

En una serie de estudios nacionales, regionales y mundiales (por ej. Hansen *et al.*, 2008; Stehman, Sohl y Loveland, 2005; Potapov *et al.*, 2008; Eva *et al.*, 2010), los enfoques de muestreo fueron exitosos al producir resultados sobre el cambio en la superficie del bosque con un nivel aceptable y conocido de precisión. En encuestas de teledetección anteriores, un enfoque basado en muestras grandes de imágenes satelitales sobre regiones geográficas amplias demostró ser apropiado para capturar estimaciones de parámetros a nivel regional (i.e. > 100 000 hectáreas (ha)) y a escalas continentales (Czaplewski, 2002).

La muestra sistemática fue seleccionada por cuatro razones principales (Ridder, 2007): la cubierta de la tierra muestra tendencias a escalas regional y continental y no se tomaron en cuenta suposiciones *a priori* de intensidad de cambio de la superficie del bosque; el diseño de la cuadrícula de latitud-longitud carece de sesgo político y es fácil de comprender; la ubicación de las muestras puede ser identificada fácilmente en los mapas; y las evaluaciones forestales nacionales apoyadas por la FAO están diseñadas y basadas en la misma cuadrícula.

FUENTES DE IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes provenientes de la Encuesta Terrestre Mundial Landsat de la Encuesta Geológica de los Estados Unidos (GLS) proporcionaron la mayoría de los datos para la clasificación e interpretación (Gutman *et al.*, 2008). El sensor Landsat proporciona la cobertura mundial, una serie temporal larga de imágenes satelitales, y las características espectrales y espaciales apropiadas para la detección de cambios en la cubierta de árboles. Las adquisiciones de Landsat están referenciadas a la superficie de la tierra por medio de una cuadrícula *Path* (órbita aproximada del satélite) y *Row* (centro nominal de la escena o imagen) denominada Sistema de Referencia Mundial (WRS). La Encuesta Geológica de los Estados Unidos (GLS) es un conjunto de datos de distintos períodos de tiempo, coherente en términos espaciales, integrado por las mejores imágenes Landsat para cada cuadrícula del WRS y abarca la mayor parte de la superficie de la tierra, enfocándose en los años 1975, 1990, 2000 y 2005.

Para cada sitio de muestreo, se recopilaron las bandas ópticas de Landsat de 1–5 y 7 provenientes de los conjuntos de datos de GLS1990, GLS2000 y GLS2005. Éstas fueron acopladas a un cuadrado de 20 km × 20 km centrado sobre cada intersección de un grado de latitud y longitud a fin de crear subconjuntos de imágenes. La parte central de 10 km × 10 km de cada subconjunto de imágenes fue utilizada para los cálculos de superficie y análisis estadístico. En áreas en donde las adquisiciones de GLS eran nebulosas o carecían de correspondencia estacional, se hizo un esfuerzo para obtener imágenes adicionales del archivo de datos de Landsat o directamente de las estaciones terrestres regionales (para más detalles sírvase consultar Beuchle *et al.*, 2011; Potapov *et al.*, 2010; Seebach *et al.*, 2010).

Para los ámbitos climáticos boreal, templado y subtropical, se supuso que los datos GLS eran los mejores a disposición. Si se contaba con más de una adquisición de GLS para determinado sitio y fecha, la adquisición GLS con la menor cubierta de nubes fue seleccionada para la clasificación (Lindquist *et al.*, presentado).

PROCESAMIENTO PREVIO DE IMÁGENES

Las imágenes fueron procesadas previamente a fin de corregir las diferencias radiométricas provocadas por cambios en la calidad atmosférica o por las distintas características de los sensores entre las diferentes fechas de adquisición de las imágenes de un mismo sitio. La normalización de imágenes tiene el efecto de normalizar los valores de los números digitales relativos a la cubierta de árboles densa en cada sitio y permite las aplicaciones más eficientes de los algoritmos de clasificación automatizada (Toivonen *et al.*, 2006; Potapov *et al.*, 2010; Hansen *et al.*, 2008). Potapov *et al.* (2010) describen los métodos de procesamiento previo utilizados por el equipo de la FAO

para las áreas situadas fuera del trópico. Bodart *et al.* (2011) describen los métodos de procesamiento previo utilizados por el equipo del JRC para los sitios situados en el trópico y en África subsahariana.

CLASIFICACIÓN AUTOMATIZADA DE LA CUBIERTA DE LA TIERRA

La FAO y el JRC llevaron a cabo clasificaciones automatizadas de la cubierta de la tierra de imágenes procesadas previamente. El equipo del JRC procesó los sitios ubicados en el ámbito del trópico, África subsahariana (Beuchle *et al.*, 2011) y Europa Oriental (Seebach *et al.*, 2010) como parte de los proyectos en curso TREES-3, MONDE y FOREST (JRC 2010; ver Raši *et al.*, 2011 para obtener más detalles acerca del proceso de clasificación de la cubierta de la tierra del JRC). El equipo de la FAO procesó todos los demás sitios (Figura 1). Aunque hubo algunas diferencias en los métodos de procesamiento utilizados por los dos equipos, el procesamiento en general, y sobre todo las clasificaciones resultantes, son comparables. Los métodos de procesamiento consistían en los siguientes componentes comunes:

- Adquisición de datos;
- Procesamiento previo de datos y normalización de imágenes;
- Segmentación de imágenes;
- Clasificación de imágenes.

La segmentación automatizada de los polígonos de la cubierta de la tierra y la clasificación previa de los tipos de cubierta de la tierra tienen dos objetivos principales: crear un conjunto de datos coherente en términos espaciales y temporales y evitar la delineación manual, reduciendo por lo tanto el esfuerzo que conlleva la revisión y verificación visual de las etiquetas de la cubierta de la tierra y del uso de la tierra.

La metodología de clasificación de la cubierta de la tierra de la FAO–JRC consistió en cuatro etapas:

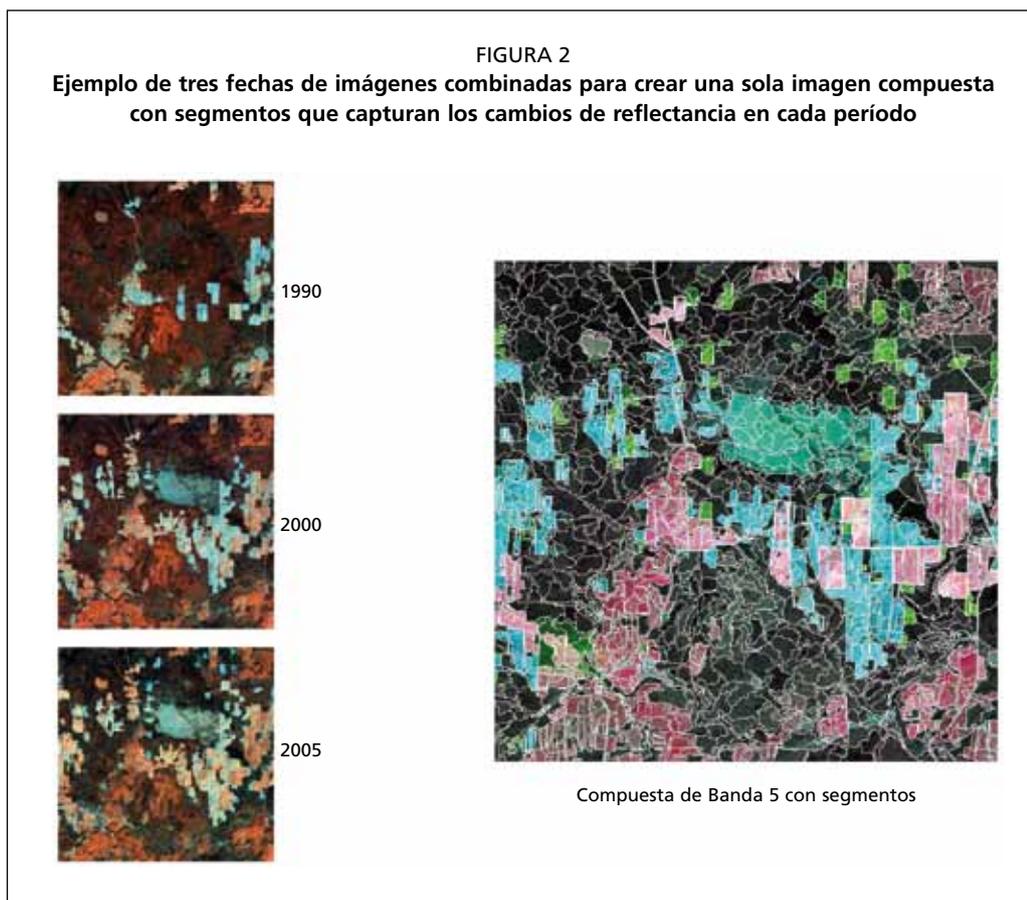
- Segmentación de las imágenes de nivel 1 (que no tienen unidades de mapeo mínimas o MMU) y de nivel 2 (MMU de una dimensión aproximada de 5 ha);
- Recopilación de datos de entrenamiento de los sitios representativos para una clasificación supervisada;
- Construcción de modelo y clasificación de la cubierta de la tierra para objetos de nivel 1;
- Asignación de la clasificación de la cubierta de la tierra para objetos de nivel 2.

Todas las funciones de segmentación y de clasificación supervisada fueron llevadas a cabo utilizando el software de procesamiento y segmentación de imágenes eCognition®.¹

La segmentación de imágenes es el proceso que consiste en dividir una imagen al agrupar los píxeles similares en aglomeraciones denominadas objetos (llamados regularmente segmentos o polígonos) basados en la similitud del espectro y la particularidad espacial. Los criterios para crear objetos imágenes a partir de píxeles individuales en eCognition® pueden ser controlados por el operador al especificar los valores para una serie de parámetros tales como, el tamaño, la forma y el grado de verosimilitud a ser obtenido en el proceso de segmentación. Estos valores afectan la formación de aglomeraciones y controlan la forma y tamaño de los objetos creados en general (Batz y Schappe, 2000).

Una rutina de segmentación de múltiples datos utilizó bandas de imágenes de Landsat de los tres períodos de la encuesta a fin de crear un solo nivel que contenía objetos basados en información espectral de cada período (Figura 2). La segmentación de imágenes fue implementada en dos etapas. El método de la FAO era similar a las rutinas de segmentación descritas por Raši *et al.* (2011), utilizando parámetros que permitieron la creación de objetos pequeños de formas irregulares basados en los valores de reflectancia espectral de las bandas de Landsat 3, 4 y 5 (0.63–1.75 μm). Estas bandas fueron escogidas por su capacidad de establecer diferencias en la reflectancia de superficie provocada por cambios en el tipo de vegetación (Desclée, Bogaert y Defourny, 2006; Duveiller *et al.*,

¹ www.ecognition.com/products/ecognition-developer.



2008). La primera segmentación (es decir, el nivel 1) creó objetos muy pequeños que variaban desde un píxel de Landsat a más de 100 ha y variaban de manera inversa con la heterogeneidad espectral de la imagen Landsat subyacente.

La imagen más reciente (es decir, de 2005) fue segmentada primero. Los objetos creados durante este proceso fueron utilizados para forzar la segmentación de la imagen de 2000 y, a su vez, para que dichos objetos forzaran la segmentación de la imagen de 1990. Para el trópico, la segmentación se aplicó primero al par de imágenes de 1990 y 2000, y luego, los objetos de 2000 fueron utilizados para forzar la segmentación de la imagen de 2005.

La MMU deseada de los segmentos de nivel 2 era de 5 ha (Ridder, 2007). Se obtuvo al agregar los segmentos de nivel 1 menores de 5 ha a los objetos adyacentes que tenían la reflectancia promedio más parecida de banda 5 de Landsat. La reflectancia infrarroja de onda corta fue utilizada debido a su eficacia en las aplicaciones de mapeo forestal (Horler y Ahern, 1986; Hoffhine y Sader, 2002). La clasificación de la cubierta de la tierra fue llevada a cabo en los segmentos espectralmente homogéneos de nivel 1. A los segmentos de nivel 2 se les asignaron etiquetas de clasificación según la composición porcentual subyacente definida por los segmentos de nivel 1 (Tabla 1).

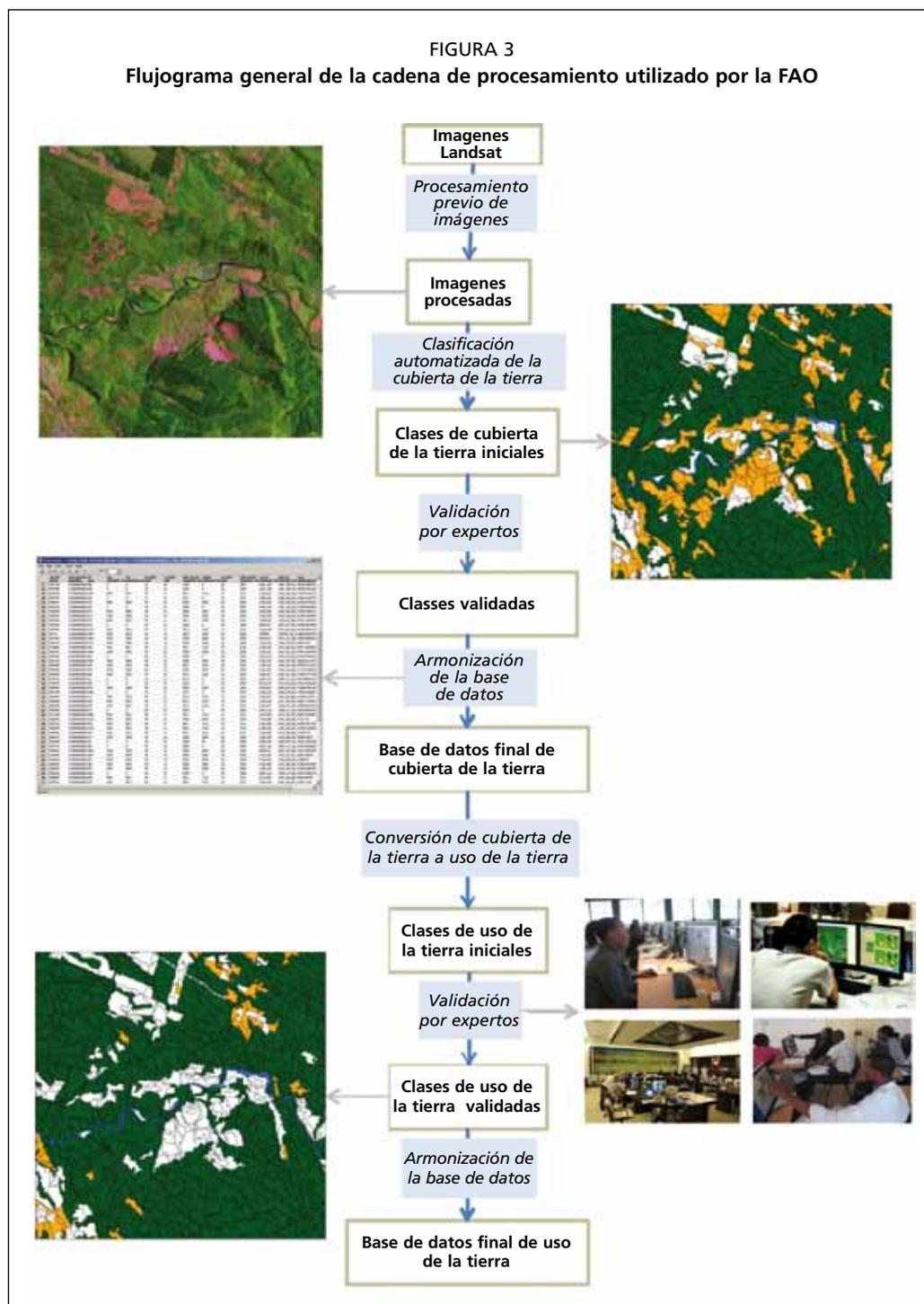
Debido a la gran cantidad de muestras y a la complejidad que conlleva la clasificación de cada sitio, un enfoque de clasificación automatizada supervisada fue seleccionado como la mejor opción de procesamiento. La metodología de clasificación en general (ilustrada en forma de flujograma general en la Figura 3) se realizó de la siguiente manera:

- Para cada sitio y fecha, se produjo una clasificación de la cubierta de la tierra utilizando las siguientes clases – *cubierta de árboles*, *cubierta de arbustos*, *otras tierras* (que incluyen la cubierta herbácea y el suelo desnudo/sin vegetación, que fueron agrupados y no se muestran separadamente), *agua* y *ningún dato*. Estas clases correspondían ampliamente a las directrices de buenas prácticas de uso de

TABLA 1
Modelo de etiquetamiento de cubierta de la tierra de MMU de 5 ha de nivel 2 basado en la composición porcentual de los segmentos de nivel 1 subyacentes, colocados en orden de prioridad descendente

| Nivel 1 | % composición | Etiqueta de cubierta de nivel 2 |
|----------------------|---------------|---------------------------------|
| Cubierta de árboles | ≥ 30 | Cubierta de árboles |
| Cubierta de arbustos | ≥ 70 | Cubierta de arbustos |
| Otras tierras | ≥ 70 | Otras tierras |
| Agua | ≥ 70 | Agua |

FIGURA 3
Flujograma general de la cadena de procesamiento utilizado por la FAO



la tierra del IPCC (Paustian, Ravindranath y van Amstel, 2006) al ser convertidas finalmente en etiquetas de uso de la tierra.

- Las imágenes de 2000 se clasificaron primero. Cuando había poca probabilidad de detectar cambios entre las encuestas, la etiqueta de clase para los objetos presentes en el estrato de objetos imagen de 2000 fue transferida a los niveles de objetos imagen de 1990 y 2005.
- Al determinar que los objetos tenían una alta probabilidad relativa de cambio entre 1990 y 2000 y entre 2000 y 2005 éstos fueron clasificados separadamente utilizando datos de entrenamiento seleccionados automáticamente entre los objetos sin cambio del mismo período.
- A los objetos MMU de 5 ha se les asignaron etiquetas de clase de conformidad con la proporción de objetos etiquetados con el nivel 1 que contenían.

ENTRENAMIENTO DE LA CLASIFICACIÓN

La amplia gama de características biofísicas que la cubierta de árboles mostraba a nivel mundial constituyó un reto para el entrenamiento de la recopilación de datos. Por ejemplo, las coníferas densas, oscuras y perennes tienen diferentes características respecto a las especies perennes latifoliadas, que a su vez, difieren de las características de los árboles latifoliados deciduos. Las variaciones en las características biofísicas, la estacionalidad cambiante y las condiciones de iluminación debidas al ángulo del sol y la posición de la pendiente se combinan para afectar las propiedades de la reflectancia espectral de la cubierta de árboles, dificultando así la creación de modelos basados en la reflectancia que puedan clasificar con precisión la cubierta de árboles en su multiplicidad de formas en todo el mundo. La metodología de clasificación de la FAO intentó dar cuenta de esta variación al aplicar un único método para crear modelos de clasificación de la cubierta de árboles a nivel mundial para cada sitio de muestreo y período. Por lo tanto, se crearon y aplicaron tres modelos distintos de clasificación de cubierta de la tierra en cada sitio de muestreo, uno para cada período.

Para los sitios en los ámbitos boreal, templado y subtropical, etiquetas de entrenamiento para cada clase de cubierta de la tierra se asignaron a los objetos imagen de nivel 1, utilizando espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) Campos continuos de vegetación (VCF) que coincidía temporalmente con el año 2000 (Hansen *et al.*, 2003) y los productos de cubierta de la tierra de GlobCover de 2005 (Arino *et al.*, 2008). Etiquetas de clase de entrenamiento para cuerpos de agua fueron asignadas basándose en la proporción de los píxeles de la máscara de agua mundial MODIS (Carroll *et al.*, 2009) que se ubicaban dentro de un objeto imagen individual. Los datos de GlobCover fueron utilizados para asistir en la clasificación de la cubierta de la tierra en donde los arbustos eran predominantes.

Se utilizaron clasificadores de red neuronal artificial para producir clasificaciones de cubierta de la tierra para los sitios de muestreo procesados por la FAO. La red fue entrenada para cada sitio y luego aplicada a los objetos imagen de todo el año 2000. A los objetos con las mismas o similares características espectrales en 1990 y 2005 así como en 2000 se les asignaron automáticamente etiquetas de la cubierta de la tierra del objeto imagen de 2000. Cuando se detectó un cambio espectral considerable entre 1990 y 2000 o entre 2000 y 2005, a los objetos imagen de 1990 y 2005 se les asignaron etiquetas basadas en modelos de clasificación creados individualmente para 1990 y 2005. Los métodos utilizados se detallan en Lindquist *et al.* (presentado).

En el caso del trópico, la clasificación de la cubierta de la tierra basada en el objeto de nivel 1 se sirvió de una biblioteca espectral supervisada (Raši *et al.*, 2011). Las firmas espectrales fueron recopiladas a partir de un conjunto común de áreas de entrenamiento que representaban las principales clases de cubierta de la tierra existentes en el trópico. Para este fin, se utilizaron los datos previamente procesados de Landsat ETM+ para el año 2000 de todos los sitios de muestreo en una subregión. Para cada clase principal de

cubierta de la tierra, se identificaron varias subclases, que representan las variaciones debidas a la condición del sitio o subtipo de cubierta de la tierra. Para la *cubierta de árboles*, por ejemplo, las subclases identificadas fueron bosques perennes densos, bosques perennes degradados, bosques latifoliados secos, manglares y bosques palustres. Para cada subclase, se seleccionaron varias áreas de entrenamiento. La cantidad de píxeles utilizados para establecer la firma espectral de una subclase fue, en general, superior a 1 000. Las estadísticas de firma espectral (desviaciones medias y estándar) fueron calculadas a nivel de subclase. Para Asia del Sur y Asia del Sudeste, por ejemplo, se establecieron 73 firmas espectrales como insumos para la clasificación digital de las cuatro principales categorías de cubierta de la tierra. Una clasificación supervisada genérica de los objetos de nivel 1 de segmentación se llevó a cabo de manera uniforme para todos los sitios de muestreo, basada en las funciones de membresía establecidas a partir de la firma espectral de cada subclase para las bandas espectrales 3, 4 y 5 de Landsat. Las funciones de membresía fueron definidas como una aproximación de la distribución de la probabilidad de clase. Estas funciones de membresía fueron sucesivamente aplicadas a las imágenes de los tres años, es decir, prolongando las firmas espectrales a 1990 y 2005. Las subclases resultantes de la clasificación supervisada no fueron mapeadas como categorías temáticas de cubierta de la tierra separadas sino que contribuyeron al mapeo de las cuatro principales clases de cubierta de la tierra.

El resultado de la clasificación supervisada obtenido para los objetos de nivel 1 sirvió como insumo directo para la agregación temática realizada en el nivel de segmentación 2 (con un MMU de 5 ha). La asignación de etiquetas de los objetos de nivel 2 fue realizada al pasarlas a través de una lista secuencial de criterios de clasificación (Tabla 1). Para fines de monitoreo forestal, el énfasis principal se hizo en la cubierta de árboles y la proporción de la cubierta de árboles dentro de los objetos de nivel 2. Para los sitios ubicados en el trópico, se introdujo una *clase de cubierta de árboles en mosaico* para los objetos que contienen una cubierta de árboles parcial en el nivel 2: por ejemplo, una unidad de mapeo que contiene el 40 por ciento de cubierta de árboles (= superficie total de objetos de cubierta de árboles agregada de nivel 1) aún seguía siendo etiquetada como *cubierta de árboles en mosaico*. Los objetos de nivel 2 fueron las únicas etiquetas de objeto imagen tomadas en consideración para el proceso de examen y revisión de expertos descrito en las secciones sucesivas.

CLASES DE USO DE LA TIERRA

Las clasificaciones de uso de la tierra se basaron en las definiciones de los bosques de la FAO (FAO, 2010), de la siguiente manera:

- *Bosque* – tierra de más de 0.5 ha con árboles de una altura superior a 5 metros y una cubierta de copas de más del 10 por ciento, o árboles capaces de alcanzar este umbral *in situ*. Esto no comprende la tierra que tiene un uso predominantemente agrícola o urbano.
- *Otras tierras boscosas* – la tierra que no ha sido clasificada como *bosque*, comprendida de más de 0.5 ha; con árboles de una altura superior a 5 metros y una cubierta de copas del 5–10 por ciento, o árboles capaces de alcanzar ese umbral *in situ*, o que posee una cubierta mixta de maleza, arbustos y árboles superior al 10 por ciento. Éstas no incluyen la tierra que se encuentra bajo un uso predominantemente agrícola o urbano.
- *Otras tierras* – todas las tierras que no han sido clasificadas como bosque u otras tierras boscosas.

CONVERSIÓN DE CUBIERTA DE LA TIERRA A USO DE LA TIERRA

La conversión de la clase cubierta de la tierra a la clase uso de la tierra consistió en un proceso de dos etapas. La primera consistía en la conversión automatizada de las clases de cubierta de la tierra a etiquetas de uso de la tierra preliminares (Figura 4). Se presumió que esta conversión incluía la mayoría de los polígonos en el conjunto de datos. Sin embargo,

la cuantificación precisa de los verdaderos cambios de uso de la tierra es complicada. El verdadero uso de la tierra de una superficie dada debe ser objeto de examen en un contexto ecológico, que no sólo incluye determinar la proporción de vegetación presente en el momento en que fue tomada la imagen satelital, sino también cómo la tierra responderá en el futuro (por ejemplo, mediante la regeneración, forestación o deforestación) (Kurz, 2010).

En términos operativos, las definiciones de la FAO requerían de una interpretación de expertos a fin de proporcionar el contexto necesario para la categorización precisa del uso de la tierra, especialmente cuando existen excepciones a las reglas automatizadas. Las excepciones fueron las siguientes (ver también Figura 4):

- Las clases de cubierta de la tierra *cubierta de árboles* y *cubierta de árboles en mosaico* fueron convertidas en la clase de uso de la tierra *bosque*. Los expertos buscaron excepciones en donde los usos de la tierra eran urbanos (por ej. árboles en parques o jardines alrededor de las casas) o agrícolas (por ej. huertos). Las áreas urbanas con árboles, huertos, plantaciones de palma africana, tierras agrícolas con árboles y áreas bajo un uso agroforestal fueron identificadas y recodificadas manualmente como *otros usos de la tierra con cubierta de árboles*.
- *La cubierta de arbustos* fue convertida a la clase *otras tierras boscosas*. Los expertos buscaron excepciones, tales como áreas de repoblación en donde los árboles tenían la probabilidad de crecer más de 5 metros, y las recodificaron como *bosques*.
- *Otra cubierta de la tierra* fue convertida a *otro uso de la tierra*. Los expertos buscaron excepciones tales como áreas temporalmente desprovistas que podrían no haber tenido árboles en el momento de la toma de la imagen satelital pero que tenían la probabilidad de regenerarse o de ser plantadas, en cuyo caso éstas fueron recodificadas como *bosque*.

INTERPRETACIÓN DE EXPERTOS, VALIDACIÓN Y CORRECCIÓN DE LAS CLASES CUBIERTA DE LA TIERRA Y USO DE LA TIERRA

La asignación final de las etiquetas de cubierta de la tierra y uso de la tierra fue realizada por expertos nacionales forestales o en teledetección seleccionados. Las verificaciones visuales fueron efectuadas en todas las imágenes de los tres períodos de la encuesta a fin de examinar y revisar las etiquetas de cubierta de la tierra y uso de la tierra asignadas

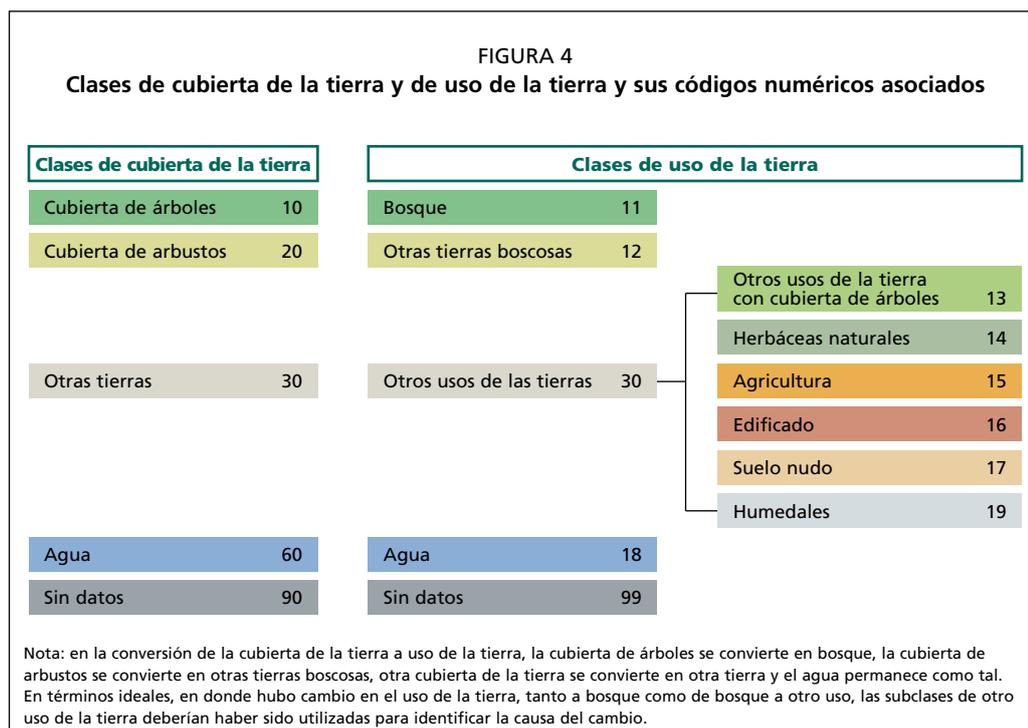
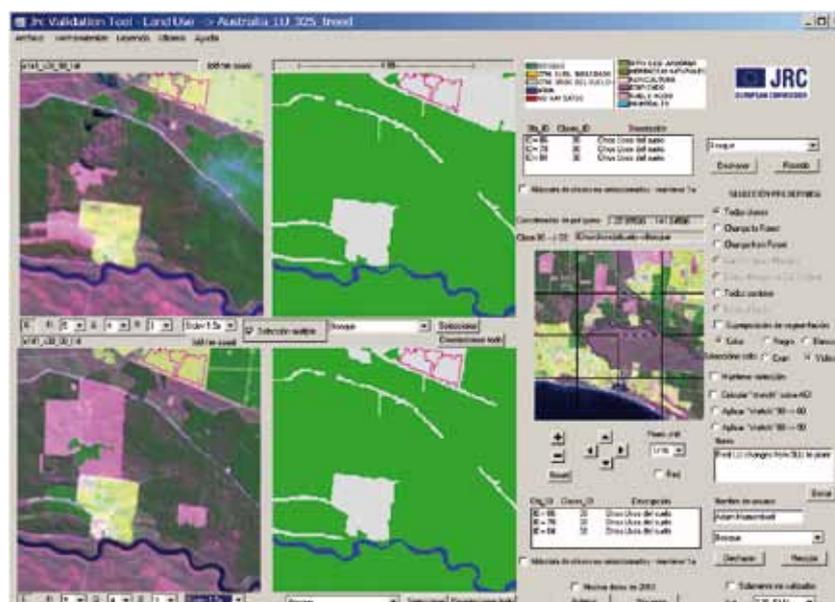


FIGURA 5
Interfaz del usuario del instrumento de validación de el JRC mostrando imágenes Landsat de cada período de la encuesta (izquierda) y clases de uso de la tierra de la FAO (centro)



de manera automatizada. El JRC desarrolló una aplicación informática específica y autónoma para este propósito (Simonetti, Beuchle y Eva, 2011). El objetivo de este instrumento era proporcionar un interfaz amigable con un conjunto de funciones fáciles de usar para navegar y evaluar un conjunto de datos de imágenes satelitales y mapas de cubierta/uso de la tierra, y recodificar de manera eficaz las áreas en donde, según el juicio de los expertos, se requería efectuar cambios (Figura 5).

El control visual y afinamiento de los resultados de la clasificación digital en el nivel de objeto 2 fue implementado en tres etapas:

- Los errores obvios efectuados por la clasificación automatizada fueron corregidos.
- Durante los talleres regionales, una revisión de los resultados de mapeo fue efectuada por expertos nacionales, quienes aportaron conocimiento forestal local a fin de mejorar la interpretación. Diecinueve talleres regionales fueron realizados entre septiembre de 2009 y julio de 2011, con la participación de 204 expertos nacionales de 107 países (Anexo 3).
- Durante una fase final de armonización a nivel regional, intérpretes expertos en imágenes realizaron una revisión final de errores pasados por alto o vueltos a introducir por error y controlaron la coherencia de la interpretación a lo largo de las regiones, aplicando las correcciones finales en donde era necesario.

El examen y la revisión de la clasificación fueron apoyados por imágenes satelitales de muy alta resolución, por Google Earth™, imágenes a partir del Proyecto de Confluencia de Grados², Panoramio™, y mapas de vegetación existentes cuando estos se encontraban disponibles. El conocimiento de expertos de campo específicos también fue importante. La fase de control visual y de afinamiento fue diseñada como componente crucial para la corrección de los errores de clasificación y para la implementación de la evaluación de cambios.

² www.confluence.org.