

Metodología para estimar pérdida de carbono a través de procesamiento de imágenes satelitales. Caso de uso Chaco Paraguayo

Santiago Vera Aquino

Universidad Nacional de Asunción
Facultad Politécnica
Ingeniería en Informática

Proyecto Final de grado

12 de diciembre de 2015

Contenido

- 1 Conceptos generales
- 2 Motivación
- 3 Trabajos relacionados
- 4 Objetivos
- 5 Imágenes satelitales
- 6 Metodología propuesta
- 7 Métricas de evaluación
- 8 Pruebas y resultados experimentales
- 9 Conclusiones y trabajos futuros



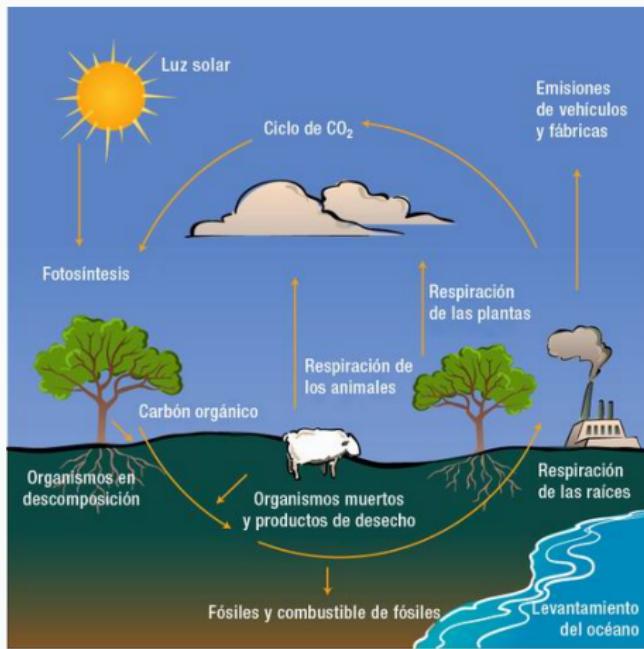
Conceptos generales

Cambio Climático



Conceptos generales

Ciclo de carbono



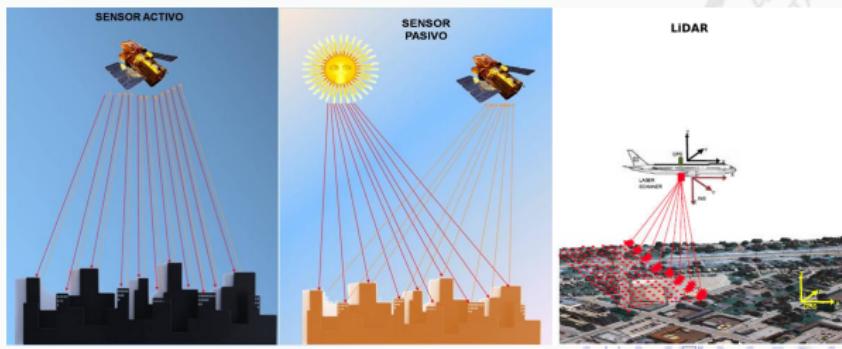
Conceptos generales

Medición de balances de carbono

- **Inventarios forestales.**

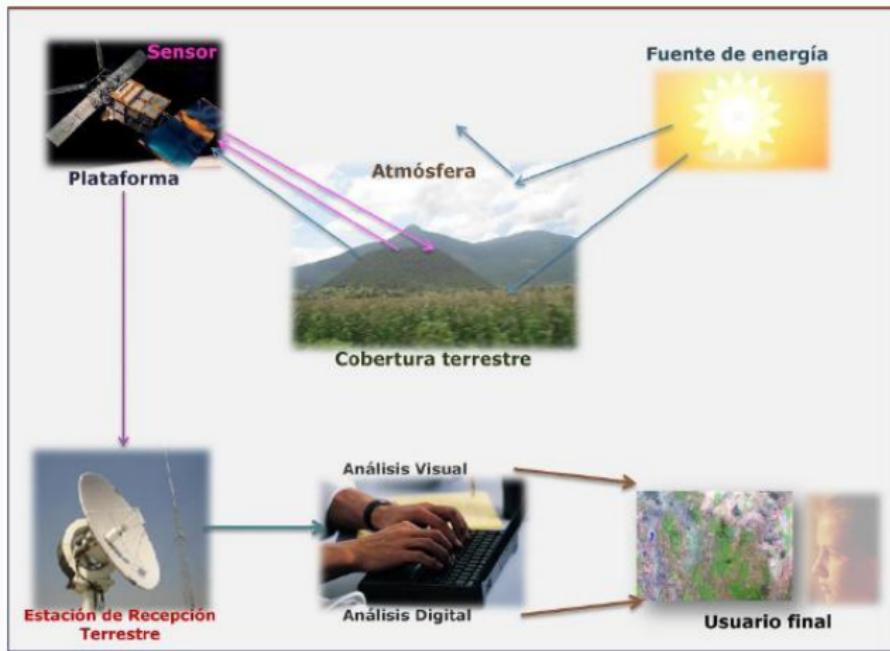


- **Sensores remotos.**



Conceptos generales

Teledetección en el medio ambiente



Motivación

Actividades principales del REDD+:

- Evitar pérdidas como emisiones de gases de efecto invernadero (conservación, no deforestación, no degradación).
- Mantener el depósito o stock de carbono (conservación, gestión sostenible).
- Incrementar el depósito por su efecto de retención o sumidero de carbono (conservación, restauración, gestión sostenible).

Trabajos relacionados

| Año | Autores | Trabajo | Evaluaciones |
|------|--|--|---|
| 2009 | Huang et al. | Assessment of Paraguay's forest cover change using Landsat observations | Presiones globales mayores al 90 % y errores por comisión menores al 10 % |
| 2010 | Matthew L. Clark et al. | A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America | Presición global del 79 % |
| 2011 | Saatchi et al. | Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents | Incertidumbre media en las estimaciones del 30 % |
| 2012 | Gustavo Miguel Huespe Duarte | Detección de cambios de la cobertura vegetal mediante índices de vegetación (NDVI), dentro y fuera de la Reserva de la biosfera del Chaco en el periodo 1985-2011 | Presenta conclusiones acerca del cambio detectado en diferentes regiones del caso de estudio. |
| 2012 | Nancy L. Harris et al. | Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions | Intervalo de predicción entre 0,57 a 1,22 (Pg C year ⁻¹) |
| 2013 | ParLu, WWF Paraguay y la Facultad de Ciencias Agrarias | Desarrollo del estudio de línea de base para el sitio piloto Bosque atlántico de Alto Paraná. (BAAPA) | Coeficiente de determinación entre el NDVI y carbono ($r^2=0.64$) |
| 2013 | Clovis Grinand et al. | Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier | Error de comisión del 85 % para coberturas establecidas y 61 % para coberturas con cambios. |
| 2013 | Dolors Armenteras et al. | National and regional determinants of tropical deforestation in Colombia | Coeficientes de determinación por regiones del país. |
| 2014 | Xiao-Peng Song et al. | Annual detection of forest cover loss using time series satellite measurements of percent tree cover | Coeficientes de determinación entre 0,7 – 0,9 |
| 2014 | Vanessa Almundo Duré | Estimación de carbono almacenado en el Parque Nacional Defensores del Chaco según formación vegetal mediante imágenes satelitales, año 2014 | Coeficientes de determinación $r_1^2 = 0,8$, $r_2^2 = 0,7$, $r_3^2 = 0,8$ |
| 2015 | Tyukavina et al. | Aboveground carbon loss in natural and managed tropical forests from 2000 to 2012 | Incertidumbre en los valores estimados de $\pm 8\%$ |
| 2015 | Réjou-Méchain et al. | Using repeated small-footprint LiDAR acquisitions to infer spatial and temporal variations of a high-biomass Neotropical forest | RMS 14 % y 23 % en las pruebas. |
| 2015 | Jean Pierre Ometto et al. | Amazon forest biomass density maps: tackling the uncertainty in carbon emission estimates | Incertidumbre en los valores estimados de $\pm 15\%$ y $\pm 14\%$ |
| 2015 | Michael W. Palace et al. | Estimating forest structure in a tropical forest using field measurements, a synthetic model and discrete return lidar data | Coeficientes de determinación $r^2 = 0,17$, $r^2 = 0,51$, $r^2 = 0,43$ |
| 2015 | Gu et al. | Downscaling 250-m MODIS Growing Season NDVI Based on Multiple-Date Landsat Images and Data Mining Approaches | Coeficiente de determinación $r^2 = 0,97$ |

Objetivos

- **Objetivos generales**

- Desarrollar una metodología automática de análisis de imágenes satelitales multitemporales para la generación de indicadores respecto a la pérdida del contenido de carbono en zonas del Chaco Paraguayo.
- Diseñar un método de detección de cambio forestal automatizada entre secuencias multitemporales de imágenes satelitales.

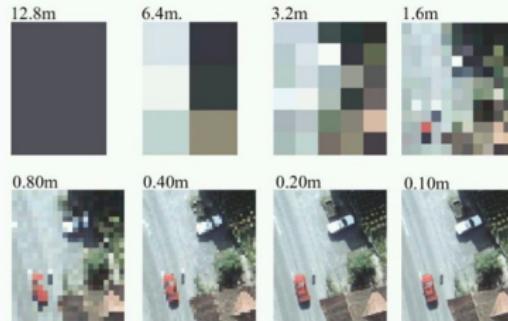
- **Objetivos específicos**

- Establecer normalizaciones de imágenes para la comparación multitemporal.
- Determinar una constante para la clasificación de vegetación en imágenes satelitales.
- Determinar la relación entre el NDVI y el carbono a través de muestreos.
- Evaluar la detección de cambio forestal con el estado del arte.

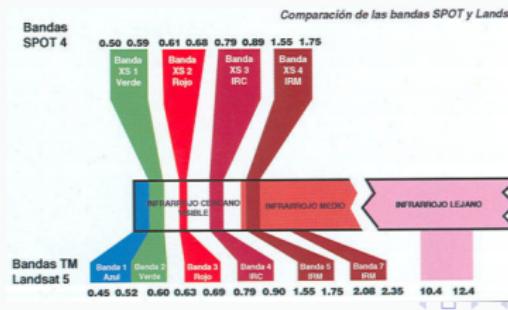
Imágenes satelitales

Sensores remotos

• Resolución espacial



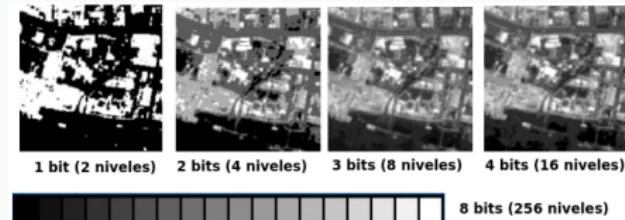
• Resolución espectral



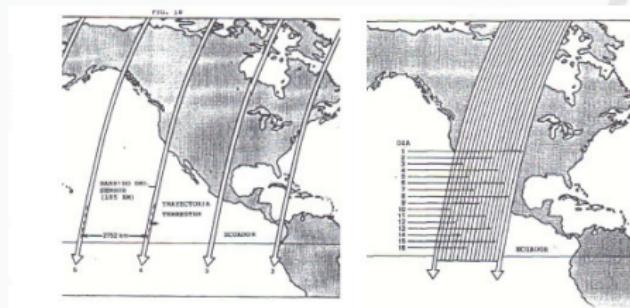
Imágenes satelitales

Sensores remotos

- Resolución radiométrica



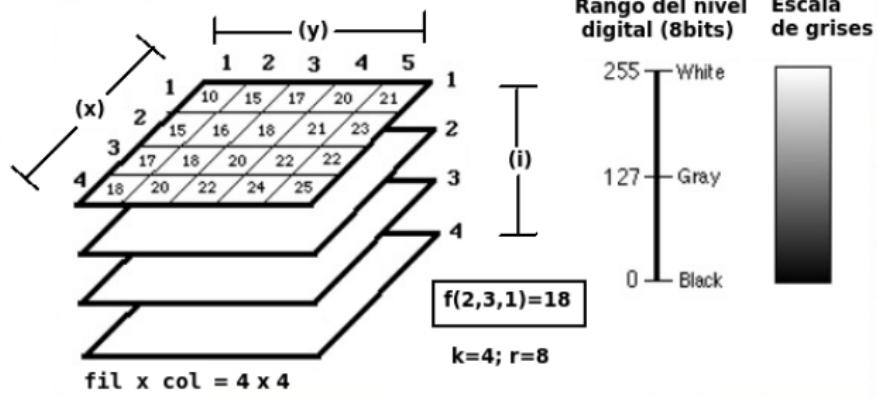
- Resolución temporal



Imágenes satelitales

Definición

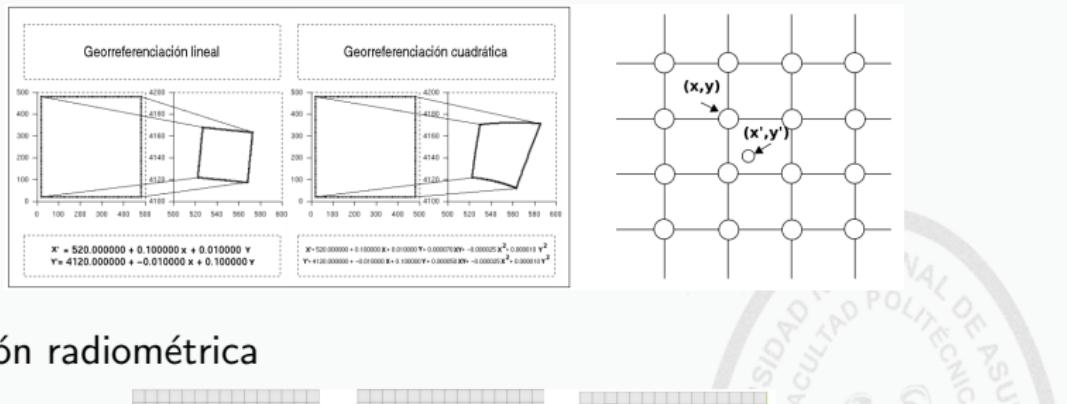
Una imagen satelital es una función $f : (x, y, i) \rightarrow \{0, \dots, 2^r\}$. Cada (x, y, i) indica la posición (x, y) en la banda i , donde $i \in \{1, \dots, k\}$, $x \in \{0, \dots, fil\}$ e $y \in \{0, \dots, col\}$ para una matriz $fil \times col$, siendo k el número de bandas y r la resolución radiométrica en la imagen. Las imágenes satelitales son conocidas también como raster y se puede representar de forma matricial.



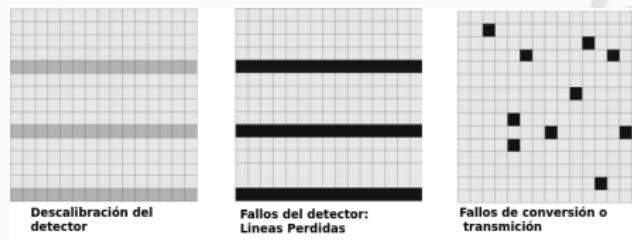
Imágenes satelitales

Correcciones a las imágenes satelitales

- Corrección geométrica

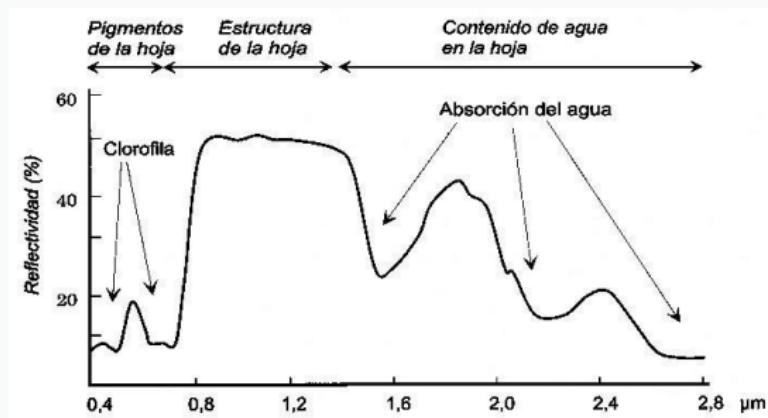


- Corrección radiométrica



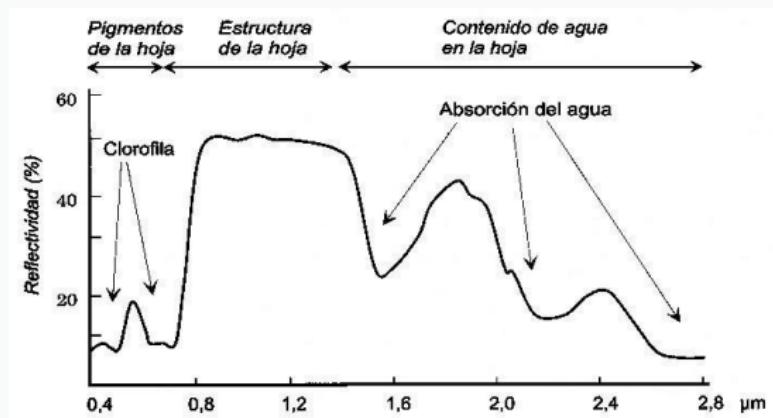
Imágenes satelitales

Índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI)



Imágenes satelitales

Índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI)



Sea una función $ndvi_f : (x, y) \rightarrow [-1, 1]$ que determina el NDVI de la imagen satelital f en cada coordenada espacial (x, y) definida por la siguiente expresión:

$$ndvi_f(x, y) = \frac{f(x, y, IRc) - f(x, y, R)}{f(x, y, IRc) + f(x, y, R)} \quad (1)$$

Imágenes satelitales

Nomalización Radiométrica

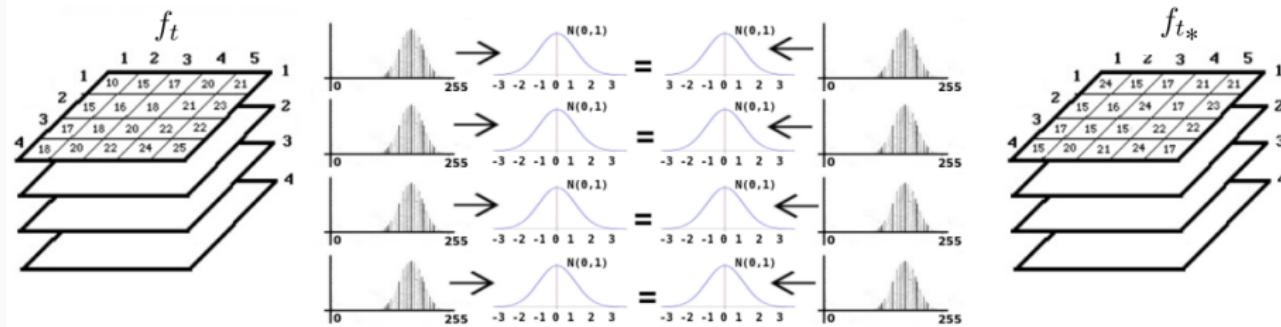
Una secuencia multitemporal esta definido por $\{f_t\}_{t \in \mathbb{N}}$, que representa una secuencia de imágenes satelitales de la misma zona en diferentes tiempos.



Imágenes satelitales

Nomalización Radiométrica

Una secuencia multitemporal esta definido por $\{f_t\}_{t \in \mathbb{N}}$, que representa una secuencia de imágenes satelitales de la misma zona en diferentes tiempos.

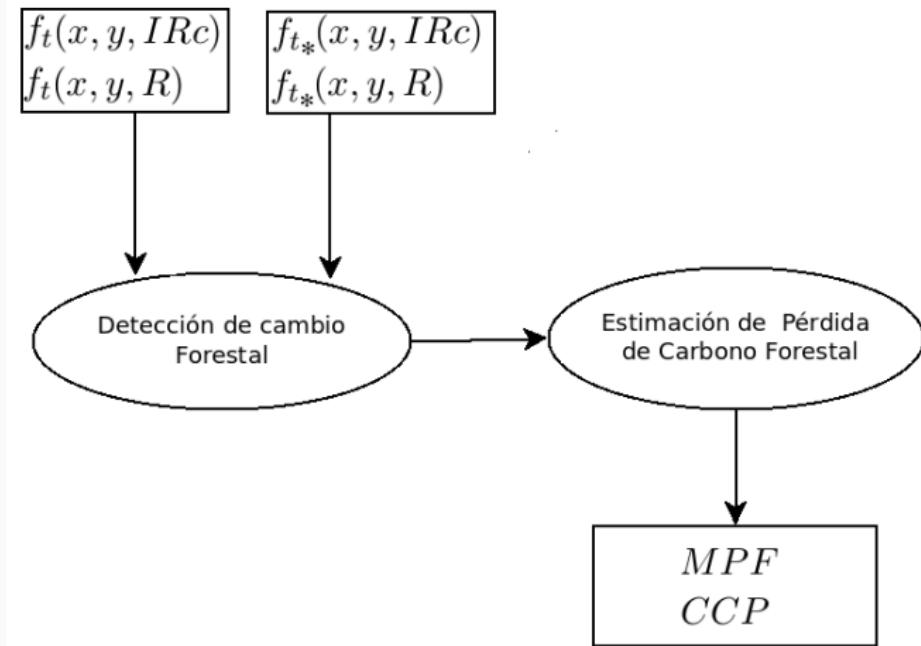


$$\frac{f_t(x, y, i) - \mu_{i,t}}{\sigma_{i,t}} = \frac{f_{t*}(x, y, i) - \mu_{i,t*}}{\sigma_{i,t*}}$$

$$f_t^{Norm}(x, y, i) \simeq f_{t*}(x, y, i)$$

$$f_t^{Norm}(x, y, i) = \mu_{i,t*} + \frac{\sigma_{i,t*}}{\sigma_{i,t}} \cdot (f_t(x, y, i) - \mu_{i,t})$$

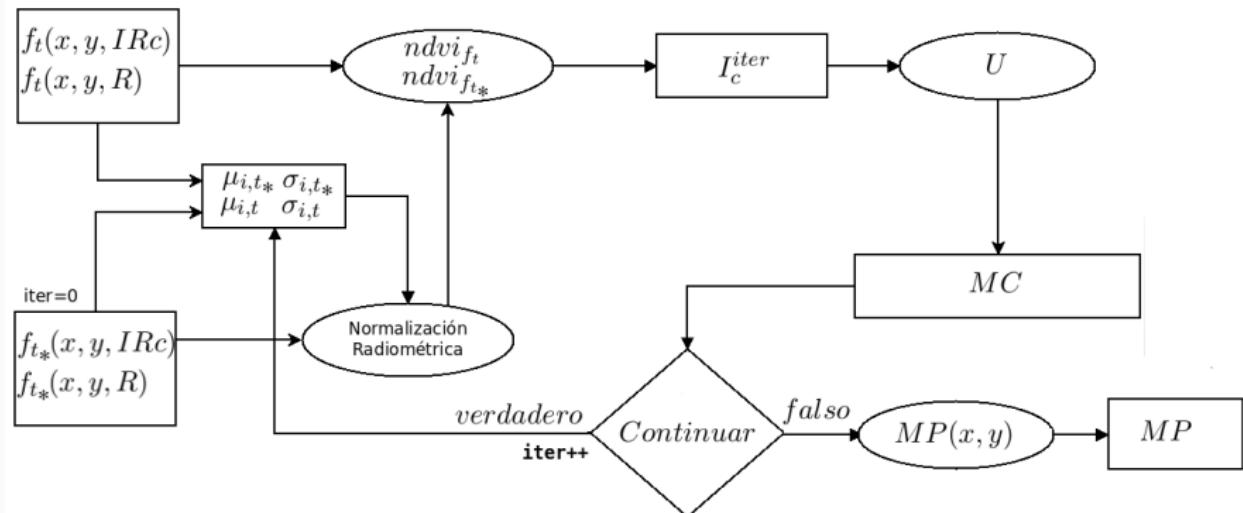
Metodología propuesta



Metodología propuesta

Detección de cambio Forestal

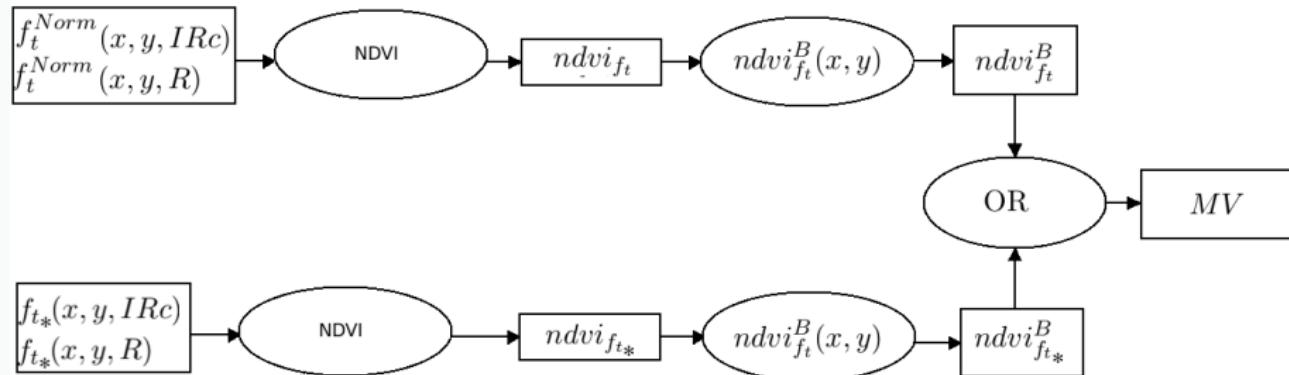
Detección de cambio



Metodología propuesta

Detección de cambio Forestal

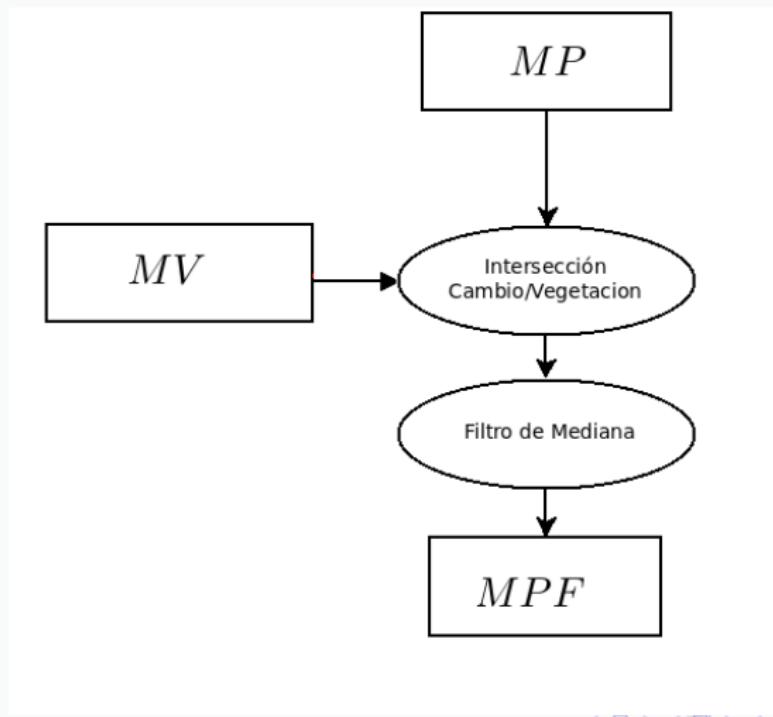
Discriminación Forestal



Metodología propuesta

Detección de cambio Forestal

Mascara de Pérdida Forestal



Metodología propuesta

Estimación de pérdida de carbono forestal

Sea $C : (x, y) \rightarrow \{[-\infty, \infty]\}$ la cantidad de carbono, en toneladas por hectárea, para la coordenada (x, y) , se tiene que:

$$C(x, y) = h + m \times ndvi_f(x, y) \quad (2)$$

Metodología propuesta

Estimación de pérdida de carbono forestal

Sea $C : (x, y) \rightarrow \{[-\infty, \infty]\}$ la cantidad de carbono, en toneladas por hectárea, para la coordenada (x, y) , se tiene que:

$$C(x, y) = h + m \times ndvi_f(x, y) \quad (2)$$

$$C_t(x, y) - C_{t_*}(x, y) = m \times (ndvi_{f_t}(x, y) - ndvi_{f_{t_*}}(x, y)) \quad (3)$$

Metodología propuesta

Estimación de pérdida de carbono forestal

Sea $C : (x, y) \rightarrow \{[-\infty, \infty]\}$ la cantidad de carbono, en toneladas por hectárea, para la coordenada (x, y) , se tiene que:

$$C(x, y) = h + m \times ndvi_f(x, y) \quad (2)$$

$$C_t(x, y) - C_{t_*}(x, y) = m \times (ndvi_{f_t}(x, y) - ndvi_{f_{t_*}}(x, y)) \quad (3)$$

$$PC(x, y) = m \times Ic(x, y) \quad (4)$$

Metodología propuesta

Estimación de pérdida de carbono forestal

Sea $C : (x, y) \rightarrow \{[-\infty, \infty]\}$ la cantidad de carbono, en toneladas por hectárea, para la coordenada (x, y) , se tiene que:

$$C(x, y) = h + m \times ndvi_f(x, y) \quad (2)$$

$$C_t(x, y) - C_{t_*}(x, y) = m \times (ndvi_{f_t}(x, y) - ndvi_{f_{t_*}}(x, y)) \quad (3)$$

$$PC(x, y) = m \times Ic(x, y) \quad (4)$$

$$PC(x, y) = 0,09 \times m \times Ic(x, y) \quad (5)$$

Metodología propuesta

Estimación de pérdida de carbono forestal

Sea $C : (x, y) \rightarrow \{[-\infty, \infty]\}$ la cantidad de carbono, en toneladas por hectárea, para la coordenada (x, y) , se tiene que:

$$C(x, y) = h + m \times ndvi_f(x, y) \quad (2)$$

$$C_t(x, y) - C_{t_*}(x, y) = m \times (ndvi_{f_t}(x, y) - ndvi_{f_{t_*}}(x, y)) \quad (3)$$

$$PC(x, y) = m \times Ic(x, y) \quad (4)$$

$$PC(x, y) = 0,09 \times m \times Ic(x, y) \quad (5)$$

$$CCP = \sum_{c=0}^{fil} \sum_{d=0}^{col} PC(x, y) \quad (6)$$

Metodología propuesta

Ejemplo

$f_t(x, y, IRc)$

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 51 | 98 | 164 | 164 | 245 |
| 51 | 98 | 164 | 164 | 245 |
| 98 | 98 | 164 | 221 | 245 |
| 98 | 164 | 164 | 221 | 221 |
| 164 | 164 | 164 | 221 | 221 |

$f_t(x, y, R)$

| | | | | |
|-----|-----|----|----|-----|
| 40 | 200 | 19 | 19 | 102 |
| 40 | 200 | 19 | 19 | 102 |
| 200 | 200 | 19 | 34 | 102 |
| 200 | 19 | 19 | 34 | 34 |
| 19 | 19 | 19 | 34 | 34 |

$f_{t_*}(x, y, IRc)$

| | | | | |
|-----|-----|----|-----|-----|
| 52 | 100 | 98 | 98 | 240 |
| 52 | 100 | 98 | 98 | 240 |
| 100 | 100 | 98 | 226 | 240 |
| 100 | 98 | 98 | 226 | 226 |
| 98 | 98 | 98 | 226 | 226 |

$f_{t_*}(x, y, R)$

| | | | | |
|-----|-----|---|----|-----|
| 41 | 202 | 5 | 5 | 111 |
| 41 | 202 | 5 | 5 | 111 |
| 202 | 202 | 5 | 28 | 111 |
| 202 | 5 | 5 | 28 | 28 |
| 5 | 5 | 5 | 28 | 28 |

Metodología propuesta

Ejemplo

$f_t(x, y, IRc)$

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 51 | 98 | 164 | 164 | 245 |
| 51 | 98 | 164 | 164 | 245 |
| 98 | 98 | 164 | 221 | 245 |
| 98 | 164 | 164 | 221 | 221 |
| 164 | 164 | 164 | 221 | 221 |

$$\mu_{IRc,t} = 163$$

$$\sigma_{IRc,t} = 58.9$$

$f_{t_*}(x, y, IRc)$

| | | | | |
|-----|-----|----|-----|-----|
| 52 | 100 | 98 | 98 | 240 |
| 52 | 100 | 98 | 98 | 240 |
| 100 | 100 | 98 | 226 | 240 |
| 100 | 98 | 98 | 226 | 226 |
| 98 | 98 | 98 | 226 | 226 |

$$\mu_{IRc,t_*} = 137$$

$$\sigma_{IRc,t_*} = 67.1$$

$f_{t_*}^{Norm}(x, y, IRc)$

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 88 | 130 | 128 | 128 | 253 |
| 88 | 130 | 128 | 128 | 253 |
| 130 | 130 | 128 | 241 | 253 |
| 130 | 128 | 128 | 241 | 241 |
| 128 | 128 | 128 | 241 | 241 |

$iter = 0$

$f_t(x, y, R)$

| | | | | |
|-----|-----|----|----|-----|
| 40 | 200 | 19 | 19 | 102 |
| 40 | 200 | 19 | 19 | 102 |
| 200 | 200 | 19 | 34 | 102 |
| 200 | 19 | 19 | 34 | 34 |
| 19 | 19 | 19 | 34 | 34 |

$$\mu_{R,t} = 69.8$$

$$\sigma_{R,t} = 71.3$$

$f_{t_*}(x, y, R)$

| | | | | |
|-----|-----|---|----|-----|
| 41 | 202 | 5 | 5 | 111 |
| 41 | 202 | 5 | 5 | 111 |
| 202 | 202 | 5 | 28 | 111 |
| 202 | 5 | 5 | 28 | 28 |
| 5 | 5 | 5 | 28 | 28 |

$$\mu_{R,t_*} = 64.6$$

$$\sigma_{R,t_*} = 77.5$$

$f_{t_*}^{Norm}(x, y, R)$

| | | | | |
|-----|-----|----|----|-----|
| 48 | 196 | 15 | 15 | 112 |
| 48 | 196 | 15 | 15 | 112 |
| 196 | 196 | 15 | 36 | 112 |
| 196 | 15 | 15 | 36 | 36 |
| 15 | 15 | 15 | 36 | 36 |

$$\mu_{R,t} + \frac{\sigma_{R,t}}{\sigma_{R,t_*}} \cdot (f_{t_*}(x, y, R) - \mu_{R,t_*})$$

$ndvi_{f_t}$

| | | | | |
|--------|--------|-------|-------|-------|
| 0.121 | -0.342 | 0.792 | 0.792 | 0.412 |
| 0.121 | -0.342 | 0.792 | 0.792 | 0.412 |
| -0.342 | -0.342 | 0.792 | 0.733 | 0.412 |
| -0.342 | 0.792 | 0.792 | 0.733 | 0.733 |
| 0.792 | 0.792 | 0.792 | 0.733 | 0.733 |

$ndvi_{f_{t_*}}$

| | | | | |
|--------|--------|-------|-------|-------|
| 0.292 | -0.203 | 0.790 | 0.790 | 0.384 |
| 0.292 | -0.203 | 0.790 | 0.790 | 0.384 |
| -0.203 | -0.203 | 0.790 | 0.739 | 0.384 |
| -0.203 | 0.790 | 0.790 | 0.739 | 0.739 |
| 0.790 | 0.790 | 0.790 | 0.739 | 0.739 |

$I_c = ndvi_{f_t} - ndvi_{f_{t_*}}$

| | | | | |
|--------|--------|-------|--------|--------|
| -0.172 | -0.140 | 0.002 | 0.002 | 0.028 |
| -0.172 | -0.140 | 0.002 | 0.002 | 0.028 |
| -0.140 | -0.140 | 0.002 | -0.005 | 0.028 |
| -0.140 | 0.002 | 0.002 | -0.005 | -0.005 |
| 0.002 | 0.002 | 0.002 | -0.005 | -0.005 |

$$\mu_{I_c} = -0.038 \quad \sigma_{I_c} = 0.0713$$

MC

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

$$\mu_{anterior} = -0.038$$

$$-0.11 = \mu_{I_c} - n \times \sigma_{I_c} < I_c(x, y) < \mu_{I_c} + n \times \sigma_{I_c} = 0.0328$$

$iter ++$

Metodología propuesta

Ejemplo

$f_t(x, y, IRc)$

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 51 | 98 | 164 | 164 | 245 |
| 51 | 98 | 164 | 164 | 245 |
| 98 | 98 | 164 | 221 | 245 |
| 98 | 164 | 164 | 221 | 221 |
| 164 | 164 | 164 | 221 | 221 |

$$\mu_{IRc,t} = 193.33$$

$$\sigma_{IRc,t} = 29.8$$

$f_{t_*}(x, y, IRc)$

| | | | | |
|-----|-----|----|-----|-----|
| 52 | 100 | 98 | 98 | 240 |
| 52 | 100 | 98 | 98 | 240 |
| 100 | 100 | 98 | 226 | 240 |
| 100 | 98 | 98 | 226 | 226 |
| 98 | 98 | 98 | 226 | 226 |

$$\mu_{IRc,t_*} = 157.22$$

$$\sigma_{IRc,t_*} = 68.291$$

$f_{t_*}^{Norm}(x, y, IRc)$

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 147 | 168 | 167 | 167 | 229 |
| 147 | 168 | 167 | 167 | 229 |
| 168 | 168 | 167 | 223 | 229 |
| 168 | 167 | 167 | 223 | 223 |
| 167 | 167 | 167 | 223 | 223 |

$iter = 1$

$f_t(x, y, R)$

| | | | | |
|-----|-----|----|----|-----|
| 40 | 200 | 19 | 19 | 102 |
| 40 | 200 | 19 | 19 | 102 |
| 200 | 200 | 19 | 34 | 102 |
| 200 | 19 | 19 | 34 | 34 |
| 19 | 19 | 19 | 34 | 34 |

$$\mu_{R,t} = 37$$

$$\sigma_{R,t} = 30.64$$

$f_{t_*}(x, y, R)$

| | | | | |
|-----|-----|---|----|-----|
| 41 | 202 | 5 | 5 | 111 |
| 41 | 202 | 5 | 5 | 111 |
| 202 | 202 | 5 | 28 | 111 |
| 202 | 5 | 5 | 28 | 28 |
| 5 | 5 | 5 | 28 | 28 |

$$\mu_{R,t_*} = 29.056$$

$$\sigma_{R,t_*} = 39.06$$

$f_{t_*}^{Norm}(x, y, R)$

| | | | | |
|-----|-----|----|----|-----|
| 46 | 173 | 18 | 18 | 101 |
| 46 | 173 | 18 | 18 | 101 |
| 173 | 173 | 18 | 36 | 101 |
| 173 | 18 | 18 | 36 | 36 |
| 18 | 18 | 18 | 36 | 36 |

$$\mu_{R,t} + \frac{\sigma_{R,t}}{\sigma_{R,t_*}} \cdot (f_{t_*}(x, y, R) - \mu_{R,t_*})$$

$ndvi_{f_t}$

| | | | | |
|--------|--------|-------|--------|------|
| 0.1209 | -0.342 | 0.792 | 0.7923 | 0.41 |
| 0.1209 | -0.342 | 0.792 | 0.7923 | 0.41 |
| -0.342 | -0.342 | 0.792 | 0.7333 | 0.41 |
| -0.342 | 0.7923 | 0.792 | 0.7333 | 0.73 |
| 0.7923 | 0.7923 | 0.792 | 0.7333 | 0.73 |

$ndvi_{f_{t_*}}$

| | | | | |
|--------|-------|-------|--------|-------|
| 0.5214 | -0.01 | 0.805 | 0.8046 | 0.388 |
| 0.5214 | -0.01 | 0.805 | 0.8046 | 0.388 |
| -0.013 | -0.01 | 0.805 | 0.7212 | 0.388 |
| -0.013 | 0.805 | 0.805 | 0.7212 | 0.721 |
| 0.8046 | 0.805 | 0.805 | 0.7212 | 0.721 |

$I_c = ndvi_{f_t} - ndvi_{f_{t_*}}$

| | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| -0.401 | -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0246 |
| -0.401 | -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0246 |
| -0.33 | -0.33 | -0.012 | 0.0121 | 0.0246 |
| -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0121 | 0.0121 |
| -0.012 | -0.012 | -0.012 | 0.0121 | 0.0121 |

$$\mu_{I_c} = -0.098 \quad \sigma_{I_c} = 0.1621$$

MC

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

$$\mu_{anterior} = -0.098$$

$$-0.26 = \mu_{I_c} - n \times \sigma_{I_c} < I_c(x, y) < \mu_{I_c} + n \times \sigma_{I_c} = 0.0646$$

$iter ++$

Metodología propuesta

Ejemplo

$$f_t(x, y, IRc)$$

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 51 | 98 | 164 | 164 | 245 |
| 51 | 98 | 164 | 164 | 245 |
| 98 | 98 | 164 | 221 | 245 |
| 98 | 164 | 164 | 221 | 221 |
| 164 | 164 | 164 | 221 | 221 |

$$\mu_{IRc,t} = 193.33$$

$$\sigma_{IRc,t} = 29.8$$

$$f_{t_*}(x, y, IRc)$$

| | | | | |
|-----|-----|----|-----|-----|
| 52 | 100 | 98 | 98 | 240 |
| 52 | 100 | 98 | 98 | 240 |
| 100 | 100 | 98 | 226 | 240 |
| 100 | 98 | 98 | 226 | 226 |
| 98 | 98 | 98 | 226 | 226 |

$$\mu_{IRc,t_*} = 157.22$$

$$\sigma_{IRc,t_*} = 68.291$$

$$f_{t_*}^{Norm}(x, y, IRc)$$

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 147 | 168 | 167 | 167 | 229 |
| 147 | 168 | 167 | 167 | 229 |
| 168 | 168 | 167 | 223 | 229 |
| 168 | 167 | 167 | 223 | 223 |
| 167 | 167 | 167 | 223 | 223 |

iter = 2

$$f_t(x, y, R)$$

| | | | | |
|-----|-----|----|----|-----|
| 40 | 200 | 19 | 19 | 102 |
| 40 | 200 | 19 | 19 | 102 |
| 200 | 200 | 19 | 34 | 102 |
| 200 | 19 | 19 | 34 | 34 |
| 19 | 19 | 19 | 34 | 34 |

$$\mu_{R,t} = 37$$

$$\sigma_{R,t} = 30.64$$

$$f_{t_*}(x, y, R)$$

| | | | | |
|-----|-----|---|----|-----|
| 41 | 202 | 5 | 5 | 111 |
| 41 | 202 | 5 | 5 | 111 |
| 202 | 202 | 5 | 28 | 111 |
| 202 | 5 | 5 | 28 | 28 |
| 5 | 5 | 5 | 28 | 28 |

$$\mu_{R,t_*} = 29.056$$

$$\sigma_{R,t_*} = 39.06$$

$$f_{t_*}^{Norm}(x, y, R)$$

| | | | | |
|-----|-----|----|----|-----|
| 46 | 173 | 18 | 18 | 101 |
| 46 | 173 | 18 | 18 | 101 |
| 173 | 173 | 18 | 36 | 101 |
| 173 | 18 | 18 | 36 | 36 |
| 18 | 18 | 18 | 36 | 36 |

$$\mu_{R,t} + \frac{\sigma_{R,t}}{\sigma_{R,t_*}} \cdot (f_{t_*}(x, y, R) - \mu_{R,t_*})$$

$$ndvi_{f_t}$$

| | | | | |
|--------|--------|-------|--------|------|
| 0.1209 | -0.342 | 0.792 | 0.7923 | 0.41 |
| 0.1209 | -0.342 | 0.792 | 0.7923 | 0.41 |
| -0.342 | -0.342 | 0.792 | 0.7333 | 0.41 |
| -0.342 | 0.7923 | 0.792 | 0.7333 | 0.73 |
| 0.7923 | 0.7923 | 0.792 | 0.7333 | 0.73 |

$$ndvi_{f_t_*}$$

| | | | | |
|--------|-------|-------|--------|-------|
| 0.5214 | -0.01 | 0.805 | 0.8046 | 0.388 |
| 0.5214 | -0.01 | 0.805 | 0.8046 | 0.388 |
| -0.013 | -0.01 | 0.805 | 0.7212 | 0.388 |
| -0.013 | 0.805 | 0.805 | 0.7212 | 0.721 |
| 0.8046 | 0.805 | 0.805 | 0.7212 | 0.721 |

$$I_c = ndvi_{f_t} - ndvi_{f_t_*}$$

| | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| -0.401 | -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0246 |
| -0.401 | -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0246 |
| -0.33 | -0.33 | -0.012 | 0.0121 | 0.0246 |
| -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0121 | 0.0121 |
| -0.012 | -0.012 | -0.012 | 0.0121 | 0.0121 |

$$\mu_{I_c} = -0.098 \quad \sigma_{I_c} = 0.1621$$

MC

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

$$-0.26 = \mu_{I_c} - n \times \sigma_{I_c} < I_c(x, y) < \mu_{I_c} + n \times \sigma_{I_c} = 0.0646$$

iter ++

Metodología propuesta

Ejemplo

| $ndvi_{ft}$ | | | | | $ndvi_{ft*}$ | | | | |
|-------------|--------|-------|--------|------|--------------|-------|-------|--------|-------|
| 0.1209 | -0.342 | 0.792 | 0.7923 | 0.41 | 0.5214 | -0.01 | 0.805 | 0.8046 | 0.388 |
| 0.1209 | -0.342 | 0.792 | 0.7923 | 0.41 | 0.5214 | -0.01 | 0.805 | 0.8046 | 0.388 |
| -0.342 | -0.342 | 0.792 | 0.7333 | 0.41 | -0.013 | -0.01 | 0.805 | 0.7212 | 0.388 |
| -0.342 | 0.7923 | 0.792 | 0.7333 | 0.73 | -0.013 | 0.805 | 0.805 | 0.7212 | 0.721 |
| 0.7923 | 0.7923 | 0.792 | 0.7333 | 0.73 | 0.8046 | 0.805 | 0.805 | 0.7212 | 0.721 |

$\sigma_{ndvi_{ft}} = 0.4543$

$\sigma_{ndvi_{ft*}} = 0.5518$

$$ndvi_{ft}(x, y) > \mu_{ndvi_{ft}} - n \times \sigma_c$$

| $ndvi_{ft}^B$ | | | | |
|---------------|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

$n = 1$

$\sigma_c = 0,0658242733$

| $ndvi_{ft*}^B$ | | | | |
|----------------|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

MV

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

$(ndvi_{ft}^B \text{ OR } ndvi_{ft*}^B)$

Metodología propuesta

Ejemplo

I_c

| | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| -0.401 | -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0246 |
| -0.401 | -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0246 |
| -0.33 | -0.33 | -0.012 | 0.0121 | 0.0246 |
| -0.33 | -0.012 | -0.012 | 0.0121 | 0.0121 |
| -0.012 | -0.012 | -0.012 | 0.0121 | 0.0121 |

$$\mu_{I_c} = -0.098 \quad \sigma_{I_c} = 0.1621$$

MP

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$I_c < -0.26$

$$I_c(x, y) < \mu_{I_c} - n \times \sigma_{I_c}$$

MV

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | | | | |
|-------|---|---|---|---|
| 1.085 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.085 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$$PC(x, y) = 2,709 \times Ic(x, y)$$

Filtro mediana 3x3

MPF

(MP AND MV)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$$CCP = 2.1701 \text{ ton C}$$

Métricas de evaluación

| Categorías | Perdida (VT) | No Perdida (VT) | Total (VT) |
|------------------------|-----------------|--------------------|------------|
| Perdida (Algoritmo) | TP | FP | P |
| No Perdida (Algoritmo) | FN | TN | N |
| Total (Algoritmo) | P' | N' | Total |

Cuadro : Matriz de Confusión

Métricas de evaluación

Porcentaje de precisión global (GA)

$$GA = \frac{TP + TN}{T + F} \cdot 100 \quad (7)$$

Métricas de evaluación

Coeficiente Kappa

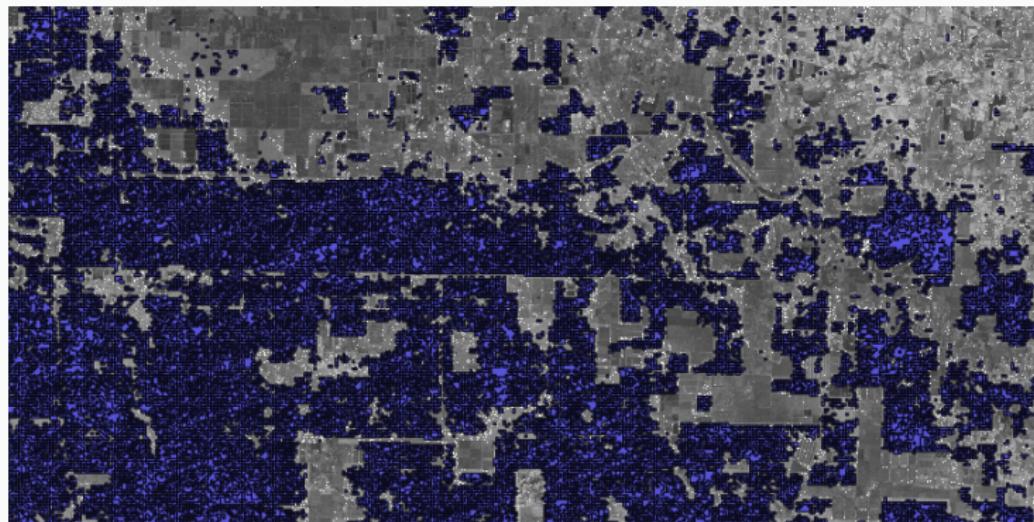
$$KAPPA = \frac{\text{Total} \times (TP + TN) - (P \times P' + N \times N')}{\text{Total}^2 \times (P \times P' + N \times N')} \quad (7)$$

| Coeficiente Kappa | Fuerza de la concordancia |
|-------------------|---------------------------|
| 0,00 | Pobre |
| 0,01-0,20 | Leve |
| 0,21-0,40 | Aceptable |
| 0,41-0,60 | Moderada |
| 0,61-80 | Considerable |
| 0,81-1,00 | Casi perfecta |

Cuadro : Valoración del coeficiente kappa.

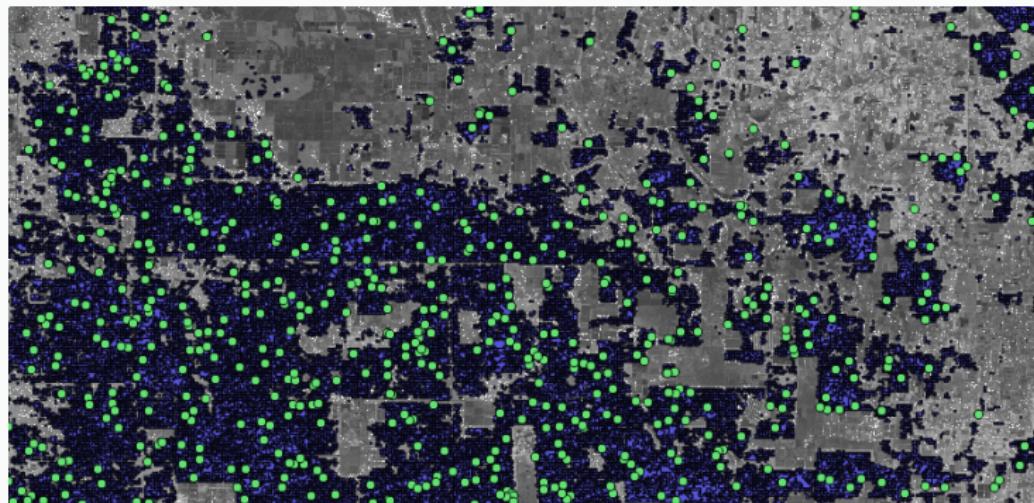
Pruebas y resultados experimentales

Umbral de Vegetación



Pruebas y resultados experimentales

Umbral de Vegetación



Pruebas y resultados experimentales

Umbral de Vegetación

| Año 1986 | | |
|----------|-------------------|----------------------|
| VCF (%) | $\mu_{ndvi_{ft}}$ | $\sigma_{ndvi_{ft}}$ |
| 50 | 0.356701 | 0.047891 |
| 40 | 0.344022 | 0.0507296 |
| 30 | 0.337696 | 0.061581 |
| 20 | 0.339586 | 0.0632055 |
| 10 | 0.335528 | 0.0727573 |

| Año 1990 | | |
|----------|-------------------|----------------------|
| VCF (%) | $\mu_{ndvi_{ft}}$ | $\sigma_{ndvi_{ft}}$ |
| 50 | 0.278804 | 0.0631834 |
| 40 | 0.264651 | 0.0679451 |
| 30 | 0.254145 | 0.0742348 |
| 20 | 0.252186 | 0.0759032 |
| 10 | 0.251421 | 0.0796667 |

| Año 1990 | | |
|----------|-------------------|----------------------|
| VCF (%) | $\mu_{ndvi_{ft}}$ | $\sigma_{ndvi_{ft}}$ |
| 50 | 0.0202133 | 0.0572825 |
| 40 | 0.0104289 | 0.0608757 |
| 30 | -0.00337075 | 0.066776 |
| 20 | -0.00663188 | 0.0695777 |
| 10 | -0.0103891 | 0.0757546 |

$$\sigma_c = 0,0658242733$$

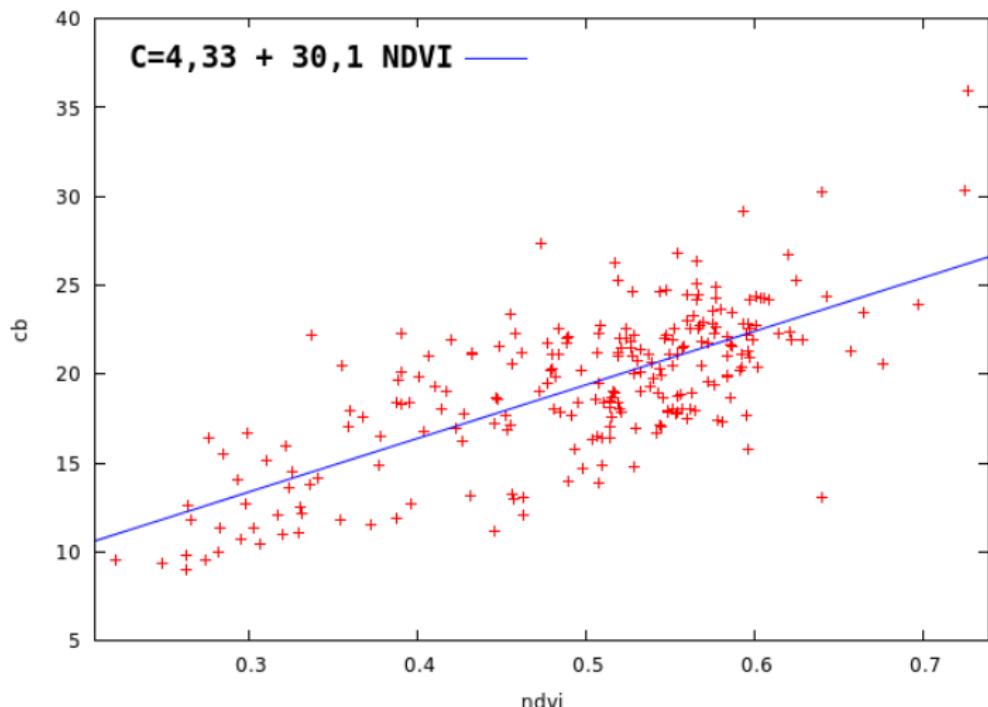
Pruebas y resultados experimentales

Estimación de pérdida de carbono forestal



Pruebas y resultados experimentales

Estimación de pérdida de carbono forestal



Pruebas y resultados experimentales

Estimación de pérdida de carbono forestal

$$C(x, y) = 4,33 + 30,1 \times ndvi_f(x, y) \quad (8)$$

$$PC(x, y) = 2,709 \times Ic(x, y) \quad (9)$$

Pruebas y resultados experimentales

Prueba experimental

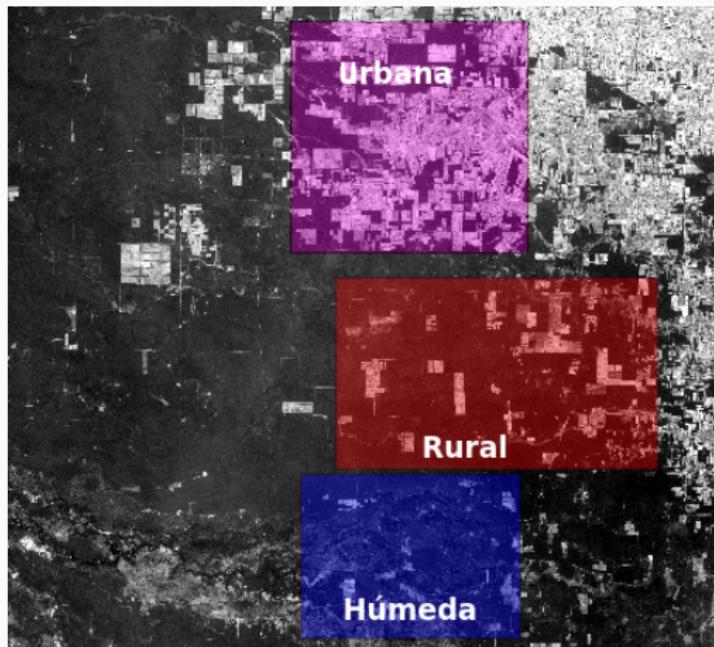
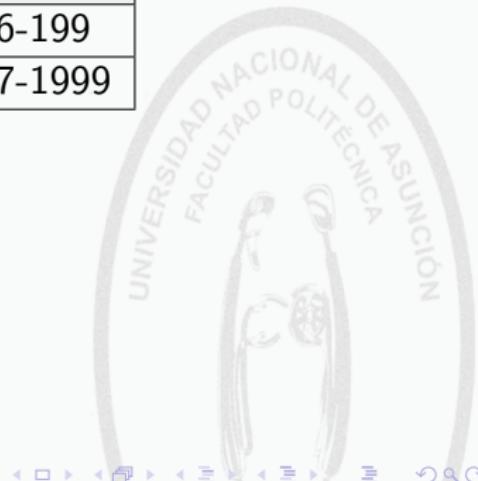


Figura : Áreas de los sectores empleados para los experimentos.

Pruebas y resultados experimentales

Prueba experimental

| Satélite | Path-row | Fecha |
|-----------------|-----------------|--------------|
| Landsat-5 | 228-76 | 1-26-199 |
| Landsat-7 | 229-76 | 8-17-1999 |



Pruebas y resultados experimentales

Prueba experimental

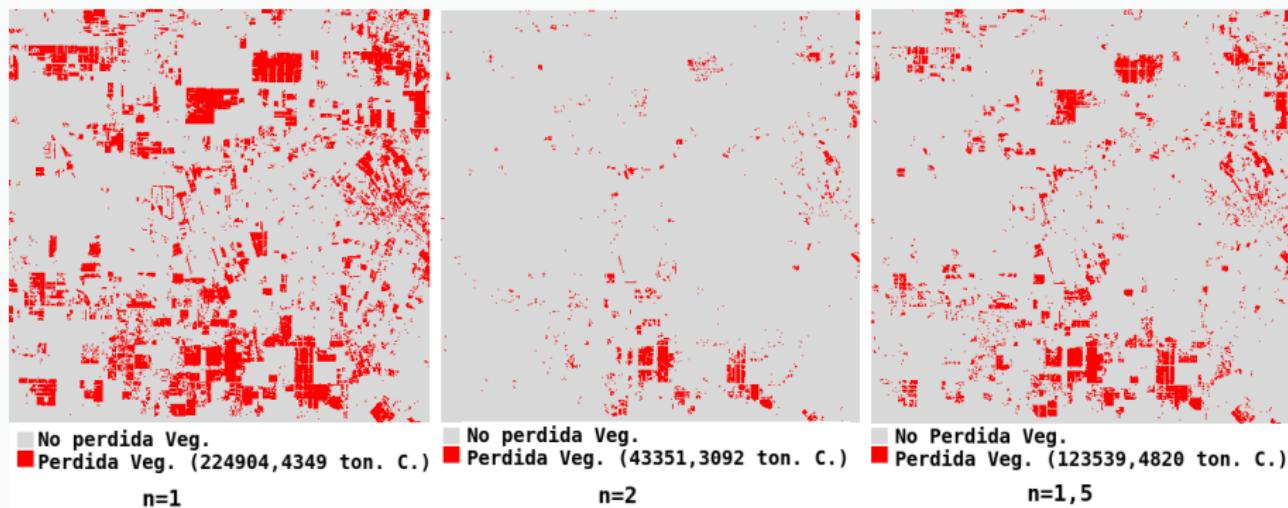


Figura : Área Urbana. Mapa de pérdida forestal y toneladas de carbono perdidos.

Pruebas y resultados experimentales

Prueba experimental

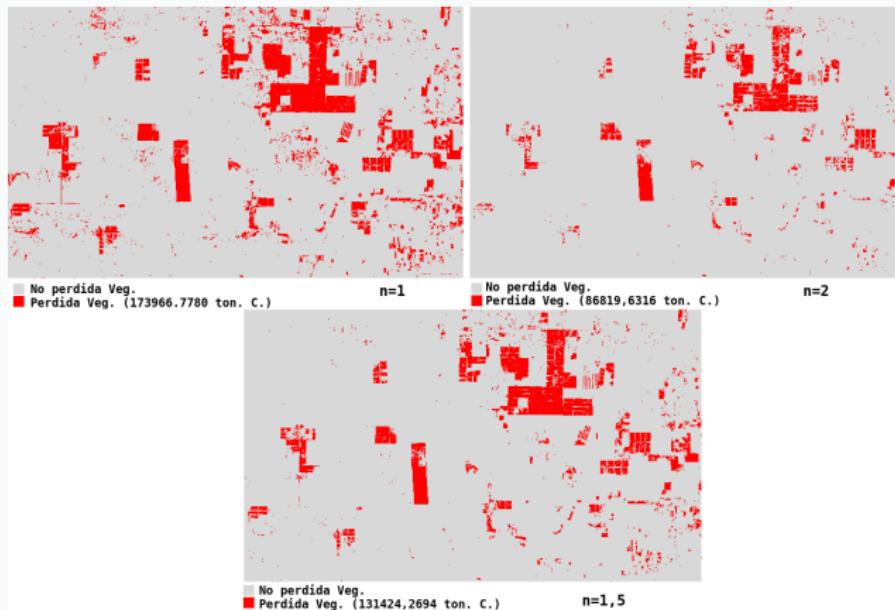


Figura : Área Rural. Mapa de pérdida forestal y toneladas de carbono perdidos

Pruebas y resultados experimentales

Prueba experimental

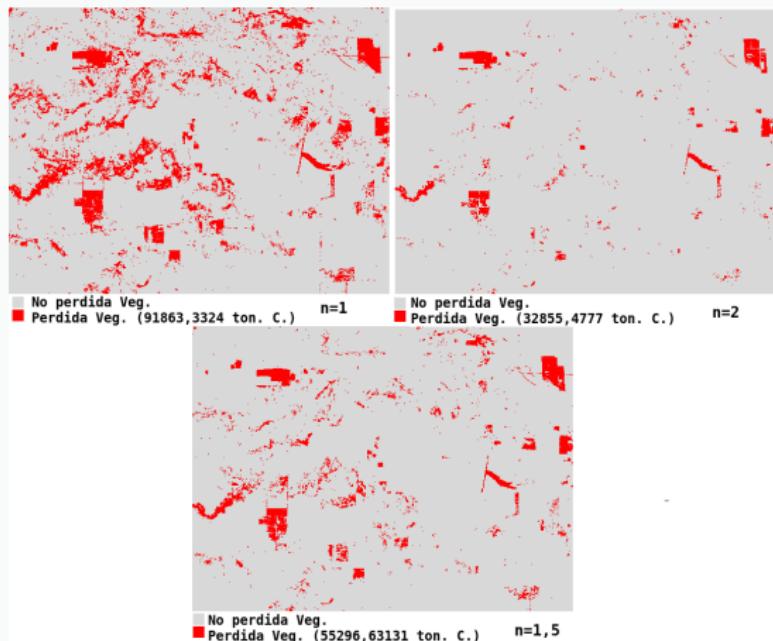


Figura : Área Húmeda. Mapa de pérdida forestal y toneladas de carbono perdidos

Pruebas y resultados experimentales

Prueba experimental

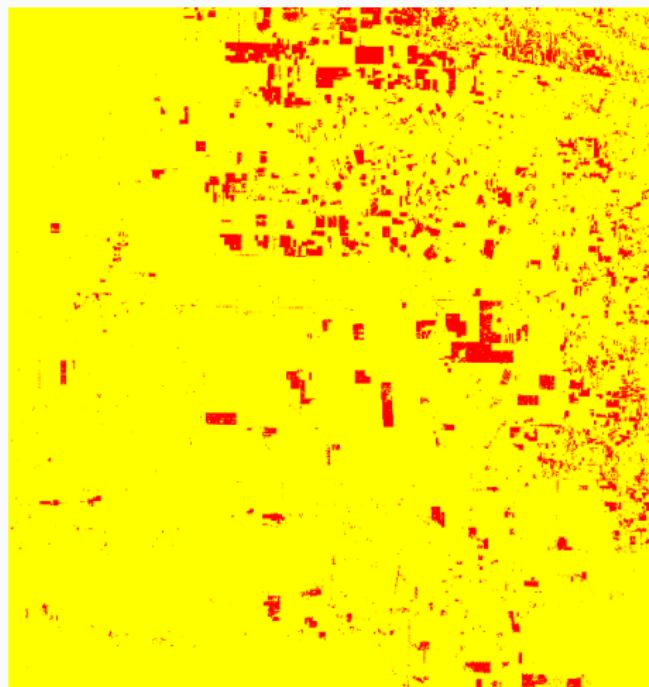


Figura : Re-clasificación de la imagen PFCP. Perdida = 1, Otros=0

Pruebas y resultados experimentales

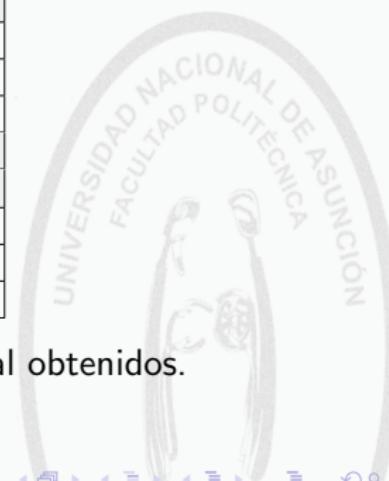
Prueba experimental

| N=1 | | |
|-------------|--------------|-------------------------|
| Área | Kappa | Precisión Global |
| Urbano | 0.476389 | 84.257452 |
| Rural | 0.65782 | 93.82121 |
| Húmeda | 0.301541 | 90.624794 |

| N=1.5 | | |
|--------------|--------------|-------------------------|
| Área | Kappa | Precisión Global |
| Urbano | 0.315273 | 83.514875 |
| Rural | 0.671753 | 94.899171 |
| Húmeda | 0.425555 | 96.693648 |

| N=2 | | |
|-------------|--------------|-------------------------|
| Área | Kappa | Precisión Global |
| Urbano | 0.09368 | 81.642457 |
| Rural | 0.570687 | 94.33648 |
| Húmeda | 0.425555 | 96.693648 |

Cuadro : Coeficiente Kappa y precisión Global obtenidos.



Pruebas y resultados experimentales

Prueba experimental

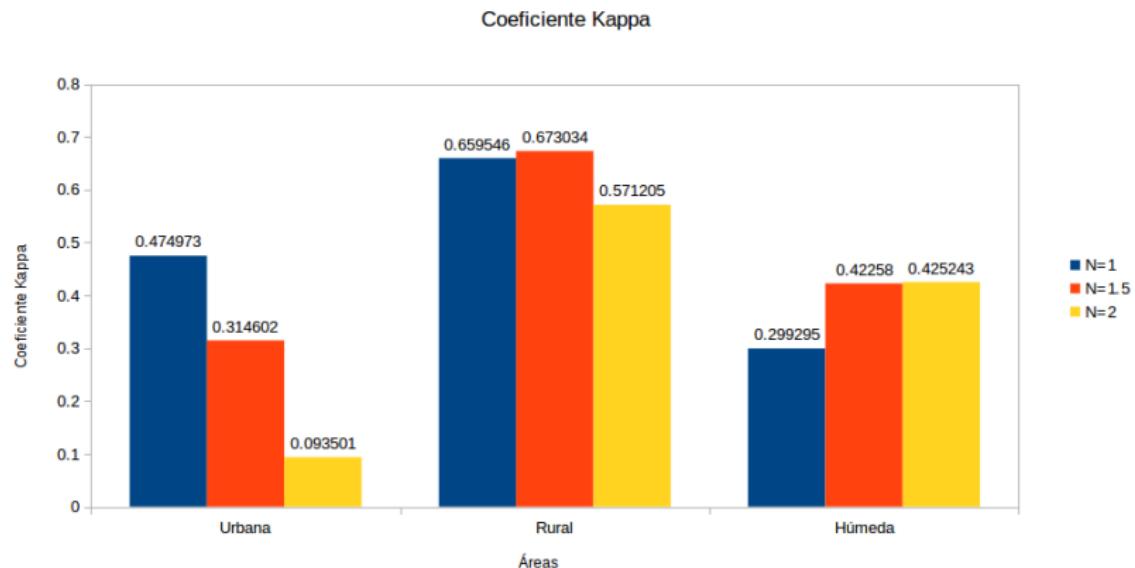


Figura : Coeficiente Kappa por cada Área y tolerancia.

Pruebas y resultados experimentales

Prueba experimental

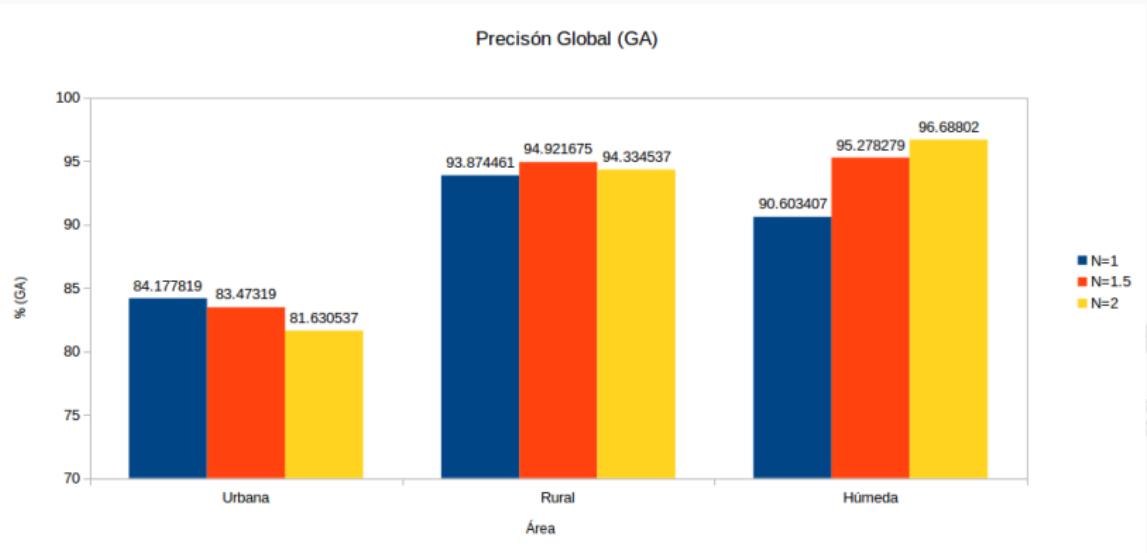


Figura : GA por cada Área y tolerancia.

Conclusiones y trabajos futuros

Conclusiones

- La normalización radiométrica permite que los pixeles de una secuencia multitemporal sean semejantes. Los índices de cambios obtenidos de la comparación multitemporal posibilitan obtener variables cualitativas a partir de umbrales elaborados por parámetros estadísticos extraídos de la misma imagen de cambio I_c . La iteración permite automatizar la detección de cambio, ya que el proceso normaliza repetidamente las imágenes teniendo en cuenta solo los pixeles que no sufrieron cambio en el tiempo, optimizando y mejorando la comparación multitemporal.
- El análisis estadístico realizado a las imágenes satelitales VCF y Landsat posibilitaron determinar a la desviación estándar de los NDVI calculados, como una constante que permite transformar las variables cuantitativas (NDVI) a variables cualitativas (vegetación/no vegetación).
- El análisis de regresión permitió encontrar una relación entre un índice de vegetación (NDVI) y el carbono (Mapa global de carbono), por lo que convertir el índice generado por las imágenes satelitales se resume en una ecuación que no implicó muestreo en campo ni estudios adicionales.
- La detección de cambio forestal fue realizado mediante a la normalización radiométrica y comparación multitemporal de forma iterativa, donde el cambio forestal fue discriminado mediante el hallazgo de la desviación estándar de los NDVI.
- En la detección de cambio forestal los resultados obtenidos fueron comparados con la imagen PFCP, de manera a evaluar el proceso con métricas de precisión global y coeficiente kappa.

Conclusiones y trabajos futuros

Trabajos futuros

- Se pretende que la metodología propuesta siga mejorando en términos de pre-procesamiento de las imágenes satelitales, ante factores que influyan en el momento de captura de los datos hechas por sensores remotos como también en técnicas que permita mejora la detección de cambio forestal.
- Proponer técnicas que permitan detectar y eliminar nubosidad en las imágenes satelitales.
- Mejorar la precisión global y el coeficiente kappa para zonas urbanas.
- Diseñar mejores técnicas que clasifique cobertura vegetal mediante la extracción de índices en todas las bandas.
- Adaptar la metodología, de manera a que permita recibir imágenes satelitales con diferentes resoluciones radiométricas.