielmente los objetos en tierra. Cada tipo de imagen requiere una corrección y procesado distinto debido a que pertenecen a sensores diferentes. La creación de la subescena o stack será el paso final del objetivo específico, a la cual se aplicarán las clasificaciones, aquí se definirán las bandas que compondrán el set de bandas.

El objetivo específico número dos corresponderá a la clasificación supervisada y basada en los dos enfoques, con la finalidad de extraer el perímetro y estructura interna de cada humedal, siendo la primera aplicada en el software ENVI 5.3 y la segunda en el software eCognition Developer. Cada una de estas clasificaciones tendrán información auxiliar incorporada para mejorar el resultado final de la clasificación, como índices vegetacionales, análisis de componentes principales, análisis texturales, de forma, tamaño, vecindad, etc. La posibilidad de incorporar información adicional aumentará en el enfoque basado en objetos debido a la naturaleza del mismo.

Por último, el objetivo específico número tres, comprenderá la evaluación del desempeño de cada enfoque, determinada por cada clasificación, aplicando varias medidas de exactitud, presentando los resultados sobre cartografías para cada humedal.

Figura 19: Esquema metodológico de la presente Tesis



Fuente: Elaboración propia

## **5.1 Definir y delimitar las imágenes de las áreas de estudio**

### **5.1.1 Delimitaciones preexistentes de los tres humedales estudiados**

Para realizar un proceso de comparación con otras clasificaciones y delimitaciones de los humedales estudiados, junto con la estructuración de los subset respectivos para los 3 humedales, se realizará un proceso de reconstrucción de superficies establecidas por dos autores. Para el caso del humedal Rocuant-Andalién, se usará como máscara comparativa el trabajo realizado por Munizaga (2014). Para los humedales Lengua y Tubul-Raqui se utilizará las superficies obtenidas por Vásquez (2009).

Para cada uno de los casos se obtendrán las superficies digitalizadas y georreferenciadas, en el caso del humedal Rocuant-Andalién se tendrán las cubiertas en formato shape cedidas por el autor. Para los dos humedales restantes se deberá proceder a digitalizar en base a las cartografías de resultados de la tesis de Vásquez.

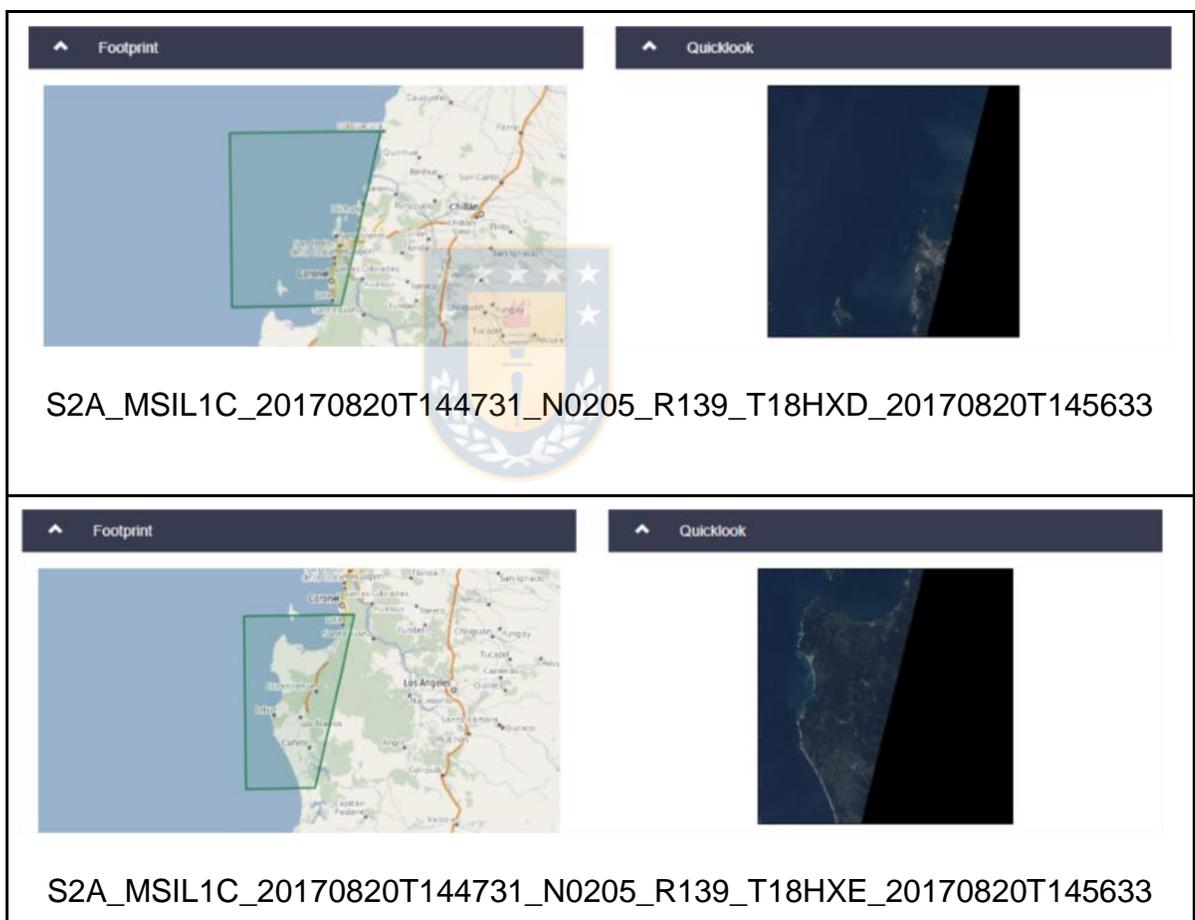
### **5.1.2 Adquisición de imágenes satelitales**

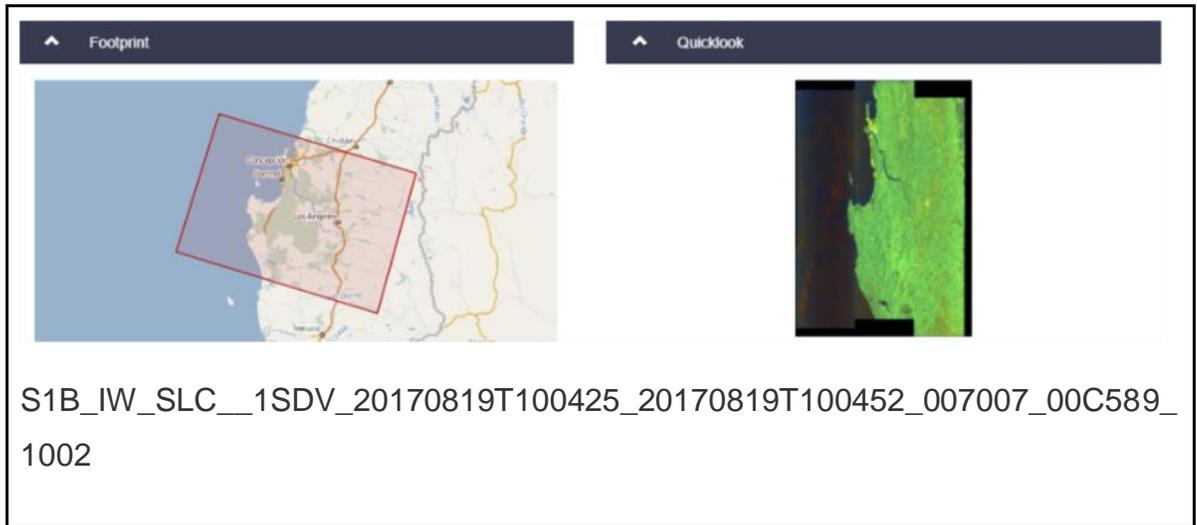
Como la materia prima de la presente tesis consiste en la manipulación de imágenes satelitales multiespectrales y de radar, se debe proceder a la adquisición de cada una de estas. La obtención de las imágenes se realizará por descarga de la internet, específicamente en la plataforma Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>). Esta plataforma pertenece al programa “Copérnico” de observación de la tierra desarrollado por la Unión Europea. Mediante la plataforma Copernicus Open Acces Hub se proporciona acceso completo y gratuito a los productos Sentinel-1, Sentinel-2 y Sentinel-3, siendo las primeras dos las que se utilizarán. En esta plataforma se requiere un usuario y contraseña para realizar las descargas.

Existirán algunos criterios bases para filtrar la búsqueda de imágenes y disminuir la cantidad de información a trabajar. En este punto se debe tener claro que la fecha de las imágenes debe corresponder a una estacionalidad específica,

siendo esta la que capte a los humedales en su mayor expresión. La época invernal parece responder al criterio anterior, agregando la dificultad de obtener una toma sin cubierta nubosa sobre los objetivos. Las fechas de cada imagen se acotaron al máximo posible para evitar cambios derivados de las condiciones propias de cada día, existiendo una separación de 7 días como máximo.

Figura 20: Escenas de las 2 imágenes Sentinel 2 y de la imagen Sentinel 1 ocupadas





Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Características generales de los archivos descargados

Características	Sentinel 2A-T18HDX	Sentinel 2A- T18HXE	Sentinel 1
Nombre archivo	S2A_MSIL1C_20170820T144731_N0205_R139_T18HDX_20170820T145633	S2A_MSIL1C_20170820T144731_N0205_R139_T18HXE_20170820T145633	S1B_IW_SLC__1SDV_20170819T100425_20170819T100452_007007_00C589_1002
Tamaño comprimido megabytes/ (Rar-Tar)	355 MB	424 MB	4040 MB
Tipo de archivo	JPEG2000	JPEG2000	SAFE
Fecha/hora	2017-08-20/14:56:33	2017-08-20/14:56:33	2017-08-19/10:04:25
Tipo de producto	Sentinel 2 MSI MultiRes	Sentinel 2 MSI MultiRes	Sentinel 1 IW Level-1 SLC product
Porcentaje nubosidad			

Fuente: Elaboración propia

Uno de los procesos que se desarrollará para cumplir el objetivo específico número dos, cobra una importancia única al determinar directamente los resultados que se obtendrán. Como las imágenes descargadas provienen de distintos sensores y presentan algún tipo de preprocesado, tendrán distintos tipos de calibración. Cabe mencionar primeramente características claves de cada uno de los raster a utilizar.

### 5.1.2.1 Sentinel 1

La misión Sentinel-1 tiene una flota total de 2 satélites con órbita polar en operación día y noche. Perteneciente a la iniciativa conjunta de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Comisión Europea (CE), Sentinel-1 es el primer satélite de cinco misiones que comprenden el proyecto Copernicus.

Esta misión es responsable de producir imágenes de radar de día y noche en órbita polar, en todo tipo de clima, y para servicios terrestres y oceánicos. El 3 de abril de 2014 se lanzó Sentinel-1A y Sentinel-1B el 25 de abril de 2016. Los productos disponibles entregadas por esta misión constan de imágenes en banda C, las cuales poseen polarización dual (VV-VH) y son captadas por cuatro modos de adquisición. El instrumento C-SAR, que responde a la tecnología de radar de apertura sintético (SAR), permite operar en condiciones nubosas o de falta de iluminación y en cualquier condición climática lo que brinda un valor agregado a las imágenes captadas. Algunas características claves se muestran en el Tabla 5.2:

Tabla 8: Principales características de las imágenes Sentinel-1B

Características	Sentinel-1
Instrumento	Banda C SAR (5.4 GHz)
Ángulo de incidencia	Visión lateral, 15°-45° desviado del nadir
Polarización	(VV - VH) o (HH - HV)
Altura del sensor en línea ecuatorial	693 km
Órbita	Heliosincrónica (anochecer/amanecer)

Tiempo de revisita (repetición orbital)	12 días
Resolución	5 m * 20 m
Ancho barrido	250 km (IWS mode)

Fuente: National Aeronautics and Space Administration (NASA)

### 5.1.2.2 Sentinel 2

De la misma iniciativa Copernicus, nace la misión Sentinel 2, la cual se caracteriza por entregar imágenes de alta resolución multiespectral para el monitoreo de la superficie terrestre, clasificación y monitoreo de cambios, y mejorar la evaluación precisa de parámetros biofísicos (ej. índice de área foliar (LAI) y contenido de clorofila foliar (LCC)). La misión contiene 2 lanzamientos, Sentinel-2A se lanzó el 23 de junio del año 2015 y Sentinel-2B el 7 de marzo de 2017. La órbita es polar y el tiempo de revisita es de 5 días en el ecuador, teniendo un ancho de banda orbital de 290 km (Swath width).

Sentinel 2 está armado de 13 bandas espectrales desglosado en virtud de su tamaño de pixel: 4 bandas de 10 metros; 6 bandas de 20 metros; y 3 bandas de 60 metros. El tiempo de vida de la misión es previsto para 15 años, 7.25 años como base y 5 años adicionales. La siguiente la tabla muestra la longitud de onda y las bandas incorporadas en las imágenes.

Tabla 9: Nombre, resolución espacial, y resolución espectral de Sentinel 2

Número de Banda	Nombre de banda	Resolución pixel (m)	Longitud de onda central (nm)
B1	Aerosoles	60	443
B2	Azul	10	490
B3	Verde	10	560
B4	Rojo	10	665
B5	Borde rojo 1	20	705

B6	Borde rojo 2	20	740
B7	Borde rojo 3	20	783
B8	Infrarrojo cercano (NIR)	10	842
B8a	Borde rojo 4	20	865
B9	Vapor de agua	60	940
B10	Cirros	60	1.375
B11	Infrarrojo medio 1 (SWIR 1)	20	1.610
B12	Infrarrojo medio 2 (SWIR 2)	20	2.190
QA10	Banda de Calidad	10	-
QA20	Banda de Calidad	20	-
QA60	Máscara de nubes	60	-

Fuente: Elaboración propia

Los tipos de productos entregados por esta misión son 3. El primero es Level-1B, el cual tiene un nivel de procesamiento de radiancia al tope de la atmósfera en geometría del sensor, su volumen de datos es de 27 mb (megabytes) cada 25\*25 km<sup>2</sup>. El segundo nivel de procesamiento es el Level-1C, el cual representa reflectancias al tope de la atmósfera (TOA) en geometría cartográfica, teniendo un volumen de datos de 500 mb cada 100\*100 km<sup>2</sup>. El último nivel de procesamiento es el Nivel-2A, el cual representa reflectancia de la parte inferior de la atmósfera (BOA) en la geometría cartográfica, siendo su volumen de datos de 600 mb cada 100\*100 km<sup>2</sup>.

### 5.1.3 Corrección de imágenes

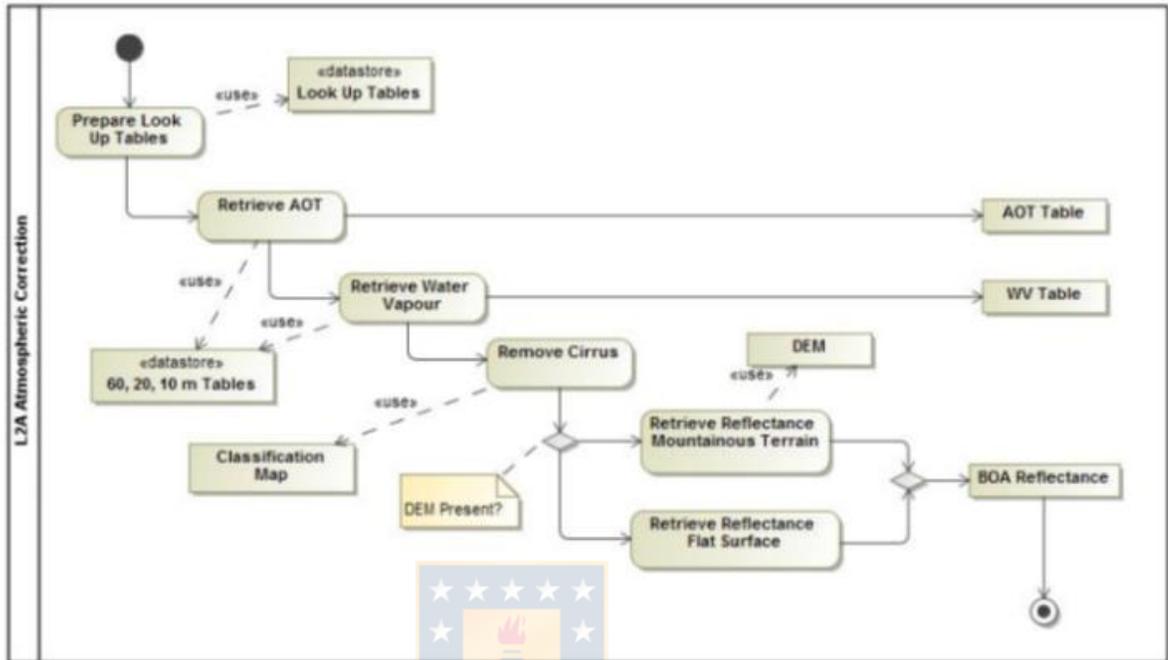
#### 5.1.3.1 Corrección imágenes Sentinel 2

Para las bandas de las imágenes Sentinel-2 se aplicará corrección atmosférica, que incluye además una corrección de cubierta nubosa (cirrus) y corrección de terreno. El proceso de corrección se realizará en el software SNAP Toolbox, donde los niveles digitales incorporados en la imagen se calibrarán

atmosféricamente. Para este proceso el complemento Sen2cor de SNAP será el encargado de proporcionar como resultado las reflectancias de las bandas Sentinel 2 calibradas para la parte inferior de la atmósfera (Bottom of Atmosphere BOA).

La corrección atmosférica aplicada por el complemento Sen2cor se basa en la metodología ATCOR (Atmospheric/topographic Correction for airborne imagery) por Richter y Schläepfer (2012), el cual es un método utilizado para reducir los efectos atmosféricos y de iluminación en los datos de imágenes satelitales con la finalidad de recuperar parámetros físicos de la superficie de la tierra, el cual como resultado entrega “el espesor óptico de aerosoles” (Aerosol Optical Thickness AOT), el vapor de agua (water vapour WV), y una clasificación de la escena junto con indicadores de calidad, además Sen2cor entrega reflectancias corregida para todas las bandas de la imagen (BOA). Para llegar a estos resultados, el modelo de corrección atmosférica es dependiente del cálculo de funciones de transferencia radiativa, el cual se calcula para diferentes sensores, geometrías solares, elevaciones del terreno, y parámetros atmosféricos (ESA, 2018). Para este procesamiento se utiliza una serie de tablas de consulta (Look-Up-Tables LUTs), las cuales contienen los parámetros antes mencionados, generado interpolaciones si se amerita.

Figura 21: Esquema de corrección atmosférica Sentinel 2



Fuente: European Space Agency (2017)

Para completar este proceso se ingresarán los parámetros necesarios para realizar la corrección atmosférica:

Tabla 10: Parámetros del complemento Sen2cor para corrección atmosférica

Parámetros	Valores a elegir
Tipos de Aerosol	Rural / Marítimo / automático
Características de la Atmósfera	Verano / Invierno / automático
Contenido ozono	Para la atmósfera de verano de latitud media (MS): 250, 290, 331 (MS estándar), 370, 410, 450. Para atmósfera de invierno en latitudes medias (MW): 250, 290, 330, 377 (MW estándar), 420, 460.
Corrección de vapor de agua	0: Sin corrección de WV, 1: solo bandas de 940 nm, 2: solo bandas de 1130 nm, 3: ambas regiones utilizadas durante la recuperación de wv, 4: región térmica
Visibilidad (VIS)	0: constante, 1: visibilidad variable

Máscara de vapor de agua	0: no reemplazado, 1: promedio terrestre, 2: promedio lineal
Corrección de cirros	FALSO: no se aplicó la corrección del cirro, VERDADERO: se aplicó la corrección del cirro
Corrección de la función de distribución de reflectancia bidireccional	0: sin corrección BRDF, 1:, 2:, 11, 12, 22, 21
Función de distribución de reflectancia bidireccional / límite inferior	En la mayoría de los casos, $g = 0.2$ a $0.25$ es adecuado, en casos extremos de sobrecorrección se debe aplicar $g = 0.1$
Unidad del DEM	(0=[m], 1=[dm], 2=[cm])
Visibilidad	visibilidad ( $5 \leq \text{visib} \leq 120$ km)
Altitud	km
Suavizado mapa vapor de agua	
Vapor de agua / límite cirrus	Umbral de vapor de agua para apagar el algoritmo de cirros [cm] Rango: 0.1-1.0

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3.2 Preprocesamiento aplicado a la imagen Sentinel-1 GRDH y SLC

Si bien los dos tipos de imágenes de radar utilizadas pertenecen a la misión Sentinel-1B, son productos diferentes, por lo cual requieren de un procesado distinto para llegar a obtener valores que representen la verdadera retrodispersión de los objetos en tierra y lograr determinar el mecanismo de dispersión que existe.

El nivel del producto para las dos imágenes SAR es Nivel-1, es el tipo de producto disponible para los usuarios.

#### 5.1.3.2.1 Imagen GRD (Ground Range Detected)

La imagen de Detección de Rango del Suelo de nivel-1 son datos SAR obtenidos por varias revisiones y proyectados al rango de suelo utilizando un modelo de elipsoide de la tierra. Cuando se realiza este proceso el producto construido queda con una resolución espacial de píxeles cuadrados con un moteado escaso,

en perjuicio de una peor resolución espacial. El producto GRD no contienen información de fase, por lo cual no se podría utilizar en polarimetría.

- Aplicación de archivo de órbita

Los archivos que incorpora la imagen que contienen información de los vectores de estado de órbita del producto no son lo suficientemente precisos como los que están disponibles algunos días y semanas después de su generación. Obteniendo los vectores cartesianos de posición, época (momento en el tiempo utilizado como punto de referencia), y velocidad, se puede mejorar la precisión de los metadatos del producto.

- Calibración radiométrica

Debido a que el producto de nivel-1 no trae corrección radiométrica, se debe aplicar una calibración que transforme los valores digitales para relacionarlos directamente con la retrodispersión de la escena radar trabajada o la superficie reflectante, siendo esta retrodispersión la porción de la señal de radar saliente que el objetivo redirige directamente hacia la antena del radar. En los archivos que contiene el producto se incluyen datos correspondientes a vectores de calibración que entrega la posibilidad de convertir los valores de intensidad de la imagen en datos sigma nulo o gamma nulo. La sección transversal de dispersión en la dirección hacia el radar se denomina sección transversal de retrodispersión o sigma. La medida normalizada de retorno del radar desde un objetivo se denomina coeficiente de retrodispersión, o sigma nulo (Sigma Naught), el cual es un número adimensional normalizado que compara la fuerza observada con la esperada en un área de un metro cuadrado en decibeles (db). Para obtener estos valores se sigue la siguiente fórmula:

$$Value(i) = \frac{|DN_i|^2}{A_i^2}$$

dónde:

**Value(i):** uno para beta nulo ( $\beta^0_i$ ), sigma nulo ( $\sigma^0_i$ ) o gamma nulo ( $\gamma^0_i$ ), o los  $DN_i$  originales.

$A_i^2$ : uno para beta nulo (i), sigma nulo t(i), gamma (i) o DN (i)

- Filtro Speckle y multilooking

Las texturas de las imágenes SAR contienen una característica inherente de las mismas la cual corrompe la información de terreno, comúnmente se llama efecto “sal y pimienta” o salpicadura-ruido (Speckle). Este speckle se produce por la contribución de distintas fases de onda proveniente de diferentes elementos dispersores a la señal retrodispersada. Sin embargo, la existencia de este speckle se debe a procedimiento de generación de imagen empleado por el sistema radar y no por la escena (Lira, 2010).

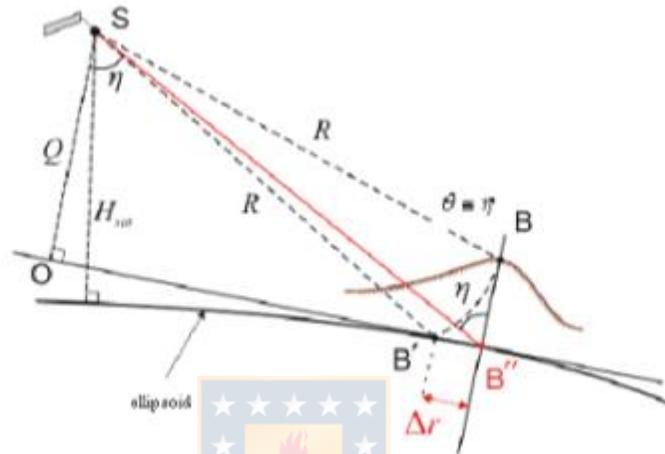
Los filtros speckle y multilooking son dos métodos de reducción de este ruido, siendo el primero un método considerado digital y el segundo físico. Los métodos digitales se basan en la premisa de que entre mayor es el valor del pixel en la imagen mayor es la magnitud del speckle debido a que este ruido es multiplicativo, por lo tanto, estos filtros abordan esta problemática (modelo multiplicativo). El segundo método explicado con multilooking se basa en la combinación de varias imágenes incoherentemente como si correspondieran a distintas vistas de la misma escena, mejorando la interpretación de la misma y permitiendo aplicar un tamaño de pixel específico.

- Corrección de terreno

Como las discontinuidades de la superficie de la tierra y las propiedades referentes al sensor que capta la imagen producen distorsiones, se debe aplicar un proceso de ortorectificación que logre corregir estos problemas que se ocasionan cuando el sensor no apunta directamente a la localización Nadir del sensor. Algunas de estas distorsiones son: el rango oblicuo; inversión del relieve; sombra; y desplazamiento en contra del nadir. La imagen corregida buscada

intenta ser representada geoméricamente lo más parecida a la realidad, para esto se utilizará un modelo de elevación digital en el algoritmo que realice la corrección.

Figura 22: Distorsiones geométricas debidas a la topografía

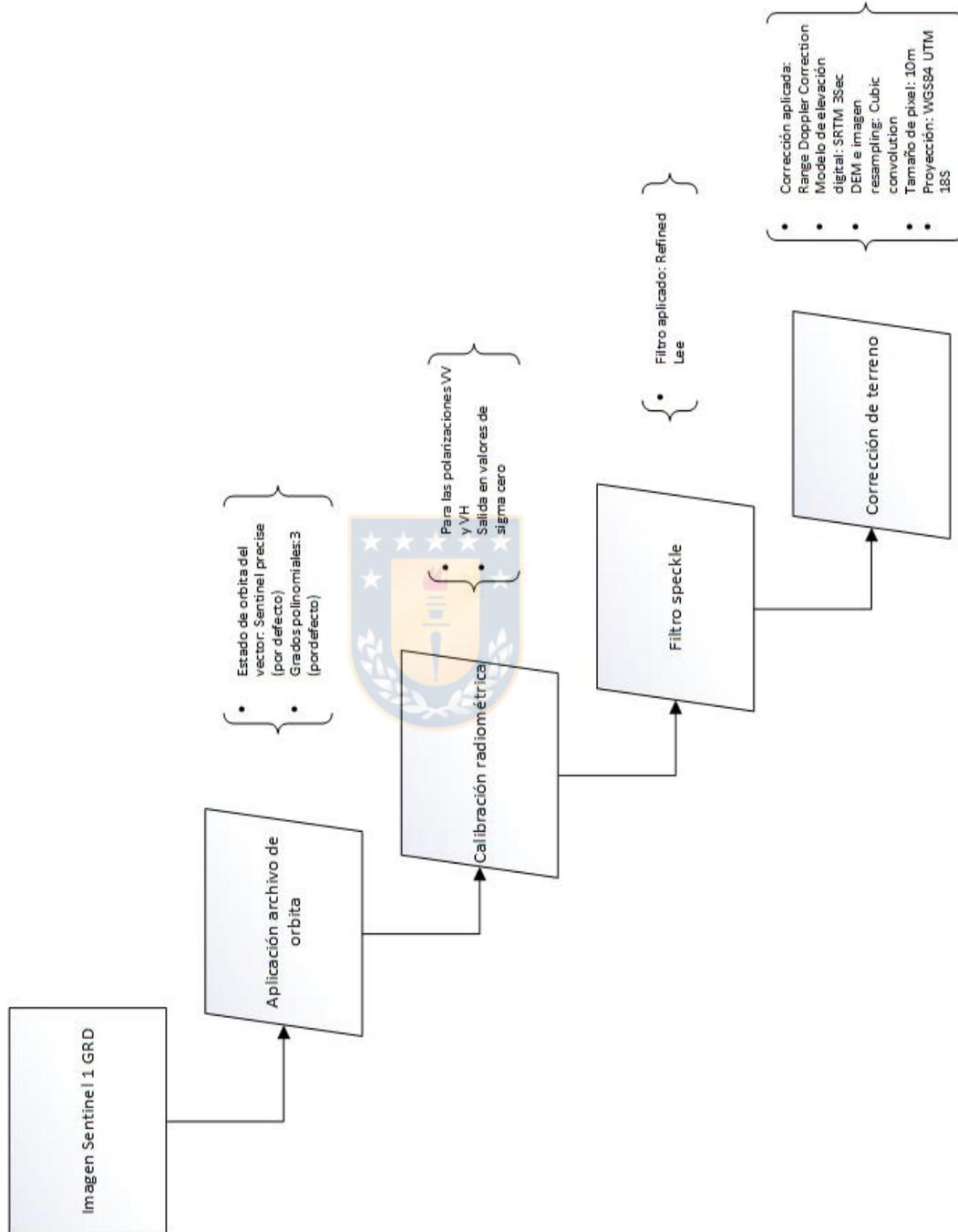


Fuente: ESA SNAP (2019)

En la figura 21 se observa que el punto B con elevación h se representa con B' en la imagen SAR, siendo la posición real B'', existiendo un  $\Delta r$  a corregir.

Una vez aplicadas estas correcciones se transformarán los datos a dB (decibeles) para poder interpretarlos.

Figura 23: Procesos de corrección aplicados a la imagen Sentinel 1 GRD



Fuente: Elaboración propia

#### **5.1.3.2.2 Imagen SLC (Single Look Complex)**

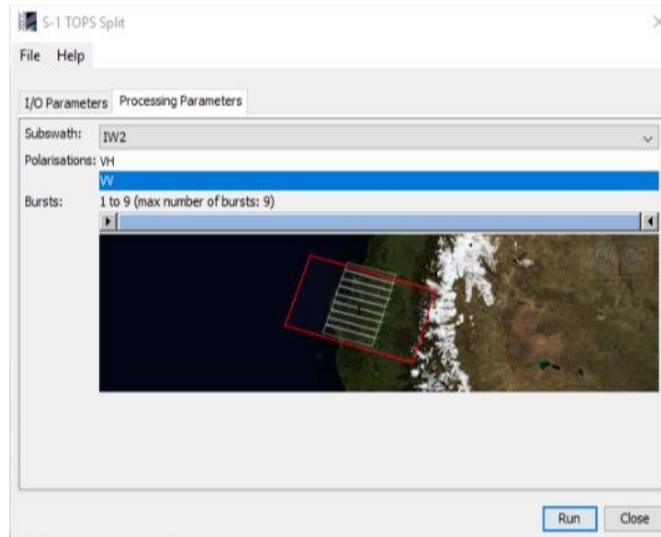
Este producto tiene dos tipos, IW y EW, en este caso se utilizará una del tipo IW. Este tipo de producto tiene tres franjas secundarias, tres imágenes en polarización única, y seis imágenes para polarización dual.

El objetivo final del proceso de corrección de la imagen SLC es realizar la polarimetría, aprovechando la polarización dual que tiene la imagen trabajada, pero debido a distintos estudios aún la doble polarización no genera resultados precisos para procesos polarimétricos. Por lo tanto se realizará una transformación de imagen SLC a GRD para tener más información de la dispersión del terreno para incluir en la clasificación como bandas texturales.

- Split

El primer proceso que se aplicará sobre la imagen de radar SLC será un TOPS Split el cual acota el área de estudio de este tipo de imagen. Debido a que las imágenes SLC IW tienen 3 franjas secundarias de imágenes, se elegirá solo la que pertenece al área de estudio trabajada. La elección se realizará para las ráfagas IW2 para las polarizaciones VH y VV. Con este procesado se evita elevar el tiempo de procesamiento posterior.

Figura 24: Tops Split aplicado a la imagen Sentinel 1



Fuente: Elaboración propia

- Eliminación de ruido térmico (thermal noise removal)

Debido a las fluctuaciones térmicas se produce un ruido intrínseco que debe ser corregido. Cada imagen tiene una tabla que contiene los valores para cada conjunto de datos de medición.

- Calibración radiométrica

El segundo paso del procesamiento consistirá en la calibración radiométrica de la imagen obtenida en el paso anterior. Como en la imagen de radar GRD anterior, a la imagen SLC también se le debe aplicar una corrección para que los valores DN representen la verdadera retrodispersión de la escena. Al ingresar la imagen al software este reconoce automáticamente del sensor que proviene.

- Deburts

Como se mencionaba en el principio, la imagen SLC tiene 3 franjas secundarias la cual se acotó con el split, pero además cada una de estas franjas está

compuesta de 9 ráfagas distintas que deben ser procesadas para que la imagen sea continua. En la imagen siguiente se muestra la imagen con las ráfagas y a la derecha la imagen procesada.

- Multilook

Este proceso y el que le sigue se aplican para eliminar el efecto de moteado inherente a las imágenes de radar. Para esto, el proceso denominado multilook combina varias imágenes de forma incoherente emulando a varias miradas de una misma escena. Este proceso mejorará la interpretabilidad de la imagen

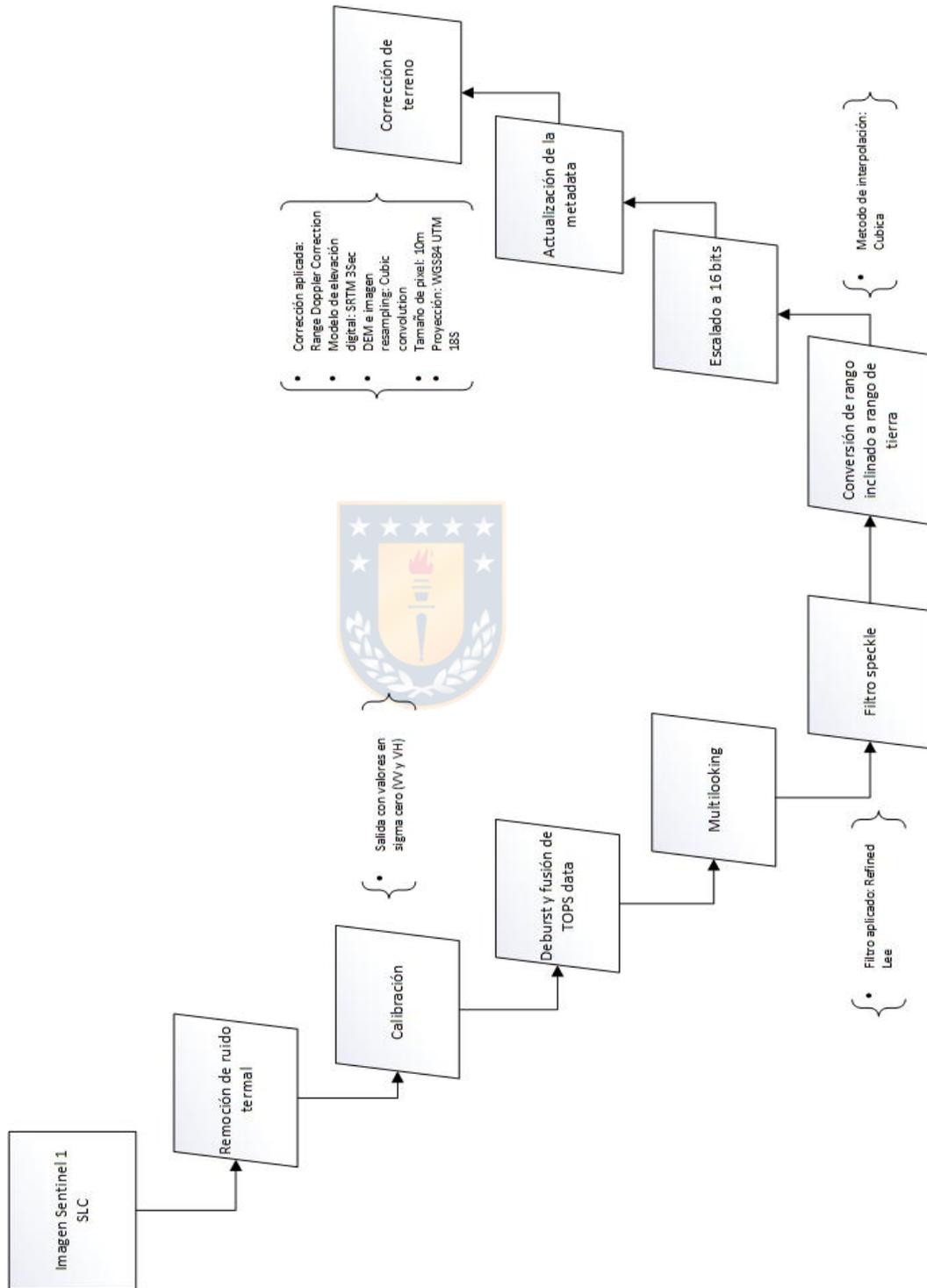
- Filtro Polarimétrico Speckle

Como en el producto anterior se aplicó un filtro speckle para reducir el moteado inherente a la imagen de radar, también se deberá aplicar al producto SLC. En este tipo de producto la fluctuación de intensidades de moteado dificulta la interpretación cualitativa y cuantitativa como consecuencia de las dispersiones individuales de cada celda de la imagen. Este filtro se aplica a la matriz de covarianza o coherencia construido anteriormente.

- Corrección de terreno

Por último, se aplicará la corrección de terreno para otorgar la dirección correcta de la imagen. Los parámetros del modelo digital serán SRTM 3Sec, el método de remuestreo será de interpolación bilineal al igual que el remuestreo de la imagen.

Figura 25: Procesos de corrección aplicados a la imagen Sentinel 1 SLC



Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.4 Cálculo de Índices Radiométricos

Cuando se tengan las bandas corregidas atmosféricamente se podrán aplicar diferentes índices radiométricos que expongan las características deseadas de las cubiertas, en este caso las marismas. Los índices en algunos casos serán más de uno, por lo que se aplicará el análisis de componentes principales para reducir la cantidad de información.

La posibilidad que brinda el poder hacer operaciones aritméticas con las bandas de las imágenes, se refiere a la relación que se derivan de éstas. Las relaciones de bandas se definen como una división de una banda espectral por otra, de preferencia del mismo sensor y fecha (Gao J. , 2008 ), aprovechando las longitudes de onda en la que las cubiertas son mejor representadas. En la preparación del stack de bandas para nuestras imágenes se aplicarán tres tipos de índices: índices de agua; índices vegetacionales, e índices de suelo. Se definirán en los siguientes párrafos.

##### Índices de agua

- Segundo índice de diferencia agua normalizada (NDWI2): El algoritmo fue desarrollado por McFeeters (1996) para detectar aguas superficiales en ambientes de humedales y para permitir la medición de la extensión del agua superficial.

$$NDWI2 = \frac{(green\_factor * green - IR\_factor * near\_IR)}{(green\_factor * green + IR\_factor * near\_IR)}$$

Dónde:

green\_factor: 1

IR\_factor: 1

- Índice de agua de diferencia normalizada modificada (MNDWI): Xu (2006), crea este algoritmo, el cual mejora la identificación de aguas abiertas y suprime el ruido generado por el suelo-vegetación.

$$MNDWI = \frac{(green\_factor * green - mir\_factor * middle\_IR)}{green\_factor * green + mir\_factor * middle\_IR}$$

Dónde:

Green\_factor: 1

mir\_factor: 1

- Índice de diferencia normalizado de Estanques (NDPI): Este algoritmo fue desarrollado por J.P Lacaux et al., (2007). El NDPI hace posible no sólo distinguir pequeños estanques y cuerpos de agua (hasta 0.01 ha), sino también diferenciar la vegetación dentro de los estanques de la de su entorno.

$$NDPI = \frac{(green\_factor * green - swir\_factor * ShortWave\_IR)}{(green\_factor * green + swir\_factor * ShortWave\_IR)}$$

Dónde:

Green\_factor: 1

Swir\_factor: 1

- Índice de Diferencia Normalizada de Turbidez (NDTI): El algoritmo del Índice de diferencia normalizada de turbidez fue desarrollado por J.P Lacaux et al., (2007), la que permite la medición de la turbidez del agua. Especial para detectar humedales.

$$NDTI = \frac{(red\_factor * red - green\_factor * green)}{(red\_factor * red + green\_factor * green)}$$

Dónde:

Green\_factor: 1

Red\_factor: 1

### Índices vegetacionales

- Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI): Propuesto por Rouse et al., (1974), el NDVI compone una medida para la actividad fotosintética que está fuertemente en correlación con la densidad y la vitalidad de la vegetación. La normalización reduce los efectos topográficos y atmosféricos y permite el examen simultáneo de un área amplia.

$$NDVI = \frac{IR\_factor * near\_IR - red\_factor * red}{(IR\_factor * near\_IR + red\_factor * red)}$$

Dónde:

IR\_Factor: 1.0

Near\_Factor: 1.0

- Índice de diferencia de vegetación (DVI): El algoritmo del índice de diferencia de vegetación es sensible a la cantidad de vegetación, siendo uno de los índices de vegetación más simple. Algunas de sus características son: sensible a la cantidad de vegetación; y distingue entre suelo y vegetación.

$$DVI = (IR\_factor * near\_IR - red\_factor * red)$$

Dónde:

IR\_Factor: 1.0

Near\_Factor: 1.0

- Índice de Vegetación Proporcional (RVI): El índice más simple basado en relaciones es también llamado Ratio Simple (SR). Sus principales cualidades son: brinda valores altos para la vegetación; bajo para tierra-hielo-agua; indica la cantidad de vegetación; y reduce los efectos de la atmósfera y topografía.

$$RVI = \frac{(IR\_factor * near\_IR)}{(red\_factor * red)}$$

Dónde:

IR\_Factor: 1.0

Near\_Factor: 1.0

- Índice de Monitoreo Ambiental Global (GEMI): Pinty y Verstraete (1992) proponen este índice, el cual reduce los efectos perturbadores atmosféricos sin perder información vegetal.

$$GEMI = \frac{eta * (1 - 0.25 * eta) - (red\_factor * red - 0.125)}{(1 - red\_factor * red)}$$

Dónde:

$$eta = ((2 * (IR\_factor * near\_IR * IR\_factor * near\_IR - red\_factor * red * red\_factor * red) + 1.5 * IR\_factor * near\_IR + 0.5 * red\_factor * red)) / ((IR\_factor * near\_IR + red\_factor * red + 0.5))$$

IR\_Factor: 1.0

Near\_Factor: 1.0

- Índice de clorofila de borde rojo invertido (IRECI): Este índice ocupa las reflectancias de cuatro bandas para estimar el contenido de clorofila del dosel (Guyot y Baret, 1988). Utiliza la banda del borde rojo (0,68 - 0,74  $\mu\text{m}$ ) para visibilizar la alta absorción en las longitudes de onda del visible por la mayor presencia de clorofila y la alta reflectancia para las longitudes de onda del infrarrojo cercano determinado por el tejido mesófilo.

$$IRECI = \frac{(B7 - B4)}{(B5 / B6)}$$

#### Índices de suelo

- Índice de brillo 2 (BI2): Escadafal (1989) propone este índice con la finalidad de mostrar sensibilidad al brillo de los suelos, el cual se correlaciona con la cantidad de humedad y la presencia de sales de la superficie.

$$BI2 = \sqrt{(((red\_factor * red * red\_factor * red) + (green\_factor * green * green\_factor * green))/2)}$$

Dónde:

red\_factor: 1.0

green\_factor: 1.0

#### 5.1.5 Conformación de stack de bandas

Como último paso del tratado pre-clasificación se tendrá que crear los conjuntos de bandas que formarán la imagen que se utilizará en la clasificación. En este punto no solo las bandas nativas de los sensores serán ocupadas, sino también, la inclusión de índices vegetacionales, índices de agua, e índices de suelo, en el

proceso de la imagen Sentinel 2 y adicionalmente la incorporación de una banda de altura (DEM). Igualmente se calcularán índices texturales ligados a estadísticos de segundo orden. Antes de calcular la información auxiliar de las imágenes calibradas se realizará el corte por un rectángulo que contenga al buffer de 1 km de influencia de las marismas identificados por los autores citados.

En el Tabla 11 se muestran las bandas nativas de la imagen Sentinel 2 calibradas atmosféricamente. Las bandas de Aerosol, vapor de agua, y cirros, se excluirán del análisis debido a que ya fueron ocupadas para calibrar la imagen.

Tabla 11: Bandas Sentinel 2 calibradas

Nº	Bandas nativas de la imagen Sentinel 2 calibradas
1	Azul
2	Verde
3	Rojo
4	Borde rojo 1
5	Borde rojo 2
6	Borde rojo 3
7	Infrarrojo cercano (NIR)
8	Borde rojo 4
9	Infrarrojo de onda corta (SWIR 1)
10	Infrarrojo de onda larga (SWIR 2)

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Clasificación de imágenes en Coberturas-usos de suelo (CUS) y morfología interna del humedal (MIH)

La realización de los apartados anteriores nos permitirá tener la materia prima para incorporar a la clasificación buscada. Las dos distintas clasificaciones se procesarán en distintos softwares, lo que conlleva distintas metodologías en cada

proceso. Para el enfoque clásico se aplicará una clasificación de máquina vector de soporte junto con información auxiliar derivada de índices espectrales vegetacionales e información textural. En el caso de las imágenes sentinel se aplicará la clasificación basada en objetos mediante el algoritmo de árboles aleatorios (Random Trees), en conjunto con información adicional procesada anteriormente y la aplicación de límites en determinadas propiedades de los raster.

Los sub-set de trabajo para cada humedal se realizará en concordancia con las superficies obtenidas por los trabajos realizados por los autores citados anteriormente, los cuales cumplirán el rol de comparación. Se aplicará una zona de influencia de al menos 1 kilómetro en un área final rectangular para cada humedal estudiado. La longitud del buffer se aplicará en concordancia con la metodología de Rojas et al.(2015)<sup>9</sup>.

En cuanto a la leyenda de la clasificación, se usará la nomenclatura elaborada para el mapa vectorial de CORINE Land Cover, el cual agrupa en 5 macro clases (Nivel 1) las 44 sub-categorías (nivel 3). En esta tesis se presentarán una mixtura de las clases correspondientes al Nivel 2 y 3 con fin de extraer el límite del humedal.

Tabla 12: Coberturas y usos de suelo

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Superficies Artificiales	Tejido urbano	Tejido urbano continuo
		Tejido urbano discontinuo
	Unidades industriales, comerciales y transporte	Unidades industriales y comerciales
		Redes de Carreteras y vías férreas
		Áreas de puertos

<sup>9</sup> (Rojas, Sepúlveda-Zúñiga, Barbosa, Rojas, & Martínez, 2015)

		Aeropuerto
	Minas, vertederos y sitios en construcción	Sitios de extracción mineral
		Sitios de vertederos
		Sitios en construcción
	Áreas con vegetación artificial y no agrícola	Áreas verdes urbanas
		Instalaciones deportivas y de ocio
Áreas Agrícolas	Suelos cultivables	Suelos cultivables no irrigados
		Suelos permanentemente irrigados
		Campos de arroz
	Cultivos permanentes	Viñedos
		Árboles frutales y plantaciones de bayas
		Olivares
	Pastoreo	Pastoreo
	Áreas de agricultura heterogénea	Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes
		Patrones complejos de cultivo
		Tierra ocupada principalmente por la agricultura, con importantes áreas de vegetación natural
		Áreas agro-forestales
Áreas Forestales Semi-Agrícolas	Bosque	Bosques de hojas anchas
		Bosques de coníferas
		Bosques mixtos
	Asociaciones de matorrales y vegetación herbácea	Pastizales naturales
		Moros y brezales
		Vegetación esclerófila
		Bosque de arbustos en transición
	Espacios abiertos con pequeña o nula vegetación	Playas, dunas, arenas
		Rocas descubiertas
		Áreas de vegetación esparcida
Áreas quemadas		
		Glaciares y nieves perpetuas

Humedales	Humedales interiores	Marismas dulces
		Turberas
	Humedales marítimos	Marismas salados
		Salares
		Pisos intermareales
Cuerpos de Agua	Aguas interiores	Cursos de agua
		Cuerpos de agua
	Aguas marinas	Lagoons costeros
		Estuarios
		Océano

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes páginas se desglosan los pasos realizados para cada clasificación en particular.



### 5.2.1 Clasificación supervisada basada en el enfoque tradicional

La clasificación con el enfoque clásico se realizará en el software QGIS 3.4.2 y SAGA GIS utilizando el algoritmo de máquina vector de soporte. El trabajo sobre la imagen ya procesada consistirá en un primer paso en la catalogación de las áreas de interés en base de ROI independientes para cada cubierta de suelo pertinente.

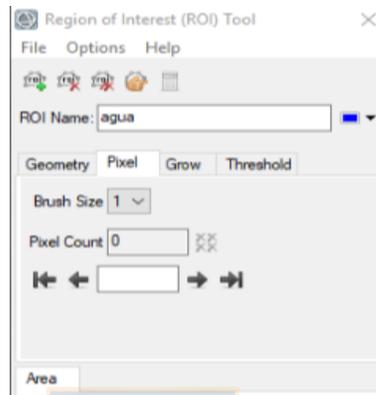
Se utilizará información auxiliar para la clasificación, como índices vegetacionales y datos texturales calculados en el software SNAP toolbox.

#### 5.2.1.1 Selección de las áreas de interés en ROI

Para este proceso se utilizará el software ENVI 5.1, el cual contiene una herramienta exclusiva para crear regiones de interés (ROI), agregando un nuevo ROI para cada cubierta. Las selecciones realizadas se captarán en forma de píxeles, utilizando la opción Grow para expandir el área abarcada según las

características espectrales de la selección hecha con anterioridad. Además, para aumentar la precisión se utilizarán gráficos de dispersión (scatter plot) y perfiles espectrales.

Figura 26: Ventana de Regiones de interés en ENVI



Fuente: Elaboración propia

La cantidad de píxeles por conjunto de entrenamiento teóricamente se establece como  $n+1$ , siendo  $n$  el número de bandas espectrales. Esta premisa se vuelve un tanto básica al afrontar una clasificación con un grado de exactitud mayor debido a que mientras mayor sea el número de píxeles por categoría se reduce la variabilidad espectral del conjunto, lo que permitirá al clasificador elegir mejor las superficies. Según Lillesand, Kiefer, & Chipman (2004), un mínimo de  $10n$  a  $100n$  es usado, ya que los estimadores de los vectores medios y las matrices de covarianza mejoran con una mayor cantidad de píxeles en cada conjunto de entrenamiento.

Otro apartado derivado de los ROI es la distribución que estos tengan en la escena. La importancia de la localización radica en que una cubierta puede o no presentar la misma respuesta espectral en distintos lugares del subset realizado, por lo que se necesita escoger píxeles de varios lugares para un conjunto de entrenamiento específico. Así, por ejemplo, si se tienen 20 sitios con 50 píxeles seleccionados, se tendrían 1000 píxeles en total.

Al tener las áreas de entrenamiento completas se deberá realizar un proceso estadístico de corroboración de las mismas en base a la separabilidad que tengan y su distancia espectral debido a que si existen clases similares se podrían generar errores en la posterior clasificación. Para esto la herramienta “Calculo de distancias espectrales” elabora una matriz en base a los criterios de Jeffries-Matusita (JM), ángulo espectral, distancia euclidiana, y similitud de Bray-Curtis. El primer criterio será usado para observar y evaluar la separabilidad, también llamado Bhattacharyya, este evaluador básicamente es una suma de las distancias al cuadrado el cual en el software ENVI toma valores entre 0 y 2. Cuando el valor de JM es mayor a 1.9, se puede aseverar que el par de ROI tienen buena separabilidad. Si dos ROI tienen separabilidad menor a 1 sería conveniente unirlos o realizar una elección de las áreas de interés con mayor exactitud. Además, el criterio de separabilidad de ángulo espectral y similitud de Bray-Curtis también serán utilizados, donde el primero tiene valores de 0 a 90, siendo más cercano a 90 si las cubiertas son diferentes. Para el de Bray-Curtis varía entre 0 a 100, siendo más cercano a 100 si son más idénticas las cubiertas.

#### **5.2.1.2 Aplicación del Clasificador de “máquina vector de soporte”**

Cuando ya se tengan correctamente creados los ROI, se implementará la clasificación de máquina de vector de soporte. En la selección de clases se incorporarán todas las áreas de interés creadas. La función kernel usada para el cálculo del hiperplano será la “función de base radial” (Radial basis function), el parámetro gamma, que se define hasta dónde llega la influencia de un único ejemplo de entrenamiento y que mientras mayor sea este valor la influencia es menor y mayor cuando el valor es menor. Este parámetro gamma se dejará por defecto. Por otro lado, el parámetro de penalización, que permite un grado de clasificación errónea sacrificando márgenes rígidos, dejará en 50. Mientras más se aumente este valor aumenta el costo de clasificar erróneamente los puntos, generando un modelo preciso que puede no generalizarse bien.

## **5.2.2 Clasificación supervisada basada en el enfoque OBIA**

La segunda clasificación que se aplicará tiene aspectos diferentes a la anterior, aunque sigue la misma lógica de entregar áreas de entrenamiento al programa para que éste decida mediante algún algoritmo que lugares pertenecen a las clases entregadas. Justamente este último paso es el que cambia en este tipo de clasificación, derivando las áreas de entrenamiento de una anterior segmentación de la imagen, primer paso para crear objetos de los píxeles. Todos los pasos realizados para esta clasificación se realizarán eCognition Developers.

### **5.2.2.1 Segmentación (Multiresolución)**

La llamada segmentación se aplicará en base a uno de las tres formas disponibles por el software eCognition. En particular para esta tesis se utilizará el método de segmentación “multiresolución”, el cual es un método ascendente basado en la técnica de combinación de regiones por pares, definiéndose como un procedimiento de optimización de objetos de la imagen, disminuyendo la heterogeneidad promedio y aumentando la homogeneidad respectiva.

Debido a que es un proceso clave para llevar a cabo el enfoque basado en objetos, se realizó un proceso de elección de los parámetros basado en la prueba de distintos valores para el peso de cada banda de la imagen, para el parámetro de escala, la forma de los objetos, y la compacidad. Los dos últimos parámetros, son definidos en su capacidad por el programa Ecognition como:

- Forma: El peso que se le otorga al criterio de forma al segmentar la imagen. Cuando más alto este valor, menor será la influencia del color en la imagen final segmentada.
- Compacidad: Define el criterio de compacidad. Cuando mayor es este valor, más compactos son los objetos creados en la imagen.

### **5.2.2.2 Asignación de clases**

Posterior a la segmentación se debe realizar el proceso homólogo a las regiones de interés, dando las categorías a cada objeto de la segmentación. Esta asignación se debe hacer con una precisión que permita descartar los objetos con doble categorización aparente, en otras palabras, que sean lo más exactos posibles para evitar la acumulación de píxeles de otra categoría. En este paso se agregarán expresiones que distingan cada clase en especial, por ejemplo: forma, tamaño, valores de la capa, posición, etc.

### **5.2.2.3 Entrenamiento y aplicación del clasificador**

Para lograr correr el clasificador primero se debe entrenar el mismo, para esto se utilizará el algoritmo “Classifier” con la operación de entrenamiento (train). En esta fase se deberá entregar al programa las características espaciales y los parámetros específicos del clasificador. Una vez aplicado, se podrá aplicar el clasificador con el mismo algoritmo.

### **5.2.3 Delimitar y clasificar los tres humedales específicamente**

Con los resultados de las clasificaciones realizadas en el objetivo específico número 4, se tendrá el límite y área de cada humedal estudiado, lo cual permitirá aislar cada una de estas para trabajarlas por separado. El valor de poder separar la superficie de los humedales de las cubiertas circundantes radica en la posibilidad de caracterizar fisiográficamente mejor su interior, dejando de lado la información externa a estos.

Para lograr este objetivo específico se tendrá que recortar la imagen utilizada para la clasificación por medio de la nueva superficie clasificada como humedal marisma. Este proceso dará paso a un nuevo tipo de clasificación enfocada a los elementos característicos de los humedales marismas en base a criterios morfológicos, visuales, y espectrales. Una vez cortada la imagen, se ingresarán nuevamente a los programas en que se desarrollaron las primeras clasificaciones, dónde se utilizará el mismo tipo de clasificación, pero esta vez

enfocando la identificación específica en el interior de cada humedal, teniendo en cuenta el factor de la escala para cada imagen.

Tabla 13: Tipos de morfologías internas para los tres humedales estudiados

Morfologías Internas Humedal
Llanura mareal
Plataforma de la marisma
Canales de marea
Pannes
Estuario
Cuerpos de agua

Fuente: Elaboración propia

La clasificación indicada se basará en propuestas de clasificación de Cowardin (1979), Conservación costera del estado de California y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. Distrito de san francisco (1998), Davis y Dalrymple (2012), Mitsh y Gosselink (2015). Cada uno de estas propuestas se enfocan en distintos parámetros para darle clasificación al humedal y a diferentes escalas. Se tomará de Cowardin el enfoque en las macro clases para el sistema estuarino, de Davis y Dalrymple lo relacionado a las redes de arroyos o canales de marea, y de la conservación costera de California y Mitsh-Gosselink los factores morfológicos principales.

### 5.3 Comparación del desempeño de cada tipo de enfoque

Posterior a la obtención de las clasificaciones de los humedales estudiados, se debe realizar una verificación de los resultados con la finalidad de asignar un valor cuantitativo al grado de certeza de nuestra clasificación en relación a la realidad, o con la base a la que se quiera comparar. Para abordar este objetivo específico se calcularán estadísticas para el desempeño de cada clasificador y

se llevará a cabo una toma de muestras que permita realizar una valoración posterior entre la clasificación y los valores reales.

Para medir la fiabilidad de los datos cualitativos de las clasificaciones realizadas se utilizarán una serie de muestras independientes, totalmente separadas de los datos obtenidos mediante los modelos, con la finalidad de dar robustez estadística a la verificación de los resultados. Para este objetivo se necesitarán desarrollar tres pasos según la metodología de Chuvieco (2002): diseño del muestreo para la verificación; recogida de los datos; y cálculo de la medida del error. Cada uno de estos pasos será desarrollado a continuación.

### **5.3.1 Diseño del muestreo**

El diseño del muestreo va a ser la base para lograr desarrollar la verificación, ya que los datos recolectados en este punto serán los que entregarán la real información de los datos que se estudia. Lo anterior conlleva necesariamente el problema de la representatividad, el cual debe ser abordado de forma que los datos que se seleccionen en las muestras representen adecuadamente la fiabilidad del conjunto de los datos.

Un primer paso para elegir los datos a recolectar es determinar qué tipo de variable se trabaja, discreta o continua. La importancia de esta asociación va a determinar la técnica estadística a trabajar. En el caso de la presente tesis las variables que se trabajarán caen en la catalogación de discretas, debido a que responden a un tipo de representación cualitativa del territorio.

El segundo paso es determinar cuál será la unidad de muestreo que se ocupará. En los casos trabajados y considerando la superficie que ocupa cada subset, se considerará el pixel de 10 metros cuadrados como la unidad muestral elegida.

Como tercer paso se necesita saber el tipo de muestreo que recogerá los datos del terreno. Si bien la clasificación general del subset de cada humedal supondría con mayor énfasis un muestreo aleatorio estratificado para centrar la cantidad de

puntos en la propia marisma, se utilizará el muestreo aleatorio debido otra vez a la superficie que supone cada subset de imagen clasificada. Lo mismo se hará para la clasificación específica.

Para terminar el diseño del muestreo, como paso número cuatro, el tamaño de la muestra cobra radical importancia para fortalecer el análisis estadístico. Para las variables cualitativas que conforman la imagen clasificada, se recomienda utilizar la distribución binominal de probabilidad (Chuvienco, 2002), la cual entrega el número de éxitos al realizar  $n$  experimentos independientes entre sí, enfocado en una variable aleatoria. Por lo tanto, la expresión a utilizar sería:


$$n = \frac{z^2 pq}{L^2}$$

$n$ : el tamaño de la muestra

$z$ : la abscisa de la curva normal para un valor específico de probabilidad

$p$ : porcentaje estimado de aciertos

$q$ : porcentaje estimado de errores ( $1-p$ )

$L$ : el nivel permitido de error

### 5.3.2 Recogida de datos

La recogida de la información consiste en la obtención de los valores de las variables que se están estudiando para verificar posteriormente con los valores estimados por los modelos aplicados. En el caso de esta tesis se ocuparán documentos auxiliares para realizar la comprobación posterior, esto es, el uso de imágenes aéreas de una fecha cercana a la trabajada. Las imágenes serán obtenidas de la aplicación Google Earth Pro para los tres subset trabajados,

donde se incorporarán los puntos de las muestras calculadas anteriormente mediante el muestreo elegido. El número de puntos de control será de 100 para cada subset trabajado, valores que servirán para realizar el apartado siguiente.

### **5.3.3 Medidas del error**

Una vez se tenga los valores de referencia en el terreno y los datos obtenidos de las clasificaciones para un punto o ventana de muestreo específica, se podrá evaluar la exactitud de la clasificación. La relación que tengan estas dos fuentes de información se relacionarán mediante el resumen de la misma en una matriz de error, comúnmente llamada matriz de confusión, la cual según Congalton (1991), se puede utilizar como punto de partida para una serie de técnicas estadísticas descriptivas y analíticas.

La estructura de la matriz de confusión consta de  $K$  clases o categorías, conformando una matriz cuadrada ( $K \times K$ ). En el caso de las columnas, estas representan las referencias tomadas en terreno o el valor real discreto. Para el caso de las filas, estas representan la información entregada por la clasificación específica. En esta matriz, la diagonal representa los pixeles o polígonos que concuerdan con la realidad, en otras palabras, el número de aciertos. Para el caso de los valores residuales de las columnas, significan tipos de cubiertas de la realidad que no se agregaron al mapa (errores de omisión), en cambio, los residuales en las filas representan lugares en la clasificación que en la realidad tienen otra catalogación (errores de comisión).

La presente tesis expondrá diferentes matrices de confusión, las primeras serán en base a las áreas de entrenamiento y los valores entregados por la clasificación, y posteriormente se entregará las matrices derivadas de la comparación con los datos reales en terreno y las clasificaciones.

Una vez se tengan las matrices desarrolladas, se calcularán algunas medidas e índices que nos entreguen más información sobre la precisión de cada una de las clasificaciones. Las medidas de fiabilidad global, fiabilidad real alcanzada, fiabilidad del productor y la del usuario, y el índice Kappa serán los encargados de fortalecer el análisis de las clasificaciones. El primero de estos, la fiabilidad global, es una medida simple que relaciona los elementos de la diagonal con la totalidad de los puntos muestreados. La expresión que calcula este valor está dado por:

$$\hat{F} = \frac{\sum_{i=1, n} x_{ii}}{\sum_{i=1, n} \sum_{j=1, n} x_{ij}}$$

Donde el valor calculado por la sumatoria en el numerador, son los valores de la diagonal principal, por otro lado, el valor de la sumatoria en el denominador, es la suma de los valores de referencia y los de la clasificación.

La fiabilidad real alcanzada permite entregar un intervalo de confianza en que se encuentra la clasificación, para esto se resuelve la siguiente expresión:

$$F = \hat{F} \pm z \cdot EM$$

Donde el valor EM es el error de muestreo, el cual se puede calcular con la fórmula del muestreo aleatorio simple:

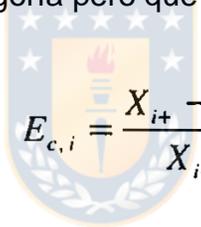
$$EM = \sqrt{\frac{pq}{n}}$$

Por otra parte, están la fiabilidad del usuario y la del productor. La fiabilidad del usuario se relaciona con los errores de omisión ( $E_o$ ), el cual indica el número de pixeles que pertenecen a una categorización específica, y que en la clasificación, pertenecieron a otra. Ese valor se consigue mediante la siguiente expresión:

$$E_{o,i} = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}}$$

Donde  $X_{+i}$  es el total de las columnas  $i$ , y  $X_{ii}$  es el valor de la diagonal principal.

Por otro lado, la fiabilidad del productor o error de comisión, comprende los valores que no se encuentran en la diagonal de cada fila, lo cual es, los pixeles que se asignaron a una categoría pero que realmente pertenecen a otra distinta.



$$E_{c,i} = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}}$$

Donde  $X_{i+}$  es el total de las filas  $i$ .

Las relaciones múltiples entre las distintas categorías serán abordadas por el análisis Kappa (Cohen, 1960), el cual mediante el estimador estadístico KHAT, mide la diferencia entre el acuerdo mapa/realidad observado y un clasificador aleatorio, para medir la fiabilidad del método ocupado.

El estadístico KATH se deriva de la fórmula siguiente:

$$\hat{\kappa} = \frac{n \sum_{i=1, n} X_{ii} - \sum_{i=i, n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=i, n} X_{i+} X_{+i}}$$

Dónde  $n$  es el tamaño de la muestra.

El valor de  $\hat{K}$  incorpora indirectamente los errores, usando la suma de los totales de las filas y columnas en el cálculo del estadístico. Por esto, cada medida representa información diferente y debe ser evaluada consecuentemente (Thenkabail, 2015). Para poder describir cualitativamente la fuerza relativa de acuerdo al estadístico Kappa, Landis y Koch (1977)<sup>10</sup>, asignaron rangos a manera de etiquetas para poder tener puntos de referencia claros. Los rangos serían:

Tabla 14: Nivel de concordancia índice Kappa

Estadístico Kappa	Fuerza de la concordancia
< 0	Pobre
0.00 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Justa
0.41 - 0,60	Moderada
0,61 - 0,80	Sustancial
0,81 - 1,00	Casi perfecta

Fuente: Landis y Koch (1977)

<sup>10</sup> The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data

## **6. RESULTADOS**

### **6.1 Objetivo específico 1**

#### **6.1.1 Delimitaciones en estudios anteriores**

Para consideraciones posteriores se necesita conocer las delimitaciones realizadas con anterioridad de los humedales estudiados. Para cada caso se obtuvo los resultados de tesis de pregrado, donde el humedal Rocuant-Andalién se muestra identificado para el año 2014. En el caso de los humedales Lengua y Tubul-Raqui, se tomaron las identificaciones realizadas por la misma autora para el año 2009.

##### **6.1.1.1 Humedal Rocuant-Andalién Munizada (2015)**

El trabajo realizado por Munizaga (2015) en relación a su tesis “CAMBIOS EN LA SUPERFICIE DEL HUMEDAL ANDALIÉN-ROCUANT 2004-2014”, se elaboró con criterios asociados a la vegetación (índices vegetacionales), geomorfológicos, datos asociados a usos de suelo, e inspección en terreno, todos ellos ingresados posteriormente a un SIG. Como la tesis generaba dos delimitaciones, una para el año 2004 y otra para el 2014, se escogió el año más reciente para realizar una comparación más actualizada.

Figura 27: Propuesta delimitación humedal Rocuant-Andalién

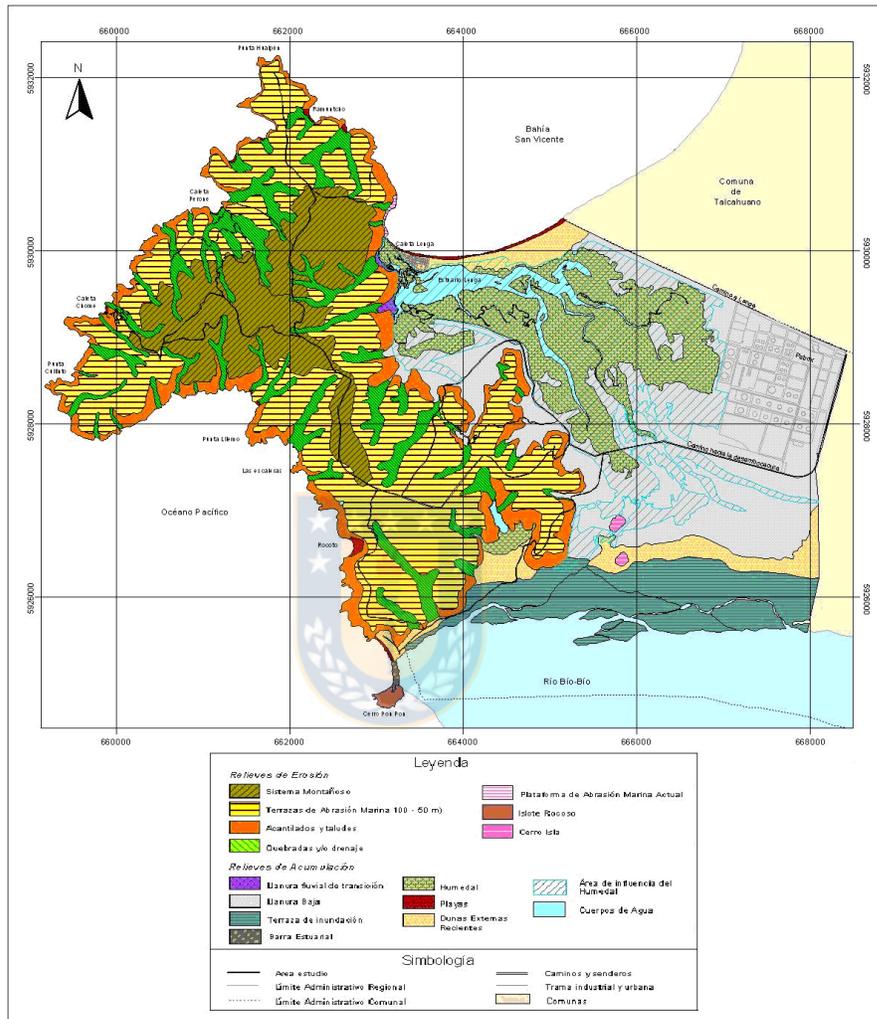


Fuente: Munizaga (2014)

### 6.1.1.2 Humedal Lengua y Tubul-Raqui

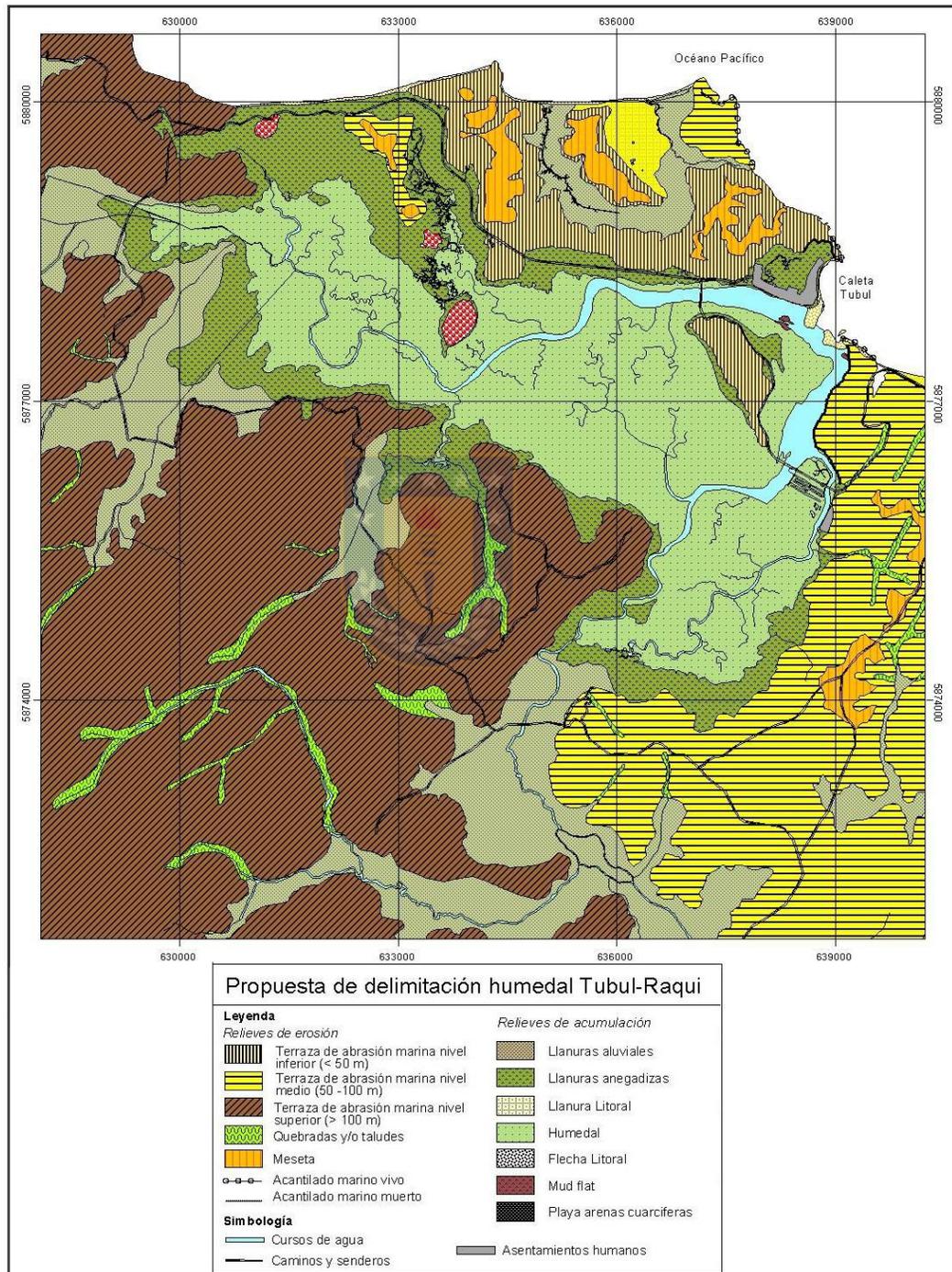
Para el caso de estos dos humedales, Vásquez (2009), en su tesis "Delimitación y zonificación de los humedales costeros de Lengua y Tubul-Raqui: Orientaciones para el Ordenamiento Territorial de la Región del Bío-Bío", se utilizó criterios vegetacionales mediante índices, específicamente el usado es el DVI (Difference Vegetation Index), e información base asociada a su geomorfología, utilizando técnicas de teledetección.

Figura 28: Propuesta delimitación humedal Lengua Vazquez (2009)



Fuente: Vásquez (2009)

Figura 29: Propuesta delimitación humedal Tubul-Raqui Vazquez (2009)



Fuente: Vázquez (2009)

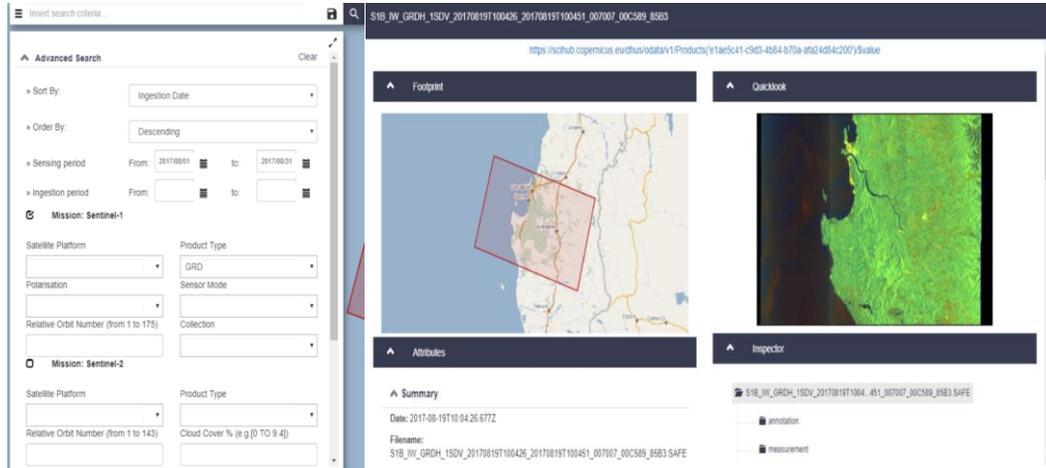
## **6.1.2 Adquisición, preprocesamiento, y creación de stack**

### **6.1.2.1 Descarga imagen Radar Sentinel 1 e imágenes Sentinel 2**

Para la descarga de las imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2 se utilizó la plataforma del programa Copérnico, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Dicha plataforma permite la descarga de conjunto de imágenes de las misiones Sentinel 1, Sentinel 2, y Sentinel 3. Una vez registrado se puede acceder a la descarga y búsqueda de información en base a distintos criterios.

La primera búsqueda se realiza para la imagen Sentinel 1 tipo GRD de nivel 1 (Ground Range Detected), la cual se ha formado bajo múltiples vistas proyectadas en el rango del terreno usando el modelo WGS84 de elipsoide. El producto tiene una banda con frecuencias que se encuentran en el intervalo de 8000 - 4000 MHz, lo que viene a ser 3.9 - 7.5 cm respectivamente. Conocida esta banda igualmente como banda C tiene una capacidad de penetración media sobre el dosel bajo una mirada cualitativa, siendo la banda L (15-30 cm) la más adecuada para lograr distinguir zonas inundadas en humedales, pero como las condiciones de las marismas estudiados no tienen un dosel tan pronunciado no se vería demasiada alterada la posibilidad de detectar estas zonas por parte del sensor utilizado. La polarización perteneciente a la imagen es dual VH-VV (transmite la señal en vertical y recibe en horizontal-transmite la señal en vertical y recibe en vertical)

Figura 30: Tabla de búsqueda y vista previa de la imagen Sentinel 1 GRD



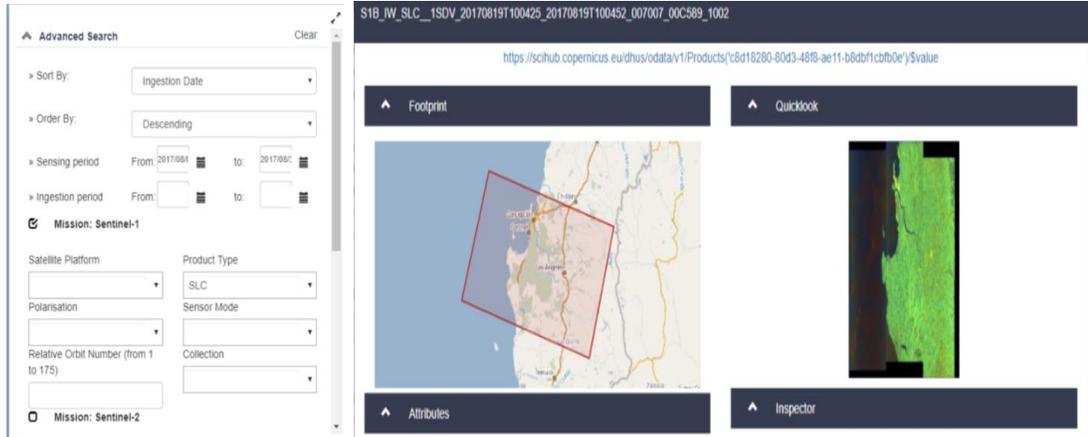
Fuente: Elaboración propia

Características	Imagen 1 Sentinel 2
Nombre	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170819T100426_20170819T100451_007007_00C589_85B3.SAFE
Fecha	19/08/2017
Instrumento	SAR-C
Tamaño archivo comprimido	1.7 GB (rar)
Modo	IW

Fuente: Elaboración propia

La segunda imagen pertenece también al nivel 1, siendo esta vez la de tipo SLC (Single Look Complex), la cual contiene información de fase. Si bien no se realizará polarimetría, se convertirá al tipo GRD para estandarizar y obtener información adicional del terreno. Esta imagen tiene los datos técnicos iguales a la imagen anterior.

Figura 31: Tabla de búsqueda y vista previa de la imagen Sentinel 1 SLC



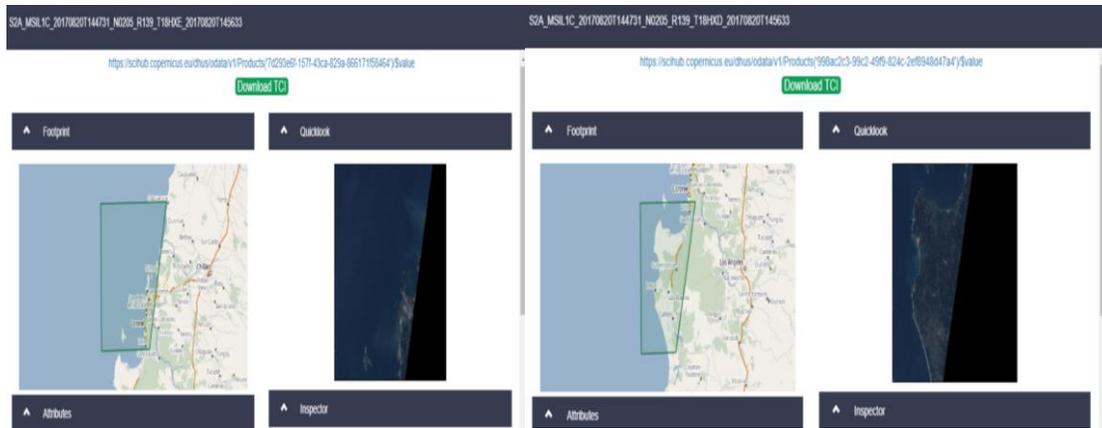
Fuente: Elaboración propia

Características	Imagen 2 Sentinel 2
Nombre	S1B_IW_SLC__1SDV_20170819T100425_20170819T100452_007007_00C589_1002.SAFE
Fecha	19/08/2017
Instrumento	SAR-C
Tamaño archivo comprimido	7.76 GB (rar)
Modo	IW

Fuente: Elaboración propia

Las imágenes del sensor Sentinel 2 fueron buscadas para el mismo rango de fechas, pero como las áreas de estudio no se encontraban en una imagen, se descargaron dos imágenes distintas.

Figura 32: Vistas previas de las dos imágenes Sentinel 2 trabajadas.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Características imágenes satelitales descargadas

Características	Imagen 1 Sentinel 2	Imagen 2 Sentinel 2
Nombre	S2A_MSIL1C_20170820T144731_N0205_R139_T18HXE_20170820T145633.SAFE	S2A_MSIL1C_20170820T144731_N0205_R139_T18HXD_20170820T145633.SAFE
Fecha	2017-08-20	2017-08-20
Instrumento	MSI	MSI
Tamaño archivo comprimido	424.96 MB (rar)	355.53 MB (rar)
Porcentaje de cubierta nubosa	0%	10611%

Fuente: elaboración propia

### 6.1.2.2 Corrección de imágenes

#### 6.1.2.2.1 Corrección Sentinel 2

Las imágenes Sentinel 2, como se explicó en el apartado metodológico, serán corregidas atmosféricamente por el complemento Sen2cor. Las dos imágenes que se utilizarán serán expuestas a la misma corrección, excluyendo las bandas B1-B8a-B9 posterior al calibrado. En la figura N° 33 se muestran las dos

imágenes en una composición color natural RGB (B4-B3-B2) previa clasificación. Las estadísticas básicas de cada imagen se muestran en las Tablas 16 y 17:

Tabla 16: Estadísticas básicas y número de pixeles de cada banda de la imagen 1 Sentinel 2

Bandas	Imagen 1 Sentinel 2 (Reflectancia BOA sin CA)			
	Min	Max	Promedio	Pixeles totales
B1	0,106	0,442	0,127	2,52E+06
B2	0,049	1,084	0,092	9,06E+07
B3	0,036	1,155	0,059	9,07E+07
B4	0,012	1,547	0,034	9,08E+07
B5	0,000	0,914	0,031	2,27E+07
B6	0,000	0,940	0,031	2,27E+07
B7	0,000	1,063	0,030	2,27E+07
B8	0,000	1,510	0,027	9,07E+07
B8a	0,000	0,939	0,027	2,27E+07
B9	0,000	0,242	0,013	2,52E+06
B10	0,000	0,017	0,003	2,52E+06
B11	0,000	1,276	0,013	2,28E+07
B12	0,000	2,058	0,009	2,28E+07

Fuente: Elaboración propia

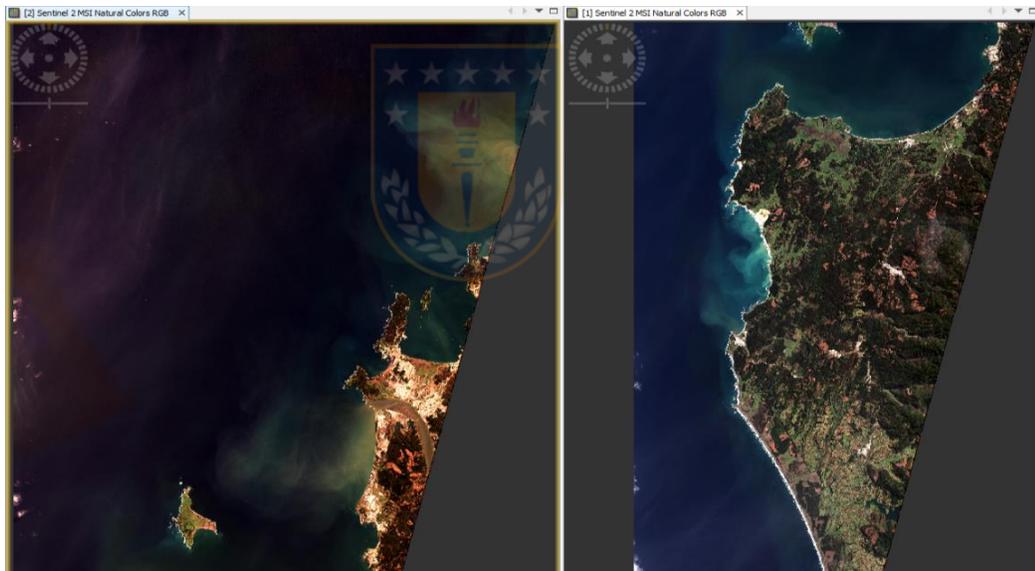
Tabla 17: Estadísticas básicas y número de pixeles de cada banda de la imagen 2 Sentinel 2

Bandas	Imagen 2 Sentinel 2 (Reflectancia BOA sin CA)			
	Min	Max	Promedio	Pixeles totales
B1	0,103	0,519	0,125	1,76E+06
B2	0,058	1,006	0,092	6,33E+07
B3	0,037	1,031	0,064	6,34E+07
B4	0,014	1,116	0,042	6,35E+07
B5	0,000	0,779	0,050	1,59E+07

B6	0,000	0,809	0,090	1,59E+07
B7	0,007	0,791	0,107	1,59E+07
B8	0,008	1,143	0,105	6,34E+07
B8a	0,000	0,855	0,116	1,59E+07
B9	0,000	0,199	0,046	1,77E+06
B10	0,000	0,011	0,004	1,77E+06
B11	0,000	1,055	0,046	1,59E+07
B12	0,000	1,026	0,024	1,60E+07

Fuente: Elaboración propia

Figura 33: Vista en composición color (bandas 4-3-2) de las imágenes Sentinel 2 descargadas



Fuente: Elaboración propia

- Parámetros elegidos para la corrección atmosférica de las imágenes

Como se mencionaba en el apartado metodológico la corrección trabaja con información almacenada en librerías en forma de tablas de consulta (LUT), las que recogen información referida a: geometría solar y del sensor; elevación del terreno; y parámetros atmosféricos (ESA, 2018). Para estos parámetros se debe calcular las funciones de transferencia radiativa, las cuales explican cómo se

transfiere esta energía en forma de radiación electromagnética, alterada por procesos de emisión, absorción, y dispersión (Migenes & Andernach, 2005). Los datos pertenecientes a las tablas de consulta, son adquiridos en la librería de LibRadtran, los cuales se usarán para el cálculo de la radiación solar y termal en la atmósfera de la tierra. Para las imágenes de la misión Sentinel 2 existen un conjunto de 24 LUTs para la mayoría de las condiciones atmosféricas de la tierra, siendo las que calcula Sen2cor: dos distintos tipos de aerosoles; dos distintos tipos de atmósferas; seis diferentes tipos de concentraciones de ozono; y seis o cuatro distintas cantidades de columnas de vapor de agua.

Para comprender los parámetros usados en la corrección atmosférica se definirán las características más importantes que se aplicarán al modelo

- Tipo aerosoles

El modelo de corrección, ATCOR, soporta cuatro tipos básicos de aerosol: rural; urban; marítimo; y desértico. En el complemento Sen2cor sólo dos de estos tipos de aerosol son disponibles (rural y marítimo). La elección de este parámetro se basará en la posición geográfica de la escena trabajada, en caso de que no se esté seguro, existe la posibilidad de escoger la opción automática, la cual mediante la comparación de la dispersión de la radiancia atmosférica (path radiance) para la región azul, con la información del canal leído en relación a los valores obtenidos de las LUTs.

- Estimación de la visibilidad

La visibilidad, definida como la máxima distancia horizontal en la cual el ojo humano puede reconocer un objeto oscuro en contra de la luminosidad del cielo (Ritcher y Schlapfer, 2016), está dispuesta en un rango de 5 a 120 km. Por defecto Sen2cor tiene este parámetro en 40 km de visibilidad, pero calcula subsiguientemente este parámetro con la información de pixeles de suelo oscuro y vegetación oscura junto con la información de las LUTs.

- Columna de vapor de agua

El cálculo del contenido de vapor de agua en la atmósfera es derivado de las bandas en la región respectiva (920-960 nm), para la Sentinel 2, las bandas B8a y B9. La recuperación del vapor de agua en tierra se realiza mediante el algoritmo de absorción diferencial pre-correctado atmosférico, que utiliza la banda B8a como ventana atmosférica de referencia y la B9 como canal de medición en la región de absorción.

- Función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF)

Según Riechter y Shlapfer (2012), en muchos casos el comportamiento de la reflectancia de las cubiertas depende de la geometría de iluminación solar, el cual es descrito por la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF). Los efectos del BRDF son causados porque el ángulo de visión del sensor varía en un rango grande, mostrando altos brillos (hot spot) en casos extremos y para otros ángulos bajos valores. Para la corrección del BRDF existe un método llamado normalización del nadir o corrección de iluminación transversal, el que se utiliza para calcular el brillo como una función del ángulo de escaneo, multiplicando los valores de cada pixel con su función recíproca.

En el caso de sen2cor aplica la corrección BRDF empírica el cual se basa en el mapa de iluminación local (ángulo cenital solar local), derivado de la pendiente, orientación, y canales de sombras.

Tabla 18: Parámetros usados para la corrección ATCOR aplicada en el complemento Sen2cor de SNAP Toolbox para ambas imágenes

Parámetros	Valores elegidos
Tipos de Aerosol	Automático
Características de la Atmósfera	Invierno
Contenido ozono	W-377 (MW estándar para latitudes medias en invierno)
Corrección de vapor de agua	3: ambas regiones utilizadas durante la recuperación del vapor de agua (B8a-B9)
Visibilidad (VIS)	1: visibilidad variable
Máscara de vapor de agua	1: promedio terrestre
Corrección de cirros	VERDADERO: se aplicó la corrección del cirro
Corrección de la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF)	21 (estándar recomendado en la mayoría de los casos)
Función de distribución de reflectancia bidireccional / límite inferior	0,22 (valor por defecto)
Unidad del DEM	(0=[m], 1=[dm], 2=[cm])
Visibilidad	visibilidad 40 km
Altitud	0.1 km (por defecto pero será calculado por el DEM)
DEM	SRTM 90m
Suavizado mapa vapor de agua	100 (valor por defecto)
Vapor de agua / límite cirrus	0,25 (valor por defecto)

Fuente: elaboración propia

En las Tablas 6.5 y 6.6, se pueden ver los valores mínimos, máximos, promedio, y los pixeles totales que conforman cada banda corregida atmosféricamente.

Tabla 19: Reflectancias BOA con corrección atmosférica Imagen 1 Sentinel 2

Bandas	Imagen 1 Sentinel 2 (Reflectancia BOA con CA)			
	Min	Max	Promedio	Pixeles totales
B1	0,000	0,588	0,024	2,52E+06

B2	0,000	1,128	0,010	2,27E+07
B3	0,000	1,538	0,022	9,07E+07
B4	0,000	1,600	0,012	9,07E+07
B5	0,000	1,128	0,010	2,27E+07
B6	0,000	1,096	0,012	2,27E+07
B7	0,000	1,183	0,014	2,27E+07
B8	0,000	1,556	0,016	9,07E+07
B8a	0,000	1,011	0,014	2,27E+07
B9	0,000	0,744	0,012	2,52E+06
B10	-	-	-	-
B11	0,000	1,411	0,009	2,27E+07
B12	0,000	1,507	0,006	2,27E+07

Fuente: Elaboración propia

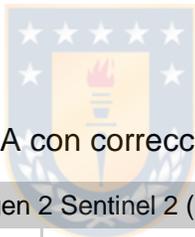


Tabla 20: Reflectancias BOA con corrección atmosférica Imagen 2 Sentinel 2

Bandas	Imagen 2 Sentinel 2 (Reflectancia BOA con CA)			
	Min	Max	Promedio	Pixeles totales
B1	0,000	0,705	0,020	1,76E+06
B2	0,000	1,387	0,022	6,34E+07
B3	0,000	1,416	0,029	6,34E+07
B4	0,000	1,337	0,021	6,34E+07
B5	0,000	0,941	0,032	1,58E+07
B6	0,000	0,928	0,079	1,58E+07
B7	0,000	0,859	0,096	1,58E+07
B8	0,000	1,261	0,101	6,34E+07
B8a	0,000	0,900	0,106	1,58E+07
B9	0,000	0,570	0,105	1,76E+06
B10	-	-	-	-
B11	0,000	1,140	0,045	1,58E+07
B12	0,000	1,180	0,023	1,58E+07

Fuente: Elaboración propia

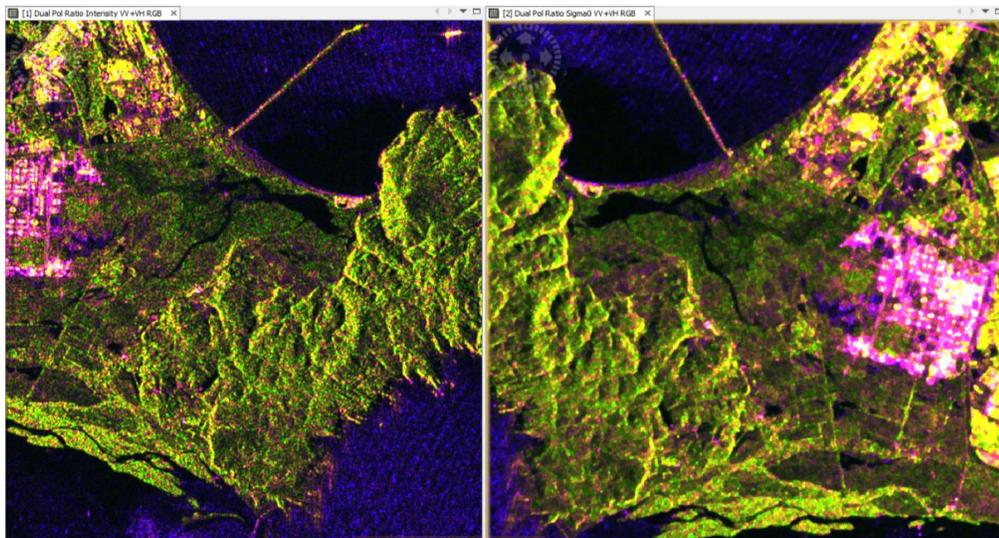
### 6.1.2.2.2 Corrección imágenes Sentinel 1 GRD y SLC

#### Imagen GRD

Las imágenes de radar Sentinel 1 deben ser sometidas a otro tipo de corrección diferente a las imágenes del sensor Sentinel 2. Para las imágenes de radar se aplicará un diferente orden de procesos para llegar a resultados similares que concuerden con la retrodispersión de los objetos en la superficie, los cuales serán representados para la polarización dual (VV-VH) en valores sigma nulo (decibel)..

En la figura 33 se observa un subset que incorpora la marisma lenga para las imágenes Sentinel 1 GRD con una composición RGB de relación dual polarización de intensidad y sigma cero VV+VH (rojo: sigma cero VV - green: sigma cero VH - azul: sigma cero VV/sigma cero VH). Al lado izquierdo se observa la imagen radar con valores de intensidad sin corregir, y a la derecha, valores corregidos en sigma cero. Se puede apreciar la dirección de la imagen sin corregir, además del moteado inherente a esta, por el lado derecho vemos que se a corregido la dirección y el moteado.

Figura 34: Subset humedal Lengua valores sin corregir vs valores corregido en sigma cero



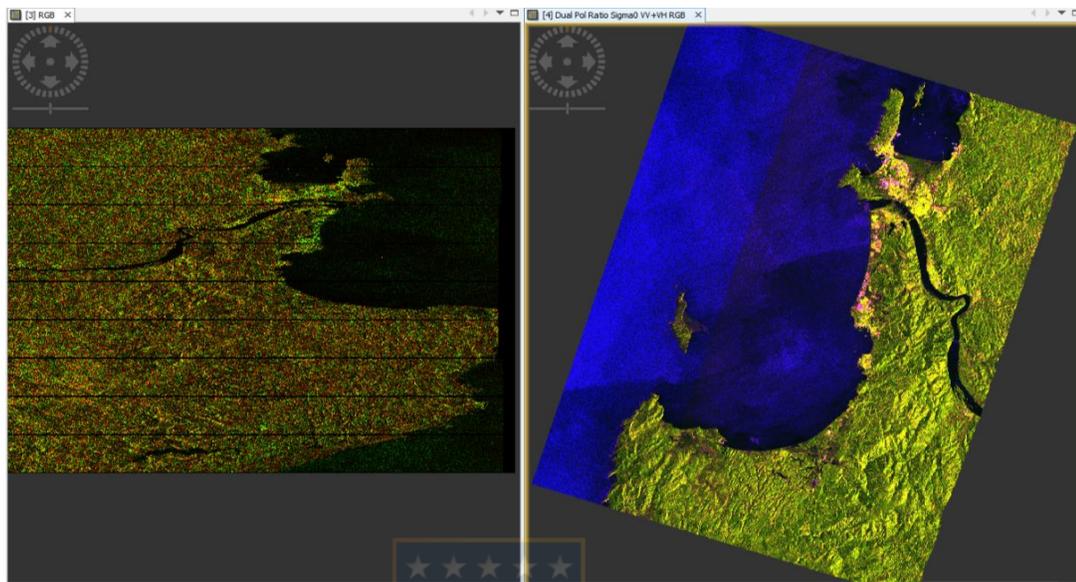
Fuente: Elaboración propia

### Imagen SLC

La imagen radar de tipo SLC si bien no será ocupada su información de fase para aplicar un proceso polarimétrico, se transformará a producto de tipo GRD para agregar mayor información a la clasificación. Los resultados del proceso de transformación nos entregarán valores en sigma cero, los cuales serán corregidos geoméricamente (corrección de terreno).

En la figura 34 se puede ver en la imagen de la izquierda la un subset de la imagen Sentinel 1 SLC no corregida, mientras que, a la derecha, un subset con la imagen corregida para la misma zona.

Figura 35: Imagen Sentinel 1 SLC, comparación antes y después de la corrección



Fuente: Elaboración propia

### 6.1.2.3 Creación de información auxiliar en base a subescenas (Índices espectrales - DEM-texturas)

Con los polígonos creados en base a la zona de influencia de los humedales delimitados por los autores citados, se cortaron las imágenes sentinel 2 corregidas y borraron las bandas B1-B9-B10. Mientras que para las imágenes Sentinel 1 se realizó el mismo proceso. De esta forma se obtuvieron 9 imágenes en total, tres por cada marisma. El número de bandas por cada imagen es de: 10 bandas de Sentinel 2; 2 bandas de Sentinel 1 GRD; y 2 bandas de Sentinel 1 SLC transformado en GRD.

El proceso anterior es relevante para disminuir el área de trabajo y así trabajar más específicamente en la inclusión de información auxiliar que ayudará a la discriminación de cubiertas y nos da valores de referencia para incorporar en la clasificación. En el software SNAP toolbox se llevó a cabo el desarrollo de 10

índices espectrales, relativos al componente agua, vegetación, y suelo. En las tablas siguientes se resumen los valores mínimos, máximos, y promedio de cada índice espectral para los subset de las respectivas marismas.

Tabla 21: Estadística básica índices espectrales subset Rocuant-Andalién

Subset Rocuant-Andalién			
Índice espectral	MIN	MAX	Promedio
NDWI2	-0,9922	1	0,1960
MNDWI	-0,9964	0,9953	0,0214
NDPI	-0,9961	1	0,0817
NDTI	-0,9636	0,9	-0,1963
NDVI	-0,9868	0,997	0,0624
DVI	-0,1785	0,5861	0,0672
RVI	0	670,0001	2,5714
GEMI	-1,8482	17,9208	0,3318
IRECI	-0,1905	3,3135	0,1416
BI2	0	1,1017	0,0836

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22: Estadística básica índices espectrales subset Lengua

Subset Lengua			
Índice espectral	MIN	MAX	Promedio
NDWI2	-0,9968	0,995	-0,3955
MNDWI	-0,99	0,9971	-0,0300
NDPI	-0,996	0,9967	-0,2567
NDTI	-0,9706	0,9259	-0,1447
NDVI	-0,9874	0,9975	0,4385
DVI	-0,2023	0,5534	0,1248
RVI	0	802,0001	7,0358
GEMI	-3,4392	1,0127	0,4497
IRECI	-0,285	2,884	0,3380
BI2	0	0,7992	0,1029

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23: Estadística básica índices espectrales subset Tubul-Raqui

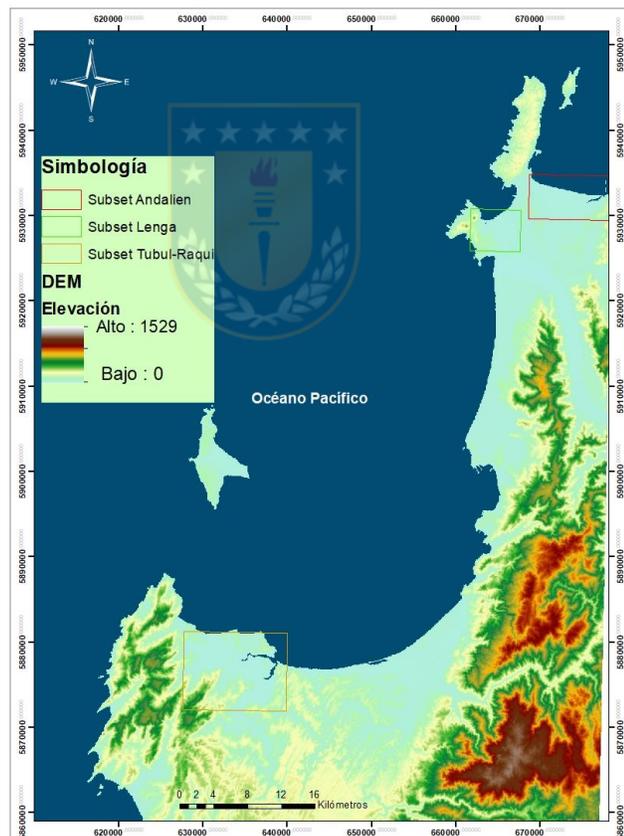
Subset Tubul-Raqui			
Índice espectral	MIN	MAX	Promedio
NDWI2	-0,9915	0,8629	-0,5407
MNDWI	-0,9333	0,9957	-0,0236
NDPI	-0,9755	0,9949	-0,3242
NDTI	-0,9565	0,8261	-0,1326
NDVI	-0,7778	0,9967	0,6009
DVI	-0,1084	0,5646	0,1523
RVI	0	598	7,8735

GEMI	-0,027	1,0215	0,5070
IRECI	-0,4559	2,2921	0,4598
BI2	0	0,4552	0,1122

Fuente: Elaboración propia

El DEM incluido pertenece a la misión topográfica por radar (SRTM) con una resolución de 1 arc-segundo (30 metros). Los valores mínimos, máximos, y promedios de altura para cada subset trabajados están en el Tabla 6.10.

Figura 36: Niveles de altura del SRTM ocupado para la región de interés



Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Estadística básica del DEM para los subset trabajados

DEM			
	Min (m)	Max (m)	Promedio (m)
Andalién	-1	131	12.1
Lenga	-12	252	27.7
Tubul-Raqui	0	360	58.8

Fuente: Elaboración propia

Por último, se calculó valores texturales para cada subset de bandas. Para acotar la información de salida se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) a las 25 bandas de cada zona de estudio, a la cual se seleccionaron los dos componentes que representan el mayor porcentaje de varianza. A estos componentes se le aplicaron la métrica textural de segundo orden varianza con una ventana de 3\*3.

Tabla 25: Estadísticas básicas PCA índices texturales de los subset trabajados

PCA índices texturales			
	MIN	MAX	Promedio
Andalién	0	197,78	2
	0	223,03	2
Lenga	0	161,56	3
	0	243,36	1
Tubul-Raqui	0	121,36	3
	0	208,22	1

Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.2.4 Creación de stack

La creación de los stack finales se realizó una vez creadas las bandas texturales. Aplicando la herramienta Layer Stacking del software ENVI, se unieron las 25 bandas individuales a las bandas obtenidas del análisis de componentes principales, conformando el stack final para cada subset de las áreas de estudio con 27 bandas finales. En el Tabla 26 se enumeran las bandas que componen

cada subset de imagen para cada humedal, con el correspondiente insumo para cada producto (banda stack).

Tabla 26: Conformación de stack para cada humedal

Número banda	Bandas stack	Insumo
1	B2	Bandas Sentinel 2
2	B3	
3	B5	
4	B5	
5	B6	
6	B7	
7	B8	
8	B8a	
9	B11	
10	B12	
11	NDWI2	Índices radiométricos
12	MNDWI	
13	NDPI	
14	NDTI	
15	NDVI	
16	DVI	
17	RVI	
18	GEMI	
19	IRECI	
20	BI2	
21	Sigma 0 VH GRD	Bandas Sentinel 1 GRD y Sentinel 1 SLC
22	Sigma 0 VV GRD	
23	Sigma 0 VH SLC	
24	Sigma 0 VV SLC	
25	PCA 1	Bandas del análisis de componentes principales
26	PCA 2	

27	DEM	Modelo digital de elevación
----	-----	-----------------------------

Fuente: Elaboración propia

## 6.2 Objetivo específico 2

Las clasificaciones supervisadas se realizaron para ambos enfoques con los productos realizados en el objetivo número 1.

### 6.2.1 Enfoque tradicional por pixel

Los procesos realizados en este objetivo se llevaron a cabo en el software ENVI, Arcmap, y SAGA GIS. Para cada clasificación se utilizó el clasificador de Máquina Vector de Soporte

#### 6.2.1.1 Selección de area de interés ROI y número de píxeles

- Clasificación humedal Rocuant Andalién

Tabla 27: ROIS clasificación cubiertas y usos de suelo

ROI cubiertas y usos de suelo	Número de píxeles
Océano	1935
Aguas interiores	1875
Tejido urbano	371
Bosque	2817
Humedal	1684
Playas, dunas, y arenas	385
Asociaciones de matorrales y vegetación herbácea	457
Redes de carreteras y vías	385
Espacios abiertos con pequeña o nula vegetación	575
Unidades industriales comerciales	276
Áreas quemadas	233
Vegetación esparcida	256

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: ROIS clasificación morfología interna humedal

ROI morfología interna humedal	Número de píxeles
Canales de marea	311
Cuerpos de agua	261
Estuario	564
Llanura mareal	321
Plataforma de marisma	1082
Estanques de marea interior	174
Pannes	104

Fuente: Elaboración propia

- Clasificación humedal Lengua

Tabla 29: ROIS clasificación cubiertas y usos de suelo

ROI cubiertas y usos de suelo	Número de píxeles
Bosque	377
Cuerpos de agua	740
Humedal	863
Matorrales y vegetación herbácea	415
Minas, sitios en construcción, vertedero	285
Océano	13034
Playas, dunas, y arenas	241
Redes, carreteras, vías	132
Rocas descubiertas	17
Tejido urbano	80
Unidades industriales	260
Vegetación esparcida	699

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: ROIS clasificación morfología interna humedal

ROI morfología interna humedal	Número de píxeles
Canales de marea	670
Estanques de marea interior	131
Estuario	778
LLanura mareal	503
Pannes	63
Plataforma de la marisma	520

Fuente: Elaboración propia

- Clasificación humedal Tubul-Raqui

Tabla 31: ROIS clasificación cubiertas y usos de suelo

ROI cubiertas y usos de suelo	Número de píxeles
Bosque	1148
Cuerpos de agua	822
Humedal	1271
Matorrales y vegetación herbácea	644
Océano	567
Playas, dunas, y arenas	336
Redes, carreteras, y vías	314
Tejido urbano	240
Vegetación esparcida	315
Suelo descubierto	248

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: ROIS clasificación morfología interna humedal

ROI morfología interna humedal	Número de píxeles
Canales de marea	949
Cuerpos de agua	235
Estuario	625
Estanques de marea interior	634
Llanura de marea	458
Pannes	363
Plataforma de la marisma	1300

Fuente: Elaboración propia

#### 6.2.1.2 Parámetros del clasificador utilizados

Los parámetros que fueron usados en el clasificador de máquina vector de soporte no fueron modificados de los que traían por defecto en los programas ENVI y SAGA GIS.

- Tipo de máquina vector de soporte y parámetro C: El tipo utilizado en las clasificaciones será el C-SVC, el cual tiene el parámetro de penalización o de coste C, el que se dejará por defecto.
- Tipo de función kernel: La función de base radial (RBF) será la que se ocupará.
- Gamma en la función kernel: El valor de gamma influye en nivel de sesgo o influencia que tienen los vectores de soporte entre sí. Si el gamma es pequeño vectores de soporte cercanos se influenciarán mayormente, al contrario, si el gamma aumenta, se incrementa el sesgo y una baja varianza.

Tabla 33: Parámetros usados para el clasificador SVM para CUS y MIH

Parámetros	Clasificación CUS			Clasificación MIH		
	Andalién	Lenga	Tubul	Andalién	Lenga	Tubul
Tipo de SVM	C-SVC	C-SVC	C-SVC	C-SVC	C-SVC	C-SVC
Tipo de kernel	RBF	RBF	RBF	RBF	RBF	RBF
C	100	100	100	1	1	1
Gamma	37	37	37	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.3 Post procesado de clasificación cubiertas y usos de suelo enfoque por pixel

Las clasificaciones generales para los tres humedales fueron procesadas para obtener las máscaras que se utilizó para cortar el subset de imagen principal. Este proceso conforma el perímetro del humedal correspondiente. El proceso englobó los pasos de selección de las cubiertas humedal y cuerpos de agua, los cuales fueron unidos y eliminados los polígonos menores a 0,5 hectáreas, por no ser representativas en base al tamaño del píxel, y el relleno de los huecos que estuvieran en su interior. Las hectáreas de cada cubierta procesadas se mostrarán en las siguientes tablas.

Tabla 34: Hectáreas procesadas de CUS para obtener el límite de corte específico para cada humedal en el Enfoque tradicional

Rocuant-Andalién	Ha. totales	Ha. postprocesado 0.5 Ha. y extraídas	Ha. post procesado final	Total Ha procesadas	Ha. Fusión relleno Final (Perímetro humedal)
Humedal	1136,17	1028,25	1.121	1159,3809	1171,280885
Cuerpos de agua	152,26	93,04	91		
Océano (resta)	1784,05	49,12	53		
Lenga					
Marisma	560,68	487,69	388	452,84	456,01

Cuerpos de agua	110,92	89,29	65		
Tubul-Raqui					
Marisma	2109,1	1937,49	1.817	2488,95	2647
Cuerpos de agua	880,87	736,28	671		

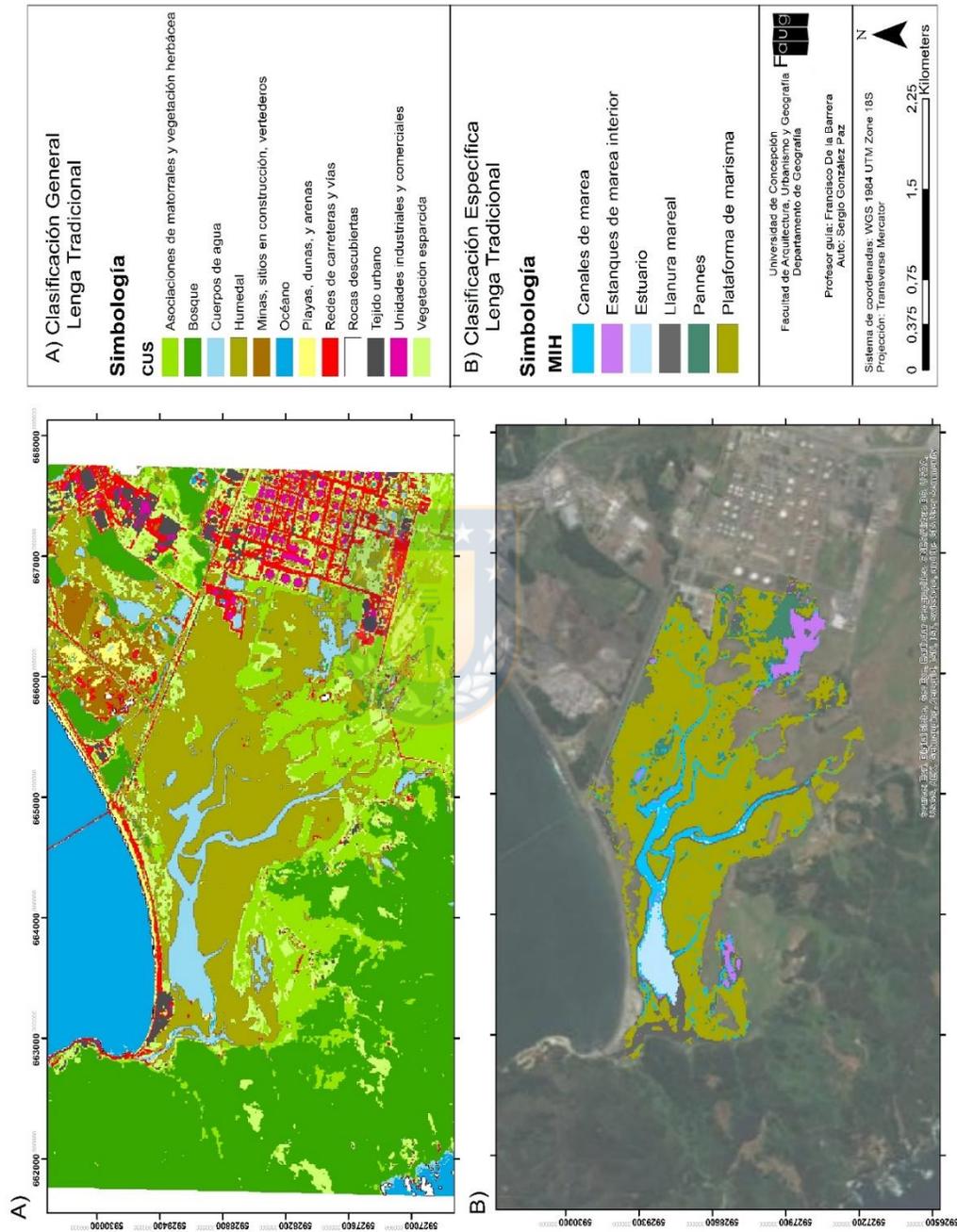
Fuente: Elaboración propia

#### **6.2.1.4 Clasificaciones por enfoque por pixel de las cubiertas y usos de suelo (CUS), y morfología interna para los tres humedales estudiados**



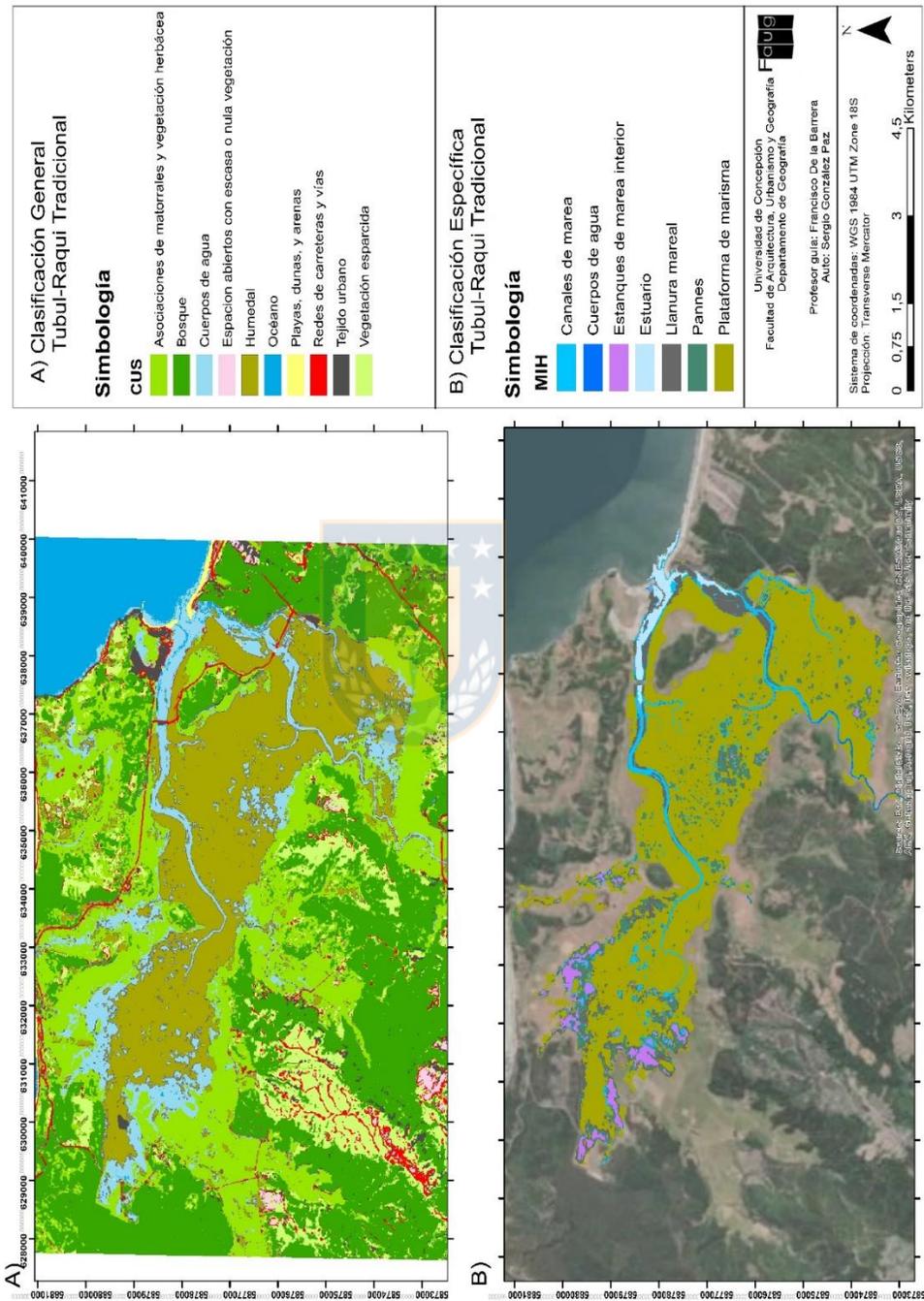


Figura 38: Clasificación Enfoque tradicional CUS y MIH Lengua



Fuente: Elaboración propia

Figura 39: Clasificación Enfoque tradicional CUS y MIH Tubul-Raqui



Fuente: Elaboración propia

## **6.2.2 Enfoque OBIA**

El enfoque basado en objetos se realizó íntegramente en el software Ecognition, especializado para este objetivo, y el software Arcmap, para el proceso de limpieza de polígono y recorte del stack con la primera superficie del humedal general obtenida de la primera clasificación como se realizó para el enfoque tradicional por pixel.

### **6.2.2.1 Segmentación**

El proceso de segmentación se llevó a cabo mediante la ventana de árbol de procesos del software Ecognition. El tipo de segmentación elegido es el multiresolución, el cual fue desarrollado con distintos criterios para cada stack de imagen. Los parámetros de la segmentación son los siguientes:

- **Peso de las bandas de la imagen:** Este parámetro indica el peso que tiene cada una de las bandas para el proceso de segmentación. Dependiendo de las características de las bandas se asignará un peso específico que permita mejorar la segmentación de los conjuntos de píxeles.
- **Parámetro de escala:** Este parámetro ajusta el tamaño de los objetos creados por la segmentación. Un valor más alto generará objetos que incluyan una mayor cantidad de píxeles.
- **Forma:** Este parámetro perteneciente a un criterio de homogeneidad, modifica la forma de los objetos creados. Mientras mayor es este valor, menor es la influencia del color en la segmentación.
- **Compacidad:** También pertenece a un criterio de homogeneidad, el cual indica el peso de la compacidad sobre la creación de objetos. Mientras este valor es mayor, más compacto podrían ser los objetos.

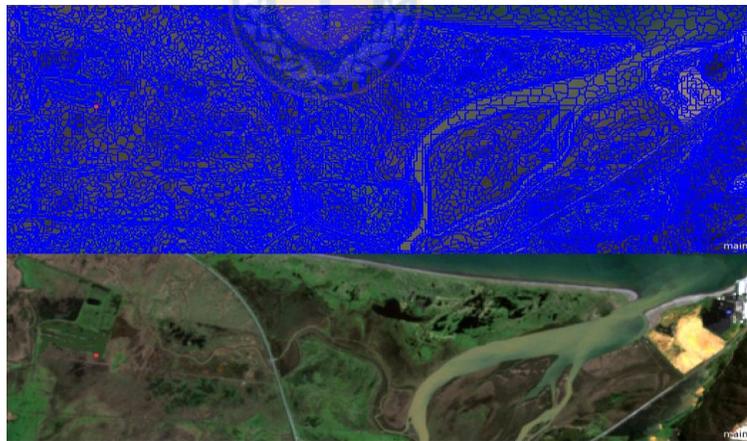
**6.2.2.1.1 Segmentación de los tres humedales estudiados para la obtención de las cubiertas de usos de suelo**

Tabla 35: Parámetros de la segmentación multiresolución CUS

Característica	Rocuant Andalién	Lenga	Tubul-Raqui
Peso de las bandas de la imagen	-Bandas 1-2-3-7 con un peso de 2 -Bandas 4-5-6-8 a 20 con peso 1 -Bandas 21 a 27 con peso 0	-Bandas 1-2-3-7 con un peso de 2 -Bandas 4-5-6-8 a 20 con peso 1 -Bandas 21 a 27 con peso 0	-Bandas 1-2-3-11-12 con un peso de 2 -Bandas 4-5-6-7-8-9-10-13 a 27 con peso 0
Parámetro de escala	0,29	0,29	2
Forma	0,01	0,01	0
Compacidad	0,05	0,05	0

Fuente: Elaboración propia

Figura 40: Ejemplo de segmentación humedal Rocuant-Andalién



Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2.1.2 Segmentación de los tres humedales estudiados para la obtención de la morfología interna del humedal

Tabla 36: Parámetros de la segmentación multiresolución MIH

Característica	Rocuant Andalién	Lenga	Tubul-Raqui
Peso de las bandas de la imagen	-Bandas 1-2-3 con un peso de 2 -Banda 7 con un peso de 1 -Resto de bandas con peso 0	-Bandas 1-2-3-7 con peso 2 -Resto de bandas con peso 0	-Bandas 1-2-3-7-11-12 con peso 2 -Resto de bandas con peso 0
Parámetro de escala	0,2	0,19	0
Forma	0,009	0,01	0
Compacidad	0,01	0,001	0

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2.2 Selección de áreas de entrenamiento por objeto

Clasificación cubiertas y usos de suelo

- Rocuant Andalién

Tabla 37: Número de objetos y píxeles CUS Rocuant-Andalién

Cubiertas y usos de suelo	Objetos	Píxeles
Áreas quemadas	12	553
Bosque	154	1870
Cuerpos de agua	109	2780
Espacios abiertos con pequeña o nula vegetación	36	473
Humedal	240	2431
Matorrales y vegetación herbácea	74	449
Océano	121	1895

Playa, dunas, y arenas	71	1216
Redes, carreteras y vías	166	521
Tejido urbano	212	293
Unidades industriales comerciales	22	243
Vegetación esparcida	83	797

Fuente: Elaboración propia

- Lengua

Tabla 38: Número de objetos y píxeles CUS Lengua

Cubiertas y usos de suelo	Objetos	Píxeles
Bosque	106	203
Cuerpos de agua	98	1508
Humedal	91	1309
Matorrales y vegetación herbácea	43	275
Minas, sitios en construcción, y vertederos	37	523
Océano	61	1204
Playa, dunas, y arenas	31	378
Redes, carreteras y vías	46	573
Rocas descubiertas	7	26
Tejido urbano	39	132
Unidades industriales comerciales	92	336
Vegetación esparcida	75	958

Fuente: Elaboración propia

- Tubul Raqui

Tabla 39: Número de objetos y píxeles CUS Tubul-Raqui

Cubiertas y usos de suelo	Objetos	Píxeles
Bosque	210	907
Cuerpos de agua	140	2571
Humedal	230	2237
Matorrales y vegetación herbácea	138	1055
Océano	136	4288
Playa, dunas, y arenas	64	739
Redes, carreteras y vías	129	999
Suelo descubierto	17	515
Tejido urbano	84	279
Vegetación esparcida	83	375

Fuente: Elaboración propia

#### Clasificación morfología interna humedal

- Rocuant Andalién

Tabla 40: Número de objetos y píxeles MIH Rocuant-Andalién

Morfología interna	Objetos	Píxeles
Canales de marea	95	1532
Cuerpos de agua	26	474
Estanques de marea interior	80	778
Estuario	70	2767
Llanura mareal	63	375
Pannes	38	271
Plataforma de marisma	112	2585

Fuente: Elaboración propia

- Lengua

Tabla 41: Número de objetos y píxeles MIH Lengua

Morfología interna	Objetos	Píxeles
Canales de marea	41	1950
Estanques de marea interior	11	565
Estuario	14	813
Llanura mareal	7	340
Pannes	13	164
Plataforma de marisma	29	1199

Fuente: Elaboración propia

- Tubul Raqui

Tabla 42: Número de objetos y píxeles MIH Tubul-Raqui

Morfología interna	Objetos	Píxeles
Canales de marea	84	2148
Cuerpos de agua	34	640
Estanques de marea interior	36	979
Estuario	28	1161
Llanura mareal	39	695
Pannes	43	527
Plataforma de marisma	68	3020

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2.3 Parámetros aplicados a los objetos en la clasificación

- Parámetros aplicados a las cubiertas y morfologías individualmente  
Rocuant Andalién

Tabla 43: Parámetros de objetos individuales para CUS Rocuant-Andalien

Cubiertas y usos de suelo	Parámetros de objetos
Áreas quemadas	Límite ( Valor mínimo de píxel banda DEM = 12 metros)
Bosque	Límite (Valor promedio banda NDVI 0,79) Límite (Valor promedio DEM 12)
Humedal	Límite (Valor promedio DEM 11)
Redes, carreteras y vías	-Expresión: Promedio de brillo Límite (Relación longitud/anchura 10) Límite (Anchura 10 metros)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 44: Parámetros de objetos individuales para MIH Rocuant-Andalién

Morfología interna	Parámetros de objetos
Canales de marea	Límite (Relación Longitud/anchura <sup>3</sup> ) Límite (Anchura 4 píxeles)
Estanques de marea interior	Límite (Distancia a Pannes 4 píxeles)
Pannes	-Expresión: Área Límite (Distancia a Estanques de marea 4 píxeles) -Expresión: Índice de forma

Fuente: Elaboración propia

- Parámetros aplicados a las cubiertas y morfologías individualmente  
Lenga

Tabla 45: Parámetros de objetos individuales para CUS Lenga

Cubiertas y usos de suelo	Parámetros de objetos
Humedal	Límite (Valor máximo DEM 11)
Redes, carreteras y vías	Expresión: Asimetría y Brillo Límite (Anchura 3 píxeles)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46: Parámetros de objetos individuales para MIH Lengua

Morfología interna	Parámetros de objetos
Canales de marea	Límite (Anchura 4 píxeles)
Pannes	Límite (Relación Longitud/anchura 0,1)
Plataforma de marisma	No similaridad con Llanura mareal

Fuente: Elaboración propia

- Parámetros aplicados a las cubiertas y morfologías individualmente Tubul Raqui

Tabla 47: Parámetros de objetos individuales para CUS Tubul-Raqui

Cubiertas y usos de suelo	Parámetros de objetos
Humedal	Límite (Valor máximo DEM = 11)
Matorrales y vegetación herbácea	Límite (Promedio NDVI = 0,83)
Redes, carreteras y vías	-Expresión: Área, Brillo, Longitud/anchura, Redondez -Límite (Relación Longitud/anchura 0,333) Límite (Ancho 10 metros) -No similaridad con marisma

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48: Parámetros de objetos individuales para MIH Tubul-Raqui

Morfología interna	Parámetros de objetos
Canales de marea	Límite (Relación longitud/anchura 4) Límite (Ancho 3 píxeles)
Estanques de marea interior	Límite (Área 3 píxeles)
Llanura mareal	Límite (Distancia horizontal al borde derecho de la escena 200 píxeles)
Pannes	Límite (Relación Longitud/anchura 1)

Fuente: Elaboración propia

#### 6.2.2.4 Parámetros de objetos aplicados al clasificador

- Rocuant Andalién

Tabla 49: Parámetros de objetos aplicados a la Clasificación de cubiertas y usos de suelo Rocuant-Andalién

Características de los objetos para las bandas	Promedio espectral	Para todas las bandas	
	Basado en píxeles	Valor mínimo del píxel	Banda 27
		Valor máximo de píxel	
		Contraste de borde	Para todas las bandas
		Contraste hacia los píxeles vecinos	Para todas las bandas
	Geometría	Extensión	Área - Relación longitud/anchura - Ancho
		Forma	Asimetría - Compacidad
	Posición	Coordenadas	Píxel central x - Píxel central y - Píxel central z
Textura	Texturas Haralick	GLCM homogeneidad todas direcciones GCLM Contraste todas direcciones	
Características relacionadas con la clase	Relación de los objetos vecinos	Borde a	Para todas las clases

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50: Parámetros de objetos aplicados a la Clasificación de morfología interna del humedal Rocuant-Andalién

Características de los objetos para las bandas	Promedio espectral	Para todas las bandas	
	Basado en píxeles	Contraste de borde	Para todas las bandas
	Geometría	Extensión	Área - Longitud - Relación longitud/anchura - Ancho
		Forma	Asimetría - Compacidad - redondez - índice de forma
	Posición	Coordenadas	Píxel central x - Píxel central y - Píxel central z
	Textura	Texturas Haralick	GLCM homogeneidad todas direcciones

Fuente: Elaboración propia

- Lengua

Tabla 51: Parámetros de objetos aplicados a la Clasificación de cubiertas y usos de suelo Lengua

Características de los objetos para las bandas	Promedio espectral	Para todas las bandas	
	Basado en píxeles	Contraste de borde	Para todas las bandas
	Geometría	Extensión	Longitud - Relación longitud/anchura - Ancho
	Posición	Coordenadas	Píxel central x - Píxel central y - Píxel central z
	Textura	Texturas Haralick	GLCM homogeneidad todas direcciones GCLM Contraste todas direcciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52: Parámetros de objetos aplicados a la morfología interna del humedal Lengua

Características de los objetos para las bandas	Promedio espectral	Para todas las bandas	
	Basado en píxeles	Contraste de borde	Para todas las bandas
	Geometría	Extensión	Área - Longitud - Relación longitud/anchura - Ancho
		Forma	Asimetría - Índice de borde - Compacidad - Redondez - Índice de forma
	Posición	Coordenadas	Píxel central x - Píxel central y - Píxel central z
	Textura	Texturas Haralick	GLCM homogeneidad todas direcciones GCLM Contraste todas direcciones
Características relacionadas con la clase	Relación de los objetos vecinos	Existencia de	Para todas las clases

Fuente: Elaboración propia

- Tubul Raqui

Tabla 53: Parámetros de objetos aplicados a la Clasificación de cubiertas y usos de suelo Tubul-Raqui

Características de los objetos para las bandas	Promedio espectral	Para todas las bandas	
	Basado en píxeles	Valor máximo de píxel	Banda 27
		Contraste de borde	Para todas las bandas
		Contraste hacia los píxeles vecinos	Para todas las bandas
	Geometría	Extensión	Área - Longitud - Ancho
		Forma	Índice de borde - Compacidad - ajuste rectangular - Redondez - Índice de forma
	Posición	Coordenadas	Píxel central x - Píxel central y - Píxel central z
Textura	Texturas Haralick	GLCM homogeneidad todas direcciones	
Características relacionadas con la clase	Relación de los objetos vecinos	Existencia de	Para todas las clases

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54: Parámetros de objetos aplicados a la morfología interna del humedal Tubul-Raqui

Características de los objetos para las bandas	Promedio espectral	Para todas las bandas	
	Basado en píxeles	Valor máximo de píxel	Banda 27
		Contraste de borde	Para todas las bandas
		Al vecino	Para todas las bandas
Geometría	Extensión	Área - Longitud - relación Longitud/anchura - Ancho	

Características relacionadas con la clase		Forma	Asimetría - Compacidad - Redondez
	Posición	Coordenadas	Píxel central x - Píxel central y - Píxel central z
	Textura	Texturas Haralick	GLCM homogeneidad todas direcciones
	Relación de los objetos vecinos	Existencia de	Para todas las clases
Fuente: Elaboración propia			

### 6.2.2.5 Parámetros del clasificador Random trees para los tres humedales (CUS-MIH)

Tabla 55: Parámetros del Clasificador Random trees para CUS y MIH

Parámetros	Rocuant Andalién		Lenga		Tubul-Raqui	
	CUS	MIH	CUS	MIH	CUS	MIH
Profundidad	20	15	20	15	15	20
Número máximo de árboles	250	300	500	250	250	250
Precisión del bosque	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Tipo de criterio de finalización	Ambos	Ambos	Ambos	Ambos	Ambos	Ambos

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2.6 Post procesado de clasificación cubiertas y usos de suelo enfoque por objetos

Tabla 56: Hectáreas procesadas de CUS para obtener el límite de corte específico para cada humedal en el Enfoque por objeto

Rocuant-Andalién	Ha. totales	Ha. postprocesado 0.5 Ha.y extraídas	Ha. post procesado final	Total Ha procesadas	Ha. Fusión relleno Final (Perímetro humedal)
Humedal	796,824	772,532	752	873,03	892,45
Cuerpos de agua	193,641	170,372	122		
Lenga					
Humedal	358,894	319,36	305	397,87	416,19

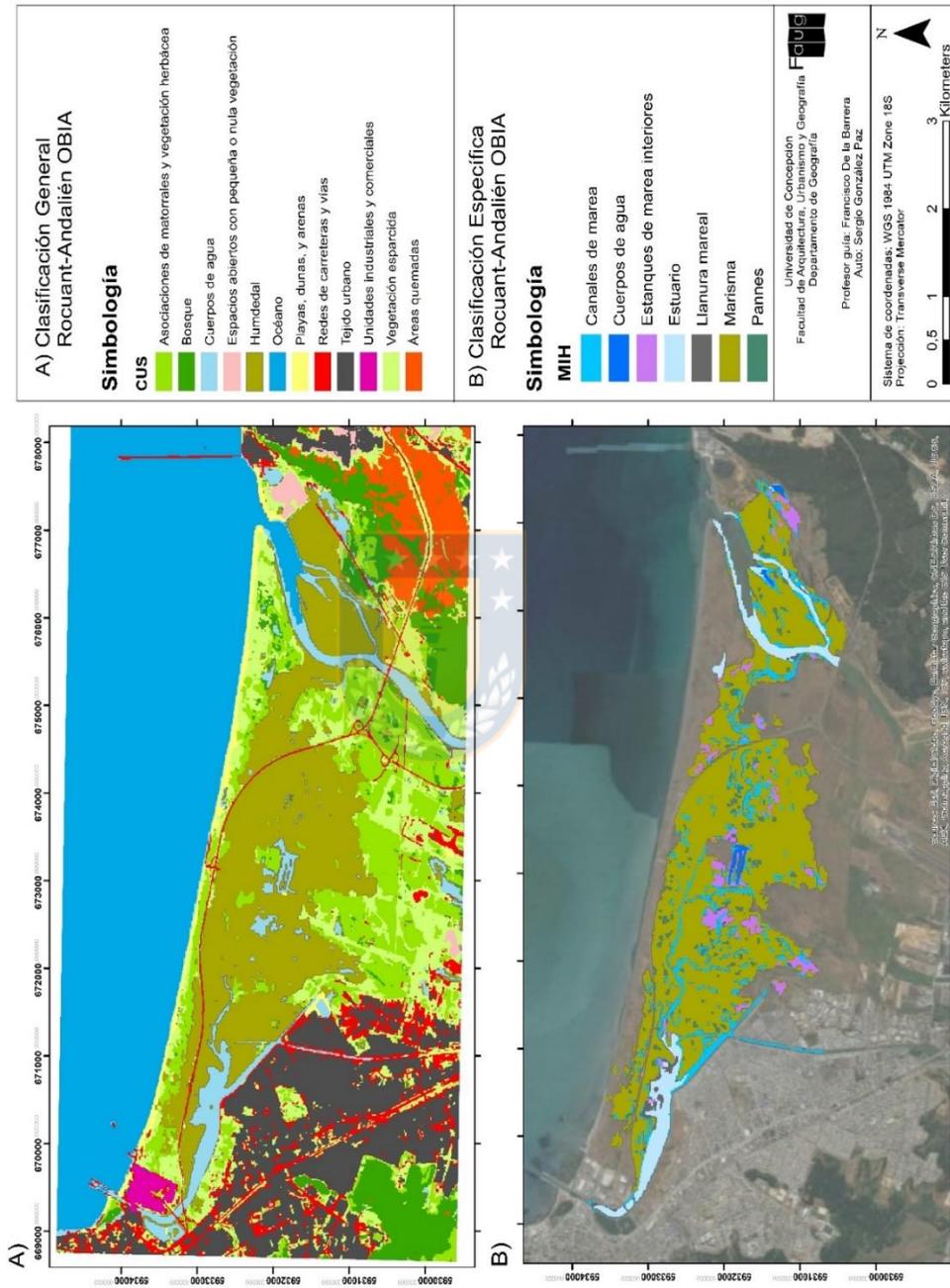
Cuerpos de agua	179,376	155,001	93		
Tubul-Raqui					
Humedal	2115,112	2034,161	1.981	2413,6	2524,75
Cuerpos de agua	593,191	468,5	432		

Fuente: Elaboración propia

**6.2.2.7 Clasificaciones enfoque por objeto de las cubiertas y usos de suelo (CUS), y morfología interna para los tres humedales estudiados**

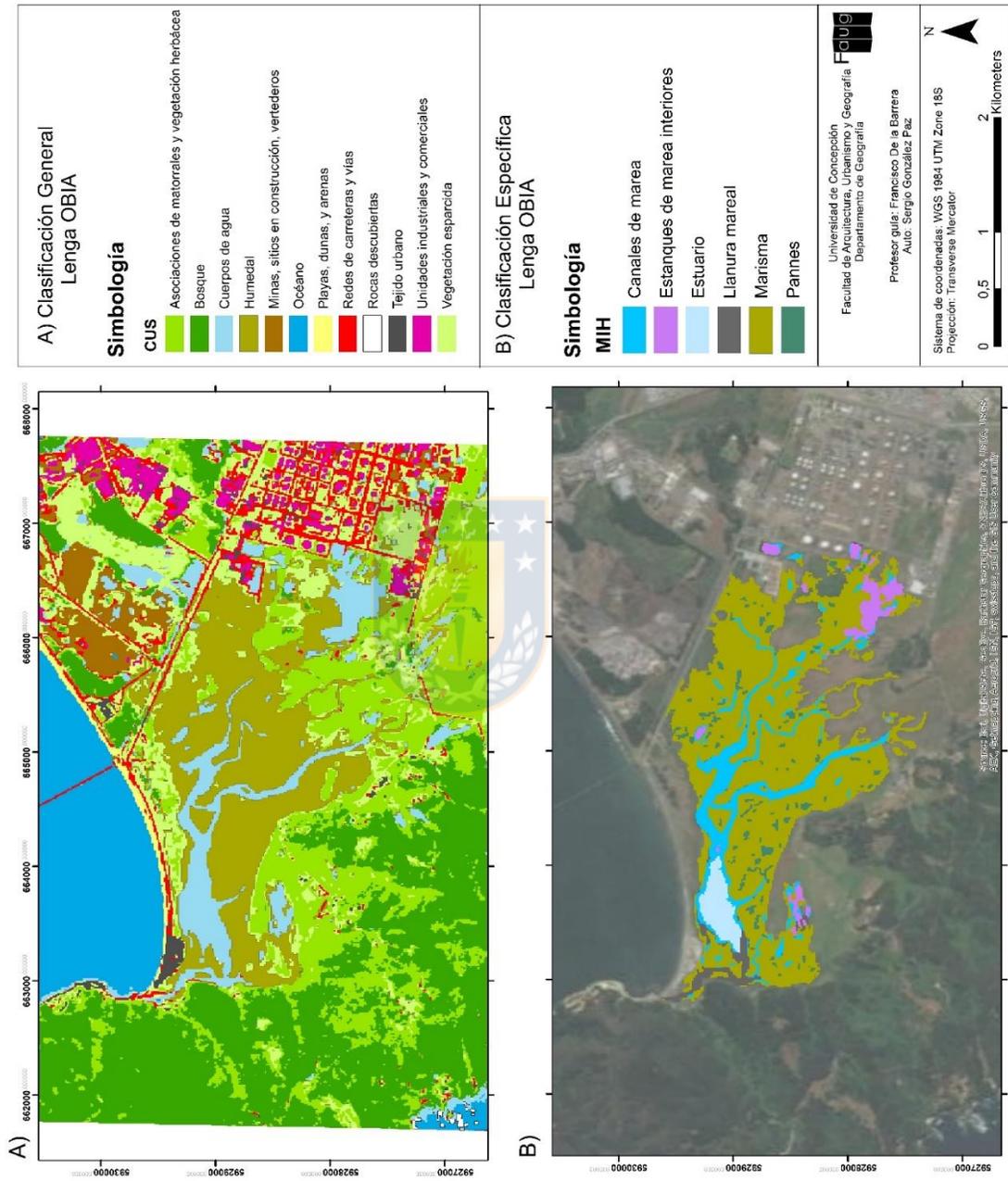


Figura 41: Clasificación Enfoque por objeto CUS y MIH Rocuant-Andalién



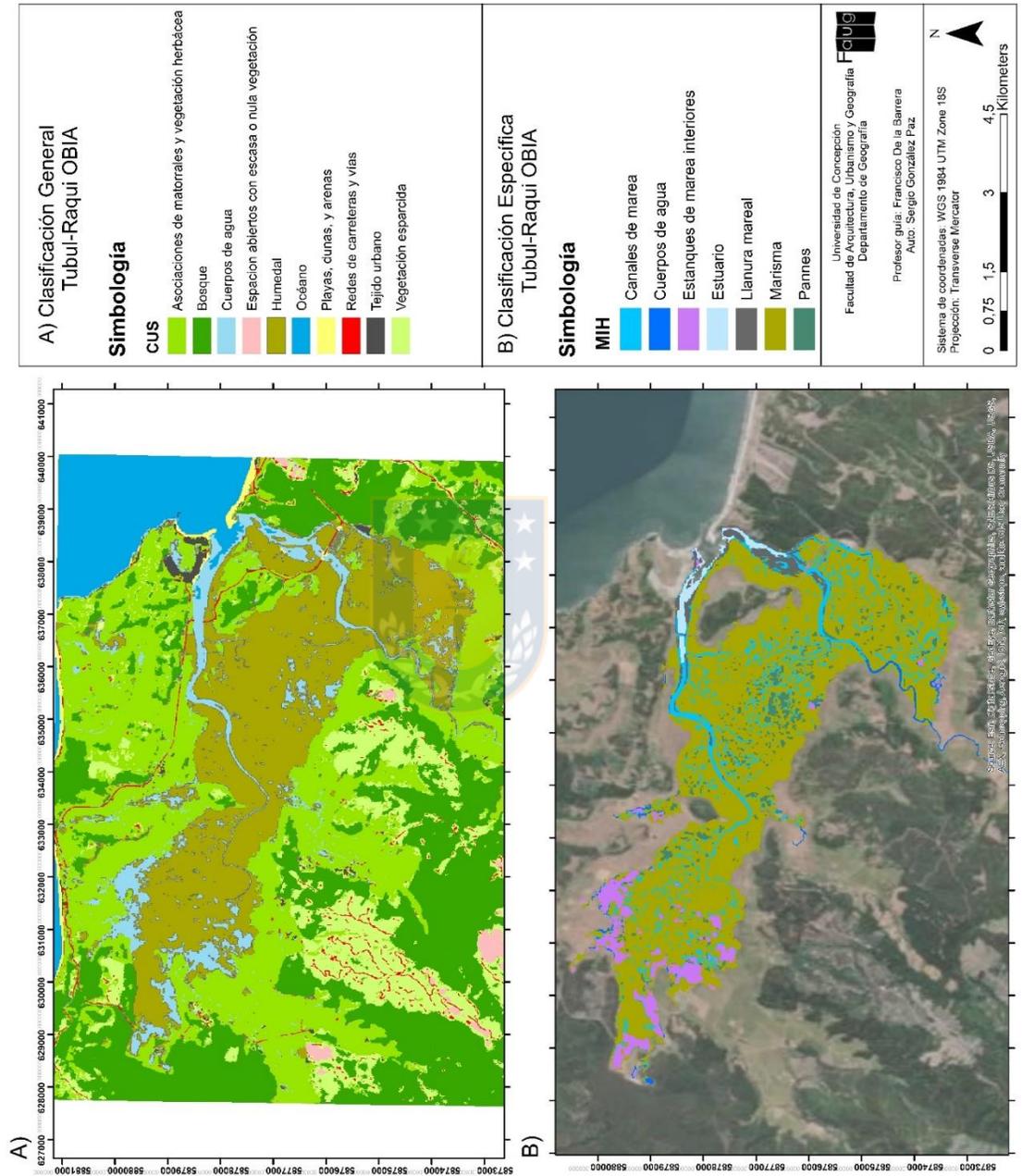
Fuente: Elaboración propia

Figura 42: Clasificación Enfoque tradicional CUS y MIH Lengua



Fuente: Elaboración propia

Figura 43: Clasificación Enfoque tradicional CUS y MIH Tubul-Raqui



Fuente: Elaboración propia

### 6.3 Evaluación de precisión de las clasificaciones

Como último paso de la presente tesis, se elaboró la evaluación de la precisión de cada clasificación realizada. Este paso nos servirá de referencia para comprender aspectos claves de cómo se comporta cada clasificador en las cubiertas y usos de suelo, y en la morfología interna de los humedales.

Los estadísticos principales que otorgarán una validez general están dados por la fiabilidad global (Overall accuracy) y el índice Kappa. Los resultados son los siguientes:

- Fiabilidad Global CUS-MIH

Tabla 57: Fiabilidad Global (Overall accuracy) CUS

	CUS Fiabilidad global		
	Rocuant-Andalién	Lenga	Tubul-Raqui
Pixel	0,75	0,81	0,34
OBIA	0,86	0,77	0,73

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58: Fiabilidad Global (Overall accuracy) MIH

	MIH Fiabilidad global		
	Rocuant-Andalién	Lenga	Tubul-Raqui
Pixel	0,73	0,81	0,74
OBIA	0,78	0,83	0,76

Fuente: Elaboración propia

- Índice Kappa CUS-MIH

Tabla 59: Índice Kappa CUS

	CUS Kappa		
	Rocuant-Andalién	Lenga	Tubul-Raqui
Pixel	0,68	0,7	0,19
OBIA	0,83	0,73	0,65

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60: Índice Kappa MIH

	MIH Kappa		
	Rocuant-Andalién	Lenga	Tubul-Raqui
Pixel	0,42	0,59	0,41
OBIA	0,44	0,61	0,55

Fuente: Elaboración propia

Tabla 61: Hectáreas morfologías internas humedales

	Hectáreas						
	Rocuant-Andalién		Lenga		Tubul-Raqui		Total
Morfología interna humedal	Pixel	OBIA	Pixel	OBIA	Pixel	OBIA	
Canales de marea	153,38	99,47	45	55,04	167,89	278,06	798,86
Cuerpos de agua	43,89	6,83	-	-	21,63	37,31	109,66
Estanques de marea interior	10,14	40,31	16	18,11	76,09	148,41	309,33
Estuario	64,85	70,59	18	15,12	52,63	38,99	260,23
Llanura mareal	33,32	11,68	41	12,2	196,17	63	357,32
Plataforma de Marisma	811,24	640,32	313	299,51	1929,88	1846,91	5840,89
Pannes	54,46	23,25	23	16,21	202,71	112,07	431,39
Total	1171,28	892,45	456	416,19	2647	2524,75	
Diferencia	278,83		39,82		122,25		

Fuente: Elaboración propia

## 7. DISCUSIÓN

Al intentar mapear el territorio, uno de los objetivos es resaltar las características morfológicas que lo constituyen, logrando reconocer como se organizan y las relaciones que tienen cada una de las partes que lo conforman. Teniendo esta premisa como movilizadora, y considerando el aumento de la demanda humana de humedales para otros usos junto con los impactos del cambio climático (Tiner, Lang, & Klemas, 2015), la elaboración de mapas se hace indispensable. Además, las consecuencias no se centran en la mera pérdida de superficie, sino que también en la disminución de los servicios ecosistémicos (Millennium Ecosystem Assessment Board, 2005) que proveen hacia la humanidad.

Según Antiao (2013), en nuestro país, a pesar de que existe abundante legislación sectorial que influye en los humedales, no se encuentran sometidos a una norma jurídica nacional como ecosistemas relevantes, provocando que los humedales no protegidos oficialmente se encuentren sin resguardo. Además, la competencia insuficiente del SEIA, permite un holgado margen de afectación por parte de los proyectos que impacten sobre un humedal, dejando relegado las sugerencias de servicios sectorial con competencia ambiental.

Reconociendo lo anterior, y considerando la casi inexistencia de metodologías especializadas para zonificar humedales en Chile (Vásquez, Propuesta Metodológica de Delimitación de Humedales Costeros para el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile, 2009), se hace imperativo incorporar nuevas formas de detectar el ecosistema, que permitan entregar a las autoridades y gobiernos un panorama más exacto. Para el caso de los humedales Rocuant-Andalién, Lengua, y Tubul-Raqui, se necesita mantener en una constante actualización su estado actual debido a las modificaciones que están ocurriendo los últimos años.

En este punto, y debido a la difícil accesibilidad que tiene el ecosistema, presupuestando un alto gasto de dinero y tiempo (Harvey & Hill, 2001; Baker et al., 2006), las técnicas de sensoramiento remoto juegan un papel importante en abordar esta problemática, permitiendo, junto con la posibilidad de ocupar nuevas imágenes satelitales gratuitas, estudiar la delimitación y morfología interna de un humedal. Las imágenes satelitales disponibles de los sensores Sentinel 1 y 2, parecen ser una alternativa viable para el mapeo del ecosistema, debido a su resolución espacial (Sentinel 1-10m, 20m, 60m) y propiedades espectrales, pero aún no son muy utilizadas en su conjunto por la escases de metodologías que expriman las posibilidades de ambos productos. Las imágenes de radar pertenecientes al sensor Sentinel 1, no son suficientes para lograr una mejor descripción de las coberturas de suelo, debido a su polarización dual (HH-VV), necesitando al menos cuatro polarizaciones (HH-VV-HV-VH) para, a través de análisis polarimétrico, describir las unidades presentes. No obstante, las imágenes de Radar del sensor Sentinel 1, permiten observar áreas inundadas, debido a la penetración en el dosel que presumen las ondas generadas por el radar (Banda-C). Por el lado de las Imágenes Sentinel 2, la resolución espacial y espectral que ostentan, permiten mejorar las posibilidades de las imágenes de libre acceso Landsat 8, otorgando la incorporación de índices espectrales mejorados por sus bandas de borde rojo (Red Edge).

Las limitaciones de las metodologías tradicionales de clasificación basada en píxeles han apresurado la necesidad de métodos más avanzados, dónde el enfoque basado en objetos, el cual incorpora información espectral y contextual, parece ser la respuesta (Weih & Riggan, 2010). Precisamente lo realizado en esta tesis aborda esta premisa comparando ambos enfoques, cuyo resultado concordó con las nuevas posibilidades.

Utilizando estos productos en base a metodologías de aprendizaje supervisado con clasificadores Random Forest y Support Vector Machine, los cuales según

Blaschke (2010), han atraído gran atención debido a su excelente rendimiento, se lograron muy buenas precisiones para la exactitud global e índice kappa con respecto a la evaluación del clasificador. Por otro lado, la fiabilidad global de las CUS y MIH fueron sustanciales, entregando mejores porcentajes para el enfoque por objetos, caso similar a lo ocurrido con los índices Kappa de las CUS. Dónde bajan los porcentajes de Kappa considerablemente es en la MIH, muy posiblemente asociado a la incapacidad de la resolución espacial de entregar respuestas a las morfologías pequeñas que existen dentro del humedal, produciendo la mezcla de cubiertas.

Si bien los porcentajes de fiabilidad global e índices Kappa son mayores para el enfoque de objetos, cabe mencionar que no es una mejora sustancial que derive en un uso obligado de este enfoque, existiendo la posibilidad de ocupar el enfoque por pixel con una buena conjunción de productos. Además, se debe tener en cuenta la necesidad de tener un conocimiento medio de geometría para entender conceptos aplicados a los objetos en el software Ecognition, mejorando directamente el resultado final de la clasificación.

La posibilidad de mejorar el mapeo interno de un humedal en nuestros días, está directamente relacionado con la resolución espacial y espectral que tenga la imagen trabajada, junto con un buen nivel digital de terreno para sacarle un máximo de provecho al método. Parece una buena alternativa trabajar con imágenes captadas con drones, debido a la personalización de lo que se quiere captar, logrando centrarse únicamente en el humedal.

Si bien la delimitación del perímetro del humedal es una labor compleja, debido a lo difícil de su propia definición, es imperante separar el ecosistema de los usos y cubiertas contiguos, teniendo en cuenta las presiones que los envuelven. Considerando que los impactos se están produciendo igualmente en muchos humedales marismas costeros, se debe conocer la morfología interna del humedal para, en caso de alterar el ecosistema, modificar los sectores menos

importantes para su unidad, ya que no es lo mismo perder parte de la plataforma alta de la marisma que en su sector bajo, donde tiene contacto con el estuario, o, alterar los pannes y llanura mareal que cuerpos de agua con un tipo de ingresos netamente antrópico. Precisamente los cuerpos de agua dentro de las marismas son lugares muy importantes por ser muy visitados por la avifauna del ecosistema, determinando un fuerte grado jerárquico de protección.



## 8. CONCLUSIÓN

El apartado de resultados nos entregó una serie de superficies y porcentajes que nos dejó la comparación de los dos enfoques expuestos. Si bien el objetivo principal era observar el rendimiento de cada uno, no se debe pasar por encima las superficies que nos entregaron principalmente las clasificaciones de morfología interna de los humedales. A fin de resumir las principales conclusiones de la tesis, se procederá a explicar en forma de viñetas las mismas:

- Tomando la definición de Ramsar, el ecosistema se define como “áreas de marisma, pantanos, turba o agua, ya sea natural o artificial, permanente o temporal, con agua estática o fluyendo, dulce, salobre, o salada incluyendo áreas de agua de mar, que la profundidad con baja marea no exceda los seis metros. Además, debería incorporar zonas riparianas y costeras adyacentes a los humedales, y las islas o cuerpos de agua marina de más de seis metros de profundidad cuando la marea baja se encuentra dentro del humedal”
- La importancia del ecosistema radica en los servicios ecosistémicos que provee. Según Millennium Ecosystem Assessment (2005), los servicios se dividirían en: Abastecimiento; Regulación; y Culturales.
- Debido a cambios de uso de suelo en el último siglo a nivel mundial, los humedales han sido un ecosistema afectado notoriamente, creándose en 1973 la convención Ramsar, que buscaba darles importancia a estos lugares. En nuestro país, según Fariña & Camaño (2012), existe una superficie elevada de humedales costeros con grandes posibilidades de desaparecer, coexistiendo con una legislación aún débil.
- Desde el punto de vista de la planificación territorial, existe la necesidad de mapear el ecosistema constantemente, debido al cambio que experimentan por causas antrópicas y climáticas. Por la virtud que entrega el Sensoramiento Remoto en satisfacer esta necesidad, se transforma en

una inmejorable alternativa para delimitar los bordes e interior de los humedales.

- La disponibilidad de imágenes satelitales gratuitas con mejores características que las existentes hace unos años, asociadas a las misiones Sentinel, permiten ocupar sensores pasivos y activos en conjunción, logrando aunar información más amplia al análisis. Este marco permite obtener los productos necesarios para realizar las clasificaciones supervisadas.
- Una gran variedad de clasificaciones mediante sensoramiento remoto se han realizado mediante el enfoque tradicional por pixel. El relativamente nuevo enfoque por análisis de objetos (OBIA), permite incorporar nuevas posibilidades a la clasificación supervisada, parámetros como la geometría y ubicación, se suman al netamente espectral.
- La evaluación de las clasificaciones fueron concluyentes en que hay una mejora en el promedio de 15% para la fiabilidad global de las CUS, y un 3% de la fiabilidad global de las MIH mediante el uso de OBIA-Random Forest. Un evento a destacar, es el porcentaje de la fiabilidad global para Tubul-Raqui, que crece de un 34% en el enfoque de pixel, a un 73% de fiabilidad para el enfoque por objetos. Para el caso del índice Kappa, hubo un aumento desde el enfoque por objetos del 0,21 y un 0,06 para las CUS y MIH respectivamente. En este apartado, el índice Kappa promedio entre las CUS y MIH en el enfoque por pixel llega a un 0,5, siendo la fuerza de concordancia “moderada”. Por el otro lado, el promedio de Kappa entre las CUS y MIH del enfoque por objetos llega 0,64, también con una concordancia “moderada”.

Existe una clara baja de los valores de kappa para las MIH en ambos enfoques, esta situación es muy probablemente debido a la fina resolución espacial necesitada para captar con mayor exactitud las geoformas internas de las marismas. Los angostos canales de marea y los pequeños

pannes, provocan una mezcla de píxeles y objetos que hace confundir al clasificador.

- La superficie de los tres humedales estudiados, entregaron algunas características importantes. En los tres casos de estudio existe una mayor superficie total para los valores obtenidos por el enfoque tradicional por píxel, disminuyendo los mismos para el enfoque por objetos. La mayor diferencia se ve en el caso de Rocuant-Andalién, donde hay una diferencia de 278,83 hectáreas (píxel = 1171,28 ha. OBIA = 892,45 ha.), siguiendo por la de Tubul-Raqui con 122,25 hectáreas (píxel = 2647,00 ha. OBIA = 2524,75 ha.), por último, el humedal Lengua, con una diferencia de 39,82 hectáreas entre los enfoques (píxel = 456,01 ha. OBIA = 416,19 ha.).

Las plataformas de marismas son las que ostentan la mayor superficie en los tres humedales, siendo la matriz imperante en los humedales. La segunda morfología que presenta gran superficie dentro del humedal, son los canales de marea, los cuales, a pesar de tener en la mayor parte de su extensión una angostura pequeña (metros), suman una gran cantidad de hectáreas por su ramificación. Por detrás están los Pannes y Llanura mareal, donde el primero eleva su valor principalmente en el humedal Tubul-Raqui, donde el enfoque por píxel detecta una mayor superficie, ocurriendo algo similar en el caso de las llanuras mareales. Por último, están los casos de los estanques de marea interiores, estuarios, y cuerpos de agua. El humedal Tubul-Raqui tiene la mayor cantidad de superficie para los estanques de marea, en específico la clasificación por objetos (148,41 ha), obteniendo el menor valor para la clasificación por píxel del humedal Rocuant-Andalién (10,14 ha). En el caso de los estuarios, para Rocuant-Andalién se ven los valores más altos en los dos enfoques, debido a que se categorizaron la desembocadura del río Andalién y Rocuant, los valores menores los tiene Lengua. Los cuerpos de agua categorizados en los humedales Rocuant-Andalién y Tubul-Raqui, poseen

superficies menores debido a que representaban porciones de estanques dentro de ellos y en bordes de sus perímetros, además del canal del río Raqui en su parte inferior.

- La clasificación de humedales, incorporando su delimitación y caracterización de su morfología interna, es una tarea que parece ir de la mano con el Sensoramiento remoto, debido a las posibilidades que ofrece y a la evolución rápida del estado del arte. No obstante, se necesita de un conocimiento profundo de algunas temáticas, para pasar a un siguiente nivel de clasificación.
- Completados los objetivos específicos de la presente tesis, y abordando el objetivo general, se puede afirmar que el enfoque por objeto representa una mejora sobre el enfoque tradicional por pixel, aunque los porcentajes sean pequeños. En base a los hechos empíricos de abordar las clasificaciones con los productos y clasificadores elegidos, se puede aconsejar utilizar el enfoque por objeto si se está dispuesto a profundizar varios apartados que se hacen preponderantes en la configuración de los objetos (geometría de las morfologías internas del humedal). Además, la utilización de las imágenes de Radar Sentinel 1, presuponen un conocimiento básico previo de estos sensores activos, sumando a que no permiten aprovechar completamente la polimetría, debido a que tienen solamente polarización dual. En el caso de que se tuviera una imagen con quad polarización (HH-VV-HV-VH), se podría extraer una mayor cantidad de información de los blancos en la superficie de la tierra, con una precisión mejorada.

Considerando siempre una resolución espacial lo más fina posible, además de lo anterior, podemos aconsejar todavía utilizar imágenes ópticas multiespectrales con el enfoque tradicional por pixel para clasificar humedales, pero dando un especial cuidado en la creación de áreas de

entrenamiento. Sin embargo, si se puede acceder a las posibilidades del enfoque por objeto, se recomienda por sobre el anterior.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Adam, E., Mutanga, O., & Rugege, D. (2010). Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecol Manage* 18, 281-296.
- Anji, M. (2008). *Remote Sensing and Geographical Information Systems*. kukatpally: BS Publications.
- Antiao, M. (2013). *Legislación aplicable a los Humedales en Chile: Análisis crítico de su protección en la normativa vigente*. Valdivia: UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.
- Baker, C., Lawrence, R., Montagne, C., & Patten, D. (2006). Mapping wetlands and riparian areas using Landsat ETM+ imagery and decision-tree-based models. *Wetlands* 26, 465–474.
- Bartholdy, J. (2012). Salt Marsh Sedimentation. In R. Davis, & R. Dalrymple, *Principles of Tidal Sedimentology* (pp. 151-185). New York: Springer.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 2-16.
- Blascke, T. (2010 ). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2-16.
- Boswell. (2002). *Introduction to Support Vector Machines*.
- California State Coastal Conservancy and U.S. Army Corps of Engineers. (1998 ). *hamilton Wetlands Restoration Plan Volume II: EIR/EIS*. Sacramento: Jones & Stokes Associates, Inc.
- Chapman, V. J. (1960). *Salt Marshes and Salt Deserts of the World*. New York: Interscience.
- Chapman, V. J. (1976). *Coastal Vegetation, 2nd ed*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Chen, C. (2008). *Image Processing for Remote Sensing*. New York: CRS Press.
- Chuvieco, E. (2002). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp. S.A.
- Cohen, J. (1960). A Coefficient Of Agreement For Nominal Scales. *EDUCATIONAL AND PSYCHOLOGICAL MEASUREMENT*, 37-46.

- CONAF. (2003). *PLAN DE ACCIÓN PARA LA CONSERVACIÓN Y USO SUSTENTABLE DE HUMEDALES ALTOANDINOS*. Santiago: Gobierno de Chile.
- CONAMA. (2006). *Protección y manejo sustentable de humedales integrados a la cuenca hidrográfica*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Congalton, R. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment Volumen 37*, 35-46.
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., . . . Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *ELSEVIER*, 152–158.
- Cowardin, L. M., Carter, V., Golet, F. C., & LaRoe, E. T. (1979). *Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States*. Washington DC: U.S. Fish and Wildlife Service.
- Crossland. (2006). *The Coastal Zone: a Domain of Global Interactions*.
- Crossland, C. J., Kremer, H. H., Lindeboom, H., Crossland, J. I., & Tissier, M. D. (2005). *Coastal Fluxes in the Anthropocene*. Berlin: Springer-Verlag.
- Davidson, N. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *CSIRO*, 934–941.
- Davis, R., & Dalrymple, R. (2012). *Principles of Tidal Sedimentology*. London New York: Springer.
- Di Castri, F., & Hajek, E. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Santiago: Vicerrectoría Académica, Universidad Católica de Chile.
- Escadafal, R. (1989). REMOTE SENSING OF ARID SOIL SURFACE COLOR WITH LANDSAT THEMATIC MAPPER. *Adv Space Res: 9 (1)*, 1159-1163.
- EULA-Chile, C. d. (2011). *DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA PARA LA CONSERVACIÓN Y USO SUSTENTABLE DE LOS HUMEDALES LACUSTRES Y URBANOS PRINCIPALES DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO*. Concepción: Universidad de Concepción.
- FAO. (2002). *Water source of food security*. 13 September - 1 November 2002. Rome: E-mail conference organized by Land and Water Development Division.

- Fariña, J., & Camaño, A. (2012). *Humedales costeros de Chile: Aportes científicos a su gestión sustentable*. Santiago: Ediciones UC.
- Fernández, Y., & Soria, J. (2015). Imágenes de Radar de Apertura Sintética y Conceptos Básicos de Polarimetría. In Y. Fernández, M. Escalona, & J. Valdez, *Avances y Perspectivas de Geomática con Aplicaciones Ambientales, Agrícolas, y Urbanas* (pp. 37-66). Texcoco: Editorial del Colegio de Postgraduados.
- Finlayson, M., & Moser, M. (1991). *Wetlands*. Oxford: Facts on File.
- Gao, J. (2008 ). *Digital Analysis Remotely Sensed Imagery*. McGraw-Hill Education; 1 edition.
- Gao, S. (1995). Geomorphology and Sedimentology of Tidal Flats. In G. Perillo, E. Wolanski, D. Cahoon, & M. Brinson, *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach* (pp. 295-315). New York: Elsevier.
- Guyot, G., & Baret, F. (1988). Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'état des couverts vegetaux. In: Proceedings, 4th International Colloquium "Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing", Aussois. : ESA, ESA, Publication SP-287, 279-286.
- Harvey, K., & Hill, G. (2001). Vegetation mapping of a tropical freshwater swamp in the Northern Territory, Australia: A comparison of aerial photography, Landsat TM and SPOT satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing* 22(15), 2911–2925.
- HAUENSTEIN, E., GONZÁLEZ, M., PEÑA-CORTÉS, F., & MUÑOZ-PEDREROS, A. (2005). Diversidad vegetal en humedales costeros de la Región de. *Editorial Universitaria, Santiago, Chile*, 227-236.
- Ho, T. (1998). The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests. *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*. Vol 20, 832-844.
- Jackson, J. (1997). *Glossary of geology, 4th edn*. Alexandria: American Geological.
- Jensen, J. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Pearson Prentice Hall. Third Edition.
- Jin, S. (2014). Accuracy Assessment for Classification and Modeling. In G. Wang, & Q. Weng, *Remote Sensing of Natural Resources* (pp. 45-54). New York: CRC Press.

- Klein, G. (1985). Intertidal Flats and Intertidal Sand Bodies. In R. Davis, *Coastal Sedimentary Environments* (pp. 187-224). New York: Springer.
- Kumar, S. (2005). *Basics of Remote Sensing and GIS*. New Delhi: Firewall Media.
- Lacaux, J., Tourre, Y., Vignolles, C., Ndione, J., & Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 66-74.
- Landis, R., & Koch, G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *International Biometric Society*, 159-174.
- Lang, M., Bourgeau-Chavez, L., Tiner, R., & Klemas, V. (2015). Advances in Remotely Sensed Data and Techniques for Wetland Mapping and Monitoring. In R. Tiner, M. Lang, & V. Klemas, *Remote Sensing of wetlands: Applications and Advances* (pp. 79-108). Boca Ratón: CRS Press.
- Lang, M., Bourgeau-Chavez, L., Tiner, R., & Klemas, V. (2015). Advances in Remotely Sensed Data and Techniques for Wetland Mapping and Monitoring. In R. Tiner, M. Lang, & V. Klemas, *Remote Sensing of Wetlands: Applications and Advances* (pp. 79-116). Boca Raton, London, New York: CRC Press.
- León, A. (2015). *Descripción, Descarga y Manipulación de productos Sentinel 2*. Lima.
- Liang, S. (2004). *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New Jersey: A JOHN WILEY & SONS, INC.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation. Fifth Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lira, J. (2010). *Tratamiento Digital de Imágenes*. Ciudad de Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ma, L., Li, M., Ma, X., Cheng, L., Du, P., & Liu, Y. (2017). A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 277-293.
- Manning, C., Raghavan, P., & Schütze, H. (2009). *An Introduction To Information Retrieval*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Martínez, J. (2014). CATASTRO Y ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LOS HUMEDALES MARINOS/ COSTEROS EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO. *TIEMPO Y ESPACIO* 33, 104-130.
- McCarthy, J., Gumbricht, T., & McCarthy, T. S. (2005). Ecoregion classification in the Okavango Delta, Botswana from multitemporal remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 4339-4357.
- McFEETERS, S. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing Vol 17*, 1425-1432.
- Migenes, V., & Andernach, H. (2005). Fundamentos de la Transferencia Radiativa. In V. Migenes, & H. Andernach, *Curso de Radioastronomía* (pp. 1-35). Guanajuato: Universidad de Guanajuato.
- Millennium Ecosystem Assessment Board. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water*. Washington: Library of Congress.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands*. New Jersey: Wiley.
- Moore, P. (2008). *Wetlands*. United States: Facts on File Inc.
- Munizaga, J. (2015). *CAMBIOS EN LA SUPERFICIE DEL HUMEDAL ANDALIÉN-ROCUANT 2004-2014*. Concepción.
- National Research Council (NRC). (1995). *Wetlands: Characteristics and Boundaries*. Washington, DC: National Academy Press.
- Natural Resources Canada. (2003). *Educational Resources for Radar Remote Sensing*. Ottawa, Ontario: Canada Centre for Remote Sensing .
- Navulur, K. (2007). *Multispectral Image Analysis Using the Object-Oriented Paradigm*. Boca Ratón: CRS Press.
- PAUCHARD, A., AGUAYO, M., PEÑA, E., & URRUTIA, R. (2005). Multiple effects of urbanization on the biodiversity of developing countries: The case of a fast-growing metropolitan area (Concepción, Chile). *Biological Conservation* N° 127, 272.281.
- Perillo, G. (1995). Definitions and Geomorphologic Calssifications of Estuaries. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology* 53, 17-47.

- Perillo, G., & Iribarne, O. (2003). Processes of Tidal Channel Development in Salt and Freshwater Marshes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1473-1482.
- Perillo, G., Ripley, M., Piccolo, M., & Dyer, K. (1996). The formation of tidal creeks in a salt marsh: new evidence from the Loyola Bay salt marsh, Rio Gallegos Estuary, Argentina. *Mangroves and Salt Marshes*, 37-46.
- Pinty, B., & Verstraete, M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* 101, 15-20.
- Podest, E. (2007). *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética*. Brasil: NASA.
- Pritchard, D. (1967). What Is An Estuary: Physical Viewpoint. *American Association for the Advancement of Science*, 149-176.
- Pye, K., & French, P. (1993). *Erosion and accretion processes on British Salt Marshes Vol 1 Introduction: salt marsh Processes and Morphology*. Cambridge: Cambridge Environmental Research Consultants.
- Richter, R., & Schlapfer, D. (2012). *Atmospheric / Topographic Correction for Airborne Imagery*. Switzerland: ReSe Applications Schlapfer.
- Rojas, C., Sepúlveda-Zúñiga, E., Barbosa, O., Rojas, O., & Martínez, C. (2015). Patrones de urbanización en la biodiversidad de humedales urbanos en Concepción Metropolitana. *Revista de Geografía Norte Grande*, 61, 181-204.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS-1 Symposium NASA, NASA SP-351*, 309-317.
- Russi, D., t. B., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Förster, J., . . . Davidson, N. (2013). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) for Water and Wetlands*. London and Brussels: Ramsar Secretariat, Gland.
- Russi, D., ten Brink, P., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Forster, J., . . . Davidson, N. (2013). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity For Water and Wetlands*. Londres y Bruselas: Secretaría de Ramsar.
- Shaw, S. P., & Fredine, C. G. (1956). *Wetlands of the United States: Their extent and values to Waterfowl and other wildlife. Circular 39*. Washington: U.S. Fish and Wildlife.

- Shi, H., & Singh, A. (2003). Status and Interconnections of Selected Environmental Issues in the Global. *AMBIO*, 145-152.
- Smith, P., & Romero, H. (2009). Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua. *Revista de Geografía Norte Grande* N° 43, 81-93.
- Stuardo, J., & Valdovinos, C. (1989). Estuarios y lagunas costeras: ecosistemas importantes del Chile Central. *Ambiente y Desarrollo*, 107-115.
- Tarbutck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología física*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Tarnocai, J. C., Adams, G. D., Glooschenko, V., Glooschenko, W. A., Grondin, P., Hirvonen, H. E., . . . Zoltai, S. C. (1988). *The Canadian wetland classification*. Environment Canada, Ottawa, Ontario, and Polyscience Publications, Montreal, Quebec: Wetlands of Canada. Ecological Land Classification Series 24.
- Tempfli, K., Huurneman, G. C., Bakker, W. H., Janssen, L. L., Feringa, W. F., Gieske, A. S., . . . Westinga, E. (2009). *Principles of remote sensing : an introductory textbook (ITC Educational Textbook Series; Vol. 2)*. Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Thenkabail, P. (2015). *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies*. Boca Ratón: CRC Press.
- Tiner, R. W., Lang, M. W., & Klemas, V. V. (2015). *Wetlands Remote Sensing of Wetlands: Applications and Advances*. Boca Raton London New York: CRC Press.
- Valdovinos, C., Muñoz, M., Sandoval, N., Vásquez, D., & Olmos, V. (2010). Desastres naturales y biodiversidad: El caso del humedal costero Tubul-Raqui. *Sociedad Hoy* 19, 33-51.
- Vásquez, D. (2009). *Propuesta Metodológica de Delimitación de Humedales Costeros para el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile*. SEREMI Región del Biobío, Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU.
- Vásquez, D. (2009). *Propuesta Metodológica de Delimitación de Humedales Costeros para el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile*. Concepción: Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, SEREMI Región del Biobío, Chile.

- Verma, R. (2012). *Polarimetric Decomposition Based on General Characterization of Scattering From Urban Areas and Multiple Component Scattering Model*. Enschede: University Twente.
- Weih, R., & Riggan, N. (2010). OBJECT-BASED CLASSIFICATION VS. PIXEL-BASED CLASSIFICATION: COMPARITIVE IMPORTANCE OF MULTI-RESOLUTION IMAGERY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-4/C7*.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 3025-3033.
- Yapp, R., Johns, D., & OT, J. (1917). The salt marshes of the Dovey estuary. Part II. *The salt marshes*, 65–103.
- Zoltai, S. (1988). *Wetland environments and classification*. In *National Wetlands Working Group*. Environment Canada, Ottawa, Ontario, and Polyscience Publications, Montreal,: Wetlands of Canada. Ecological Land Classification Series 24.

