

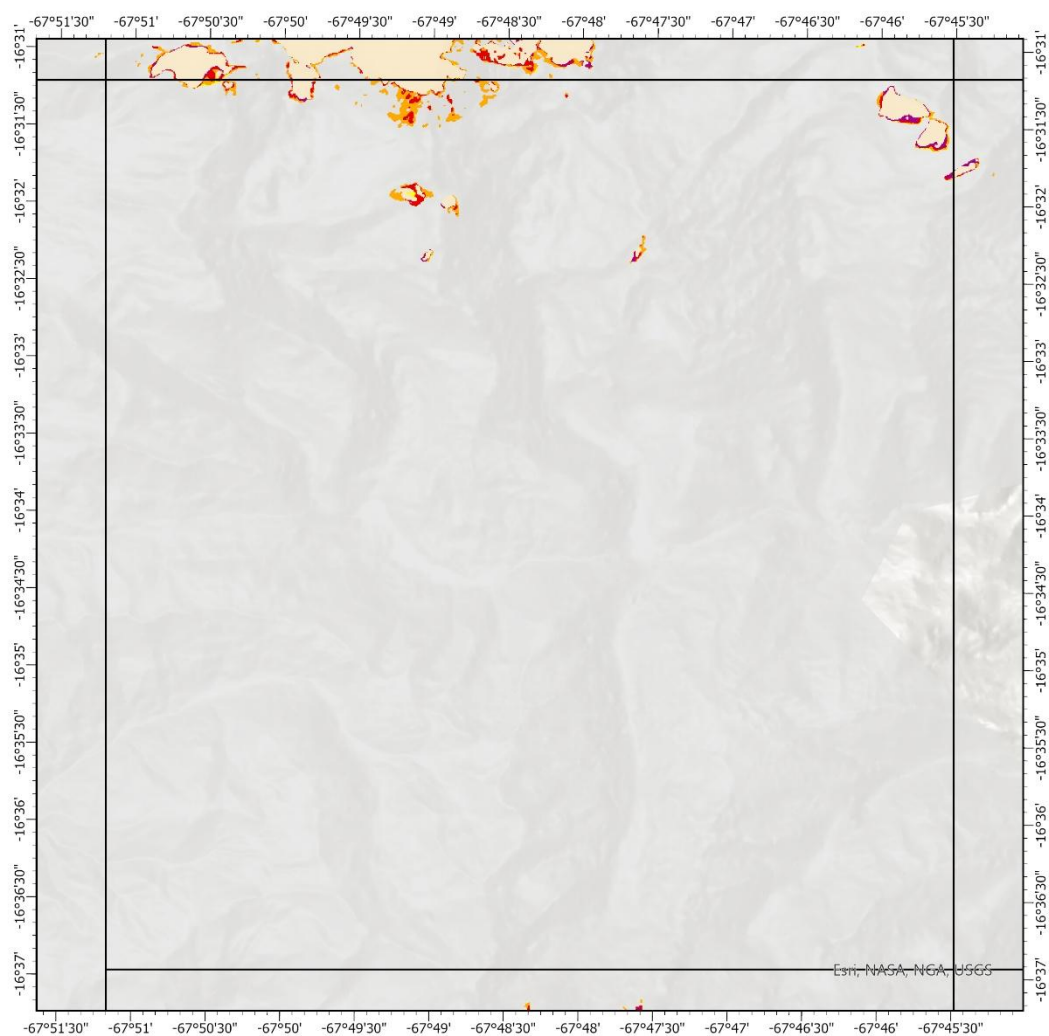
Table des matières

Remerciements	1
CRedit	2
Usage de l'intelligence artificielle	2
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux	7
Acronymes et abréviations	8
Introduction	9
1. État de l'art.....	10
1. Le suivi des glaciers au niveau global	10
2. Caractéristiques des glaciers tropicaux.....	11
3. Monitoring des glaciers par télédétection.....	14
3.1. Télédétection : définition.....	14
3.2. Satellites optiques pour le suivi des glaciers	14
3.3. Avantages et inconvénients de la télédétection pour le suivi des glaciers...15	
3.4. Sentinel-2.....	16
3.5. Études de la Cordillera Real	17
4. Classification et méthodes	18
4.1. La méthode de classification manuelle.....	18
4.2. La méthode de classification semi-automatique.....	19
4.3. Exemple d'étude réalisé par classification semi-automatique sur la cordillère des Andes.....	21
4.4. La méthode de classification automatique.....	22
5. Métrique de validation.....	24
2. Objectifs	25
3. Zone d'étude.....	26
4. Sources de données et méthodologie.....	28
4.1. Sources de données pour la délimitation des glaciers de la Cordillera Real ...28	
4.1.1. Données GLIMS.....	28
4.1.2. Projet CCI Land Cover	30
4.1.3. Méthodologie de cartographie des glaciers tropicaux andins par Turpo Cayo et al., (2022)	31
4.2. Méthodologie de cartographie des glaciers à partir des données Sentinel-2 ...33	
4.2.1. Données	34

4.2.2.	Prétraitement.....	36
4.2.3.	Post-traitement : classifications et série temporelle	39
4.2.4.	Évaluation d'exactitude et validation des classifications finales.....	43
4.2.5.	Évaluation de l'exactitude	44
5.	Résultats et discussion.....	47
5.1.	Comparaison entre les différents masques	47
5.2.	Résultats des traitements : classifications.....	50
5.2.1.	Comparaison classification par seuil et Random Forest.....	50
5.2.2.	Résultats de la classification Random Forest	51
5.2.3.	Analyse des classifications Random Forest	52
5.3.	Classification après post-traitement.....	56
5.3.1.	Analyse de la série temporelle.....	56
5.3.2.	Analyse de la classification en fonction des différentes trajectoires des pixels sur une période de sept ans	57
5.3.3.	Évaluation de l'exactitude des changements	59
5.3.4.	Estimation de la superficie des changements	60
5.4.	Synthèse et comparaison des résultats de trois études aux méthodologies différentes	63
5.4.1.	Comparaison sur la période 2000-2016.....	64
5.4.2.	Comparaison Turpo Cayo et al. (2022), CCI_CR et surface estimée.....	66
5.5.	Discussion.....	67
6.	Conclusion et perspectives	70
	Références bibliographiques.....	71
7.	Annexes	85
7.1.	Séries temporelles.....	85
7.2.	Résultats de l'évaluation de la précision et exactitude	110

7. Annexes

7.1. Séries temporelles



Détection des changements

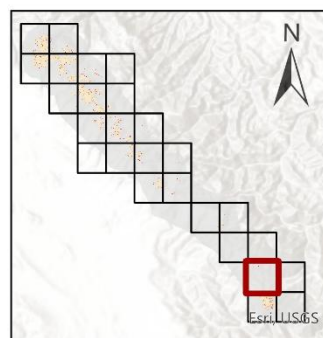


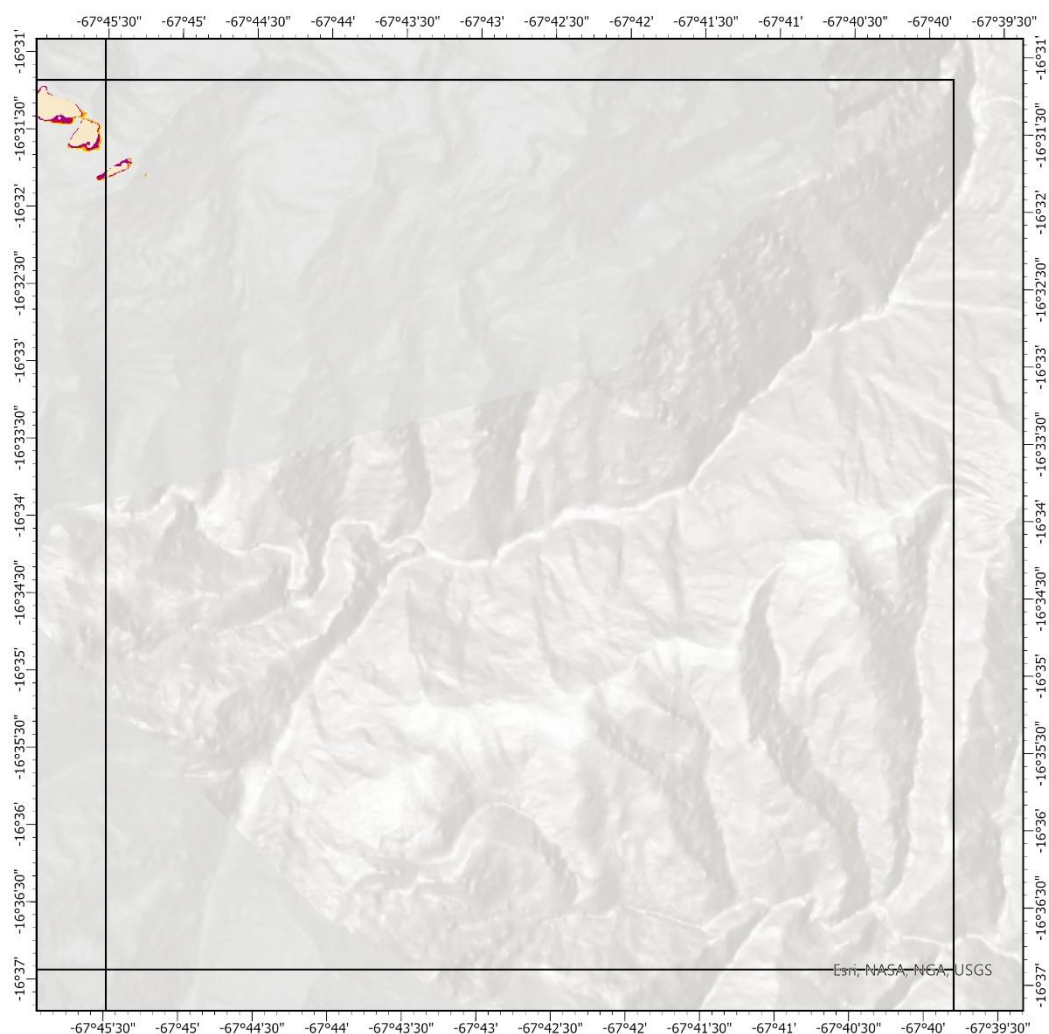
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

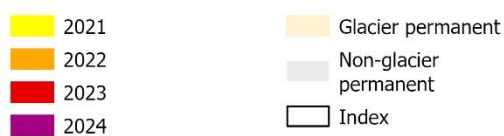
Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude



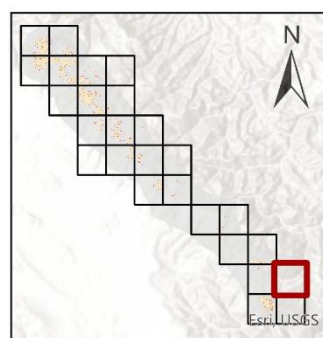


Détection des changements



Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de
 la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

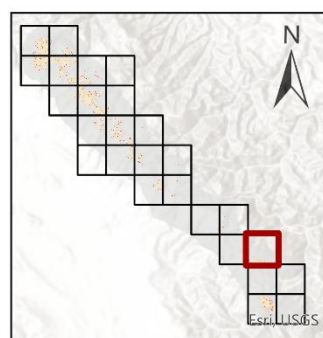


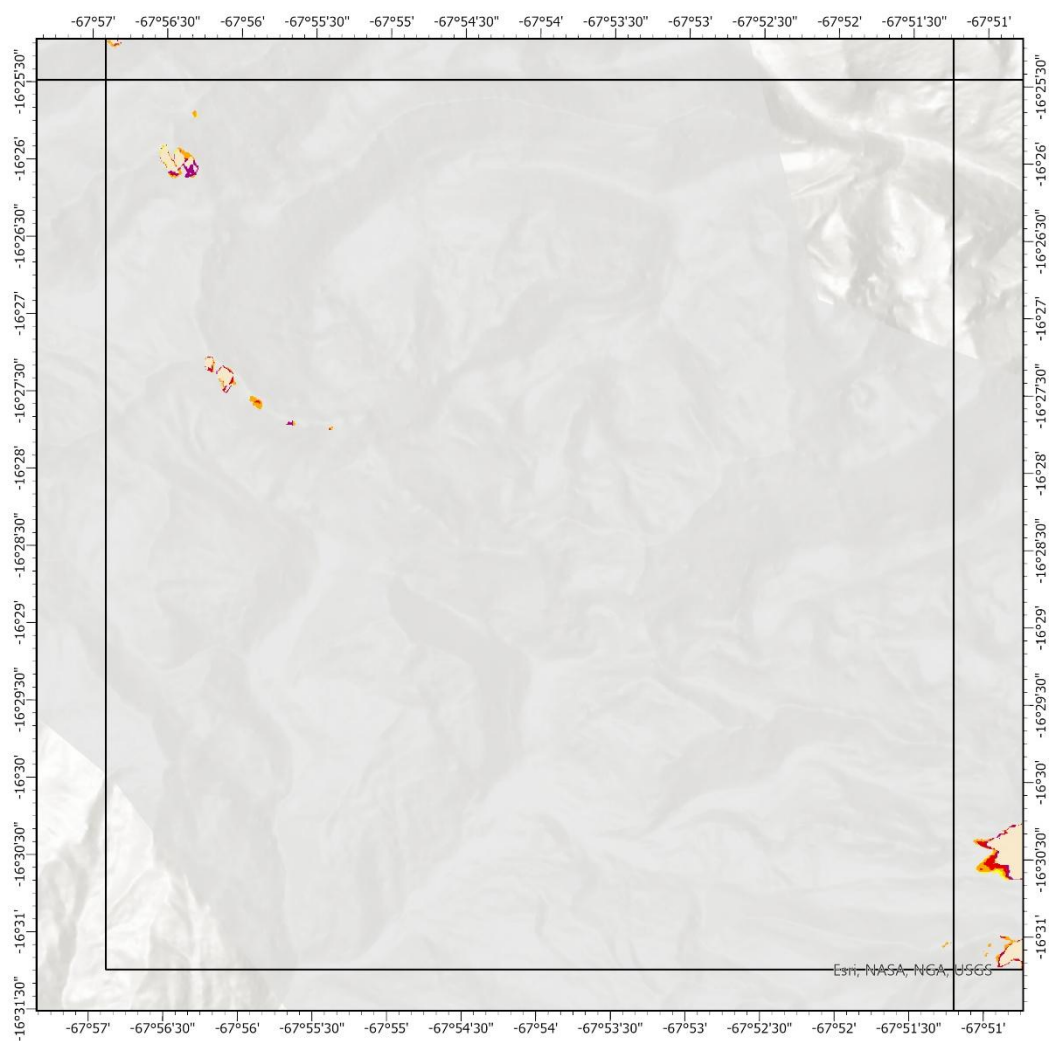
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





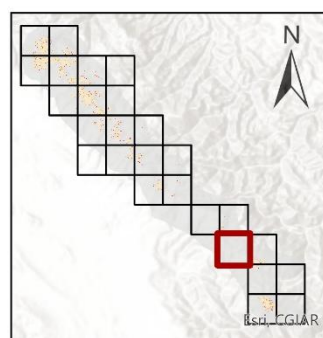
Détection des changements

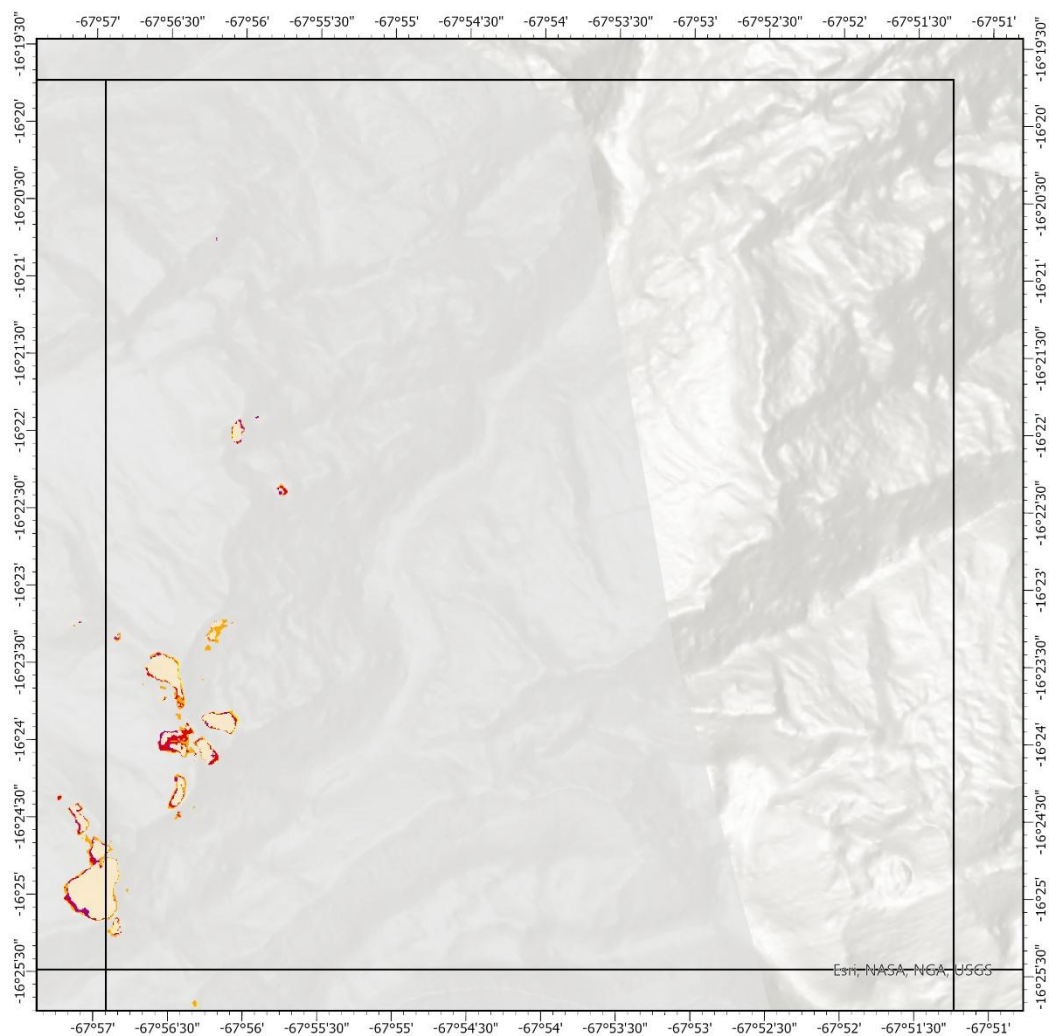
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

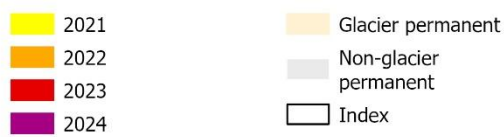
Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude



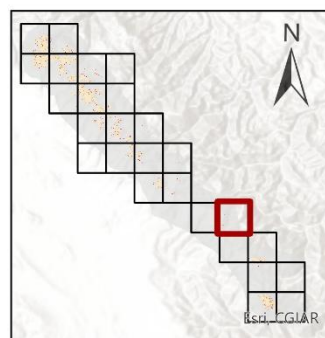


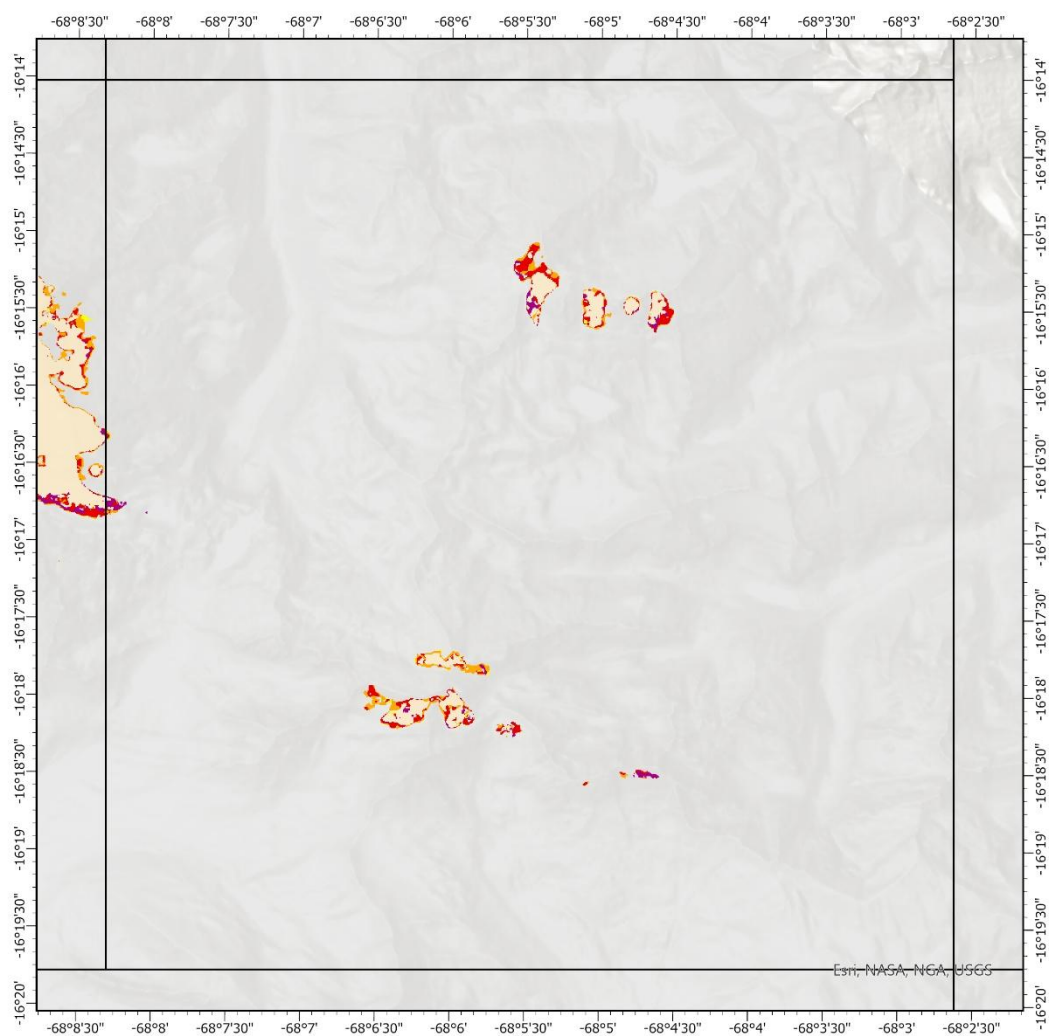
Détection des changements



Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

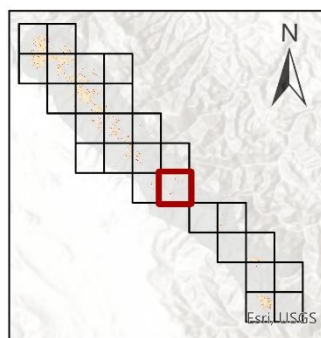


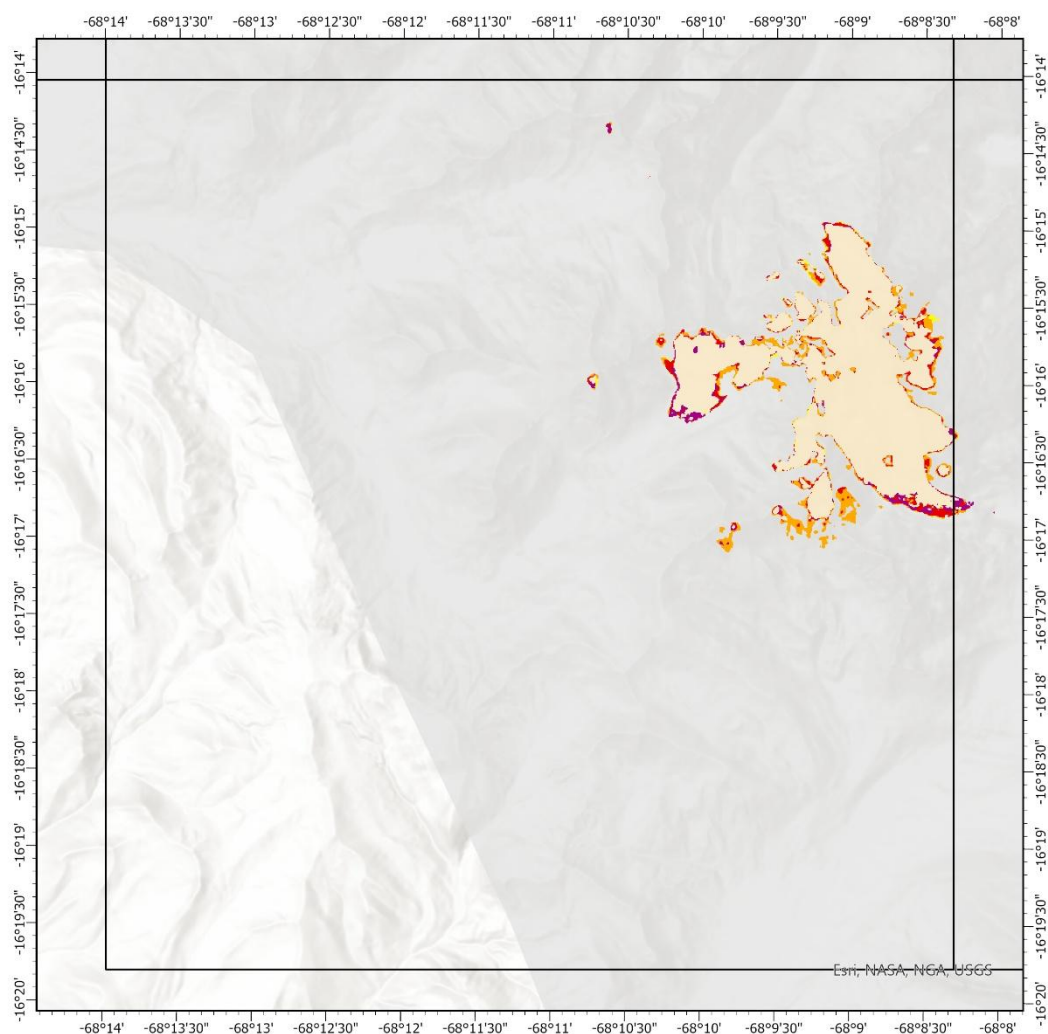
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

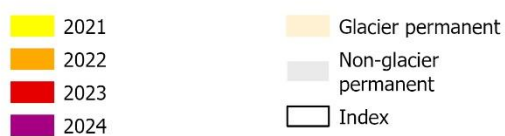
Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude



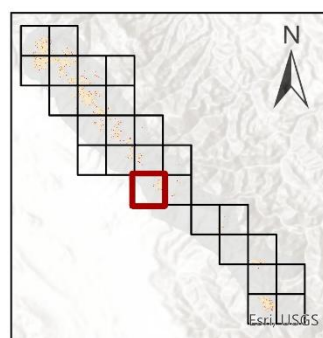


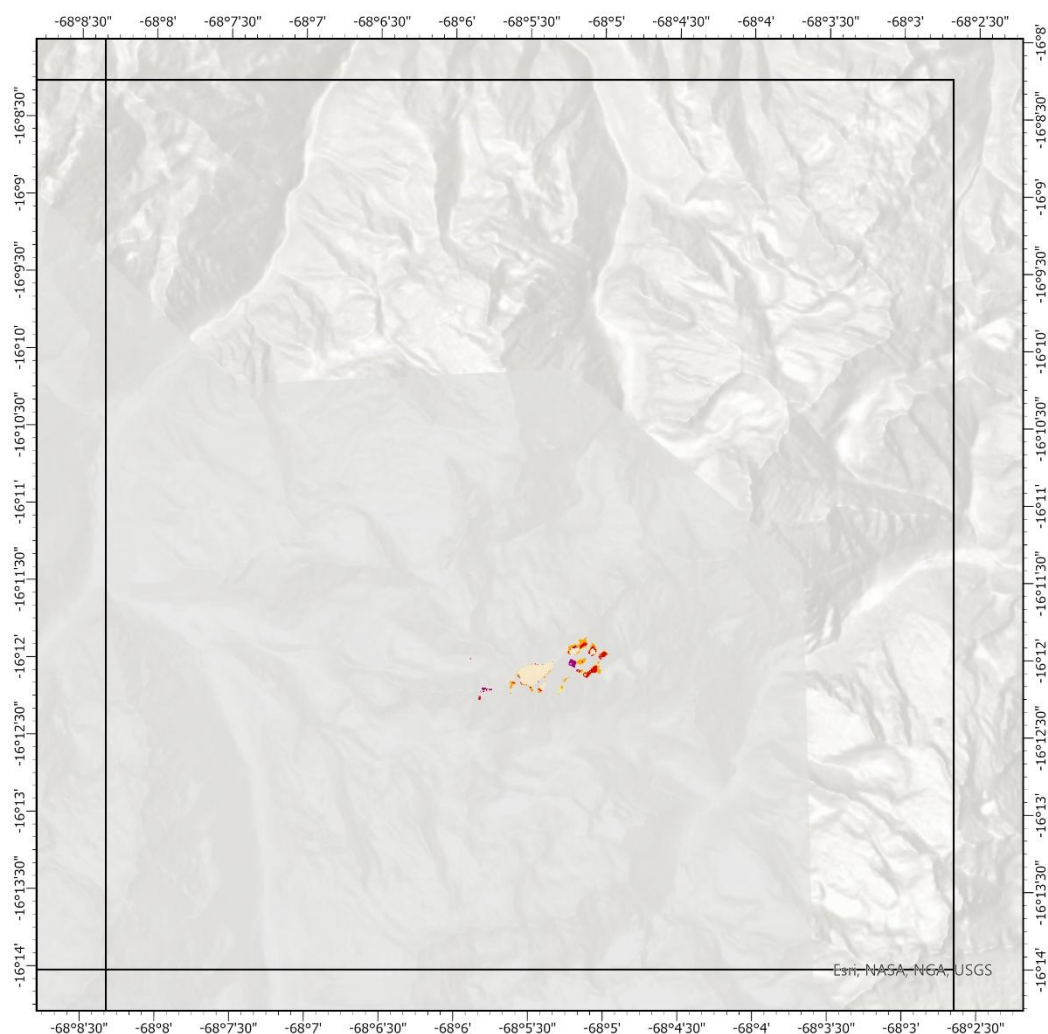
Détection des changements



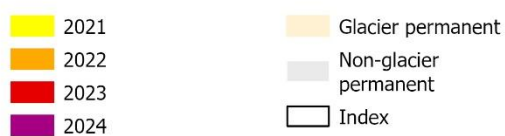
Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de
 la Cordillera Real sur la période d'étude



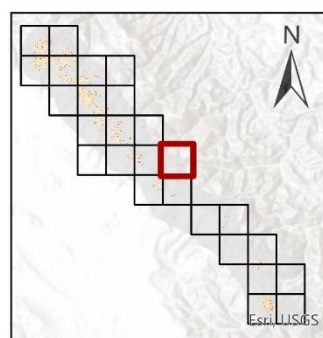


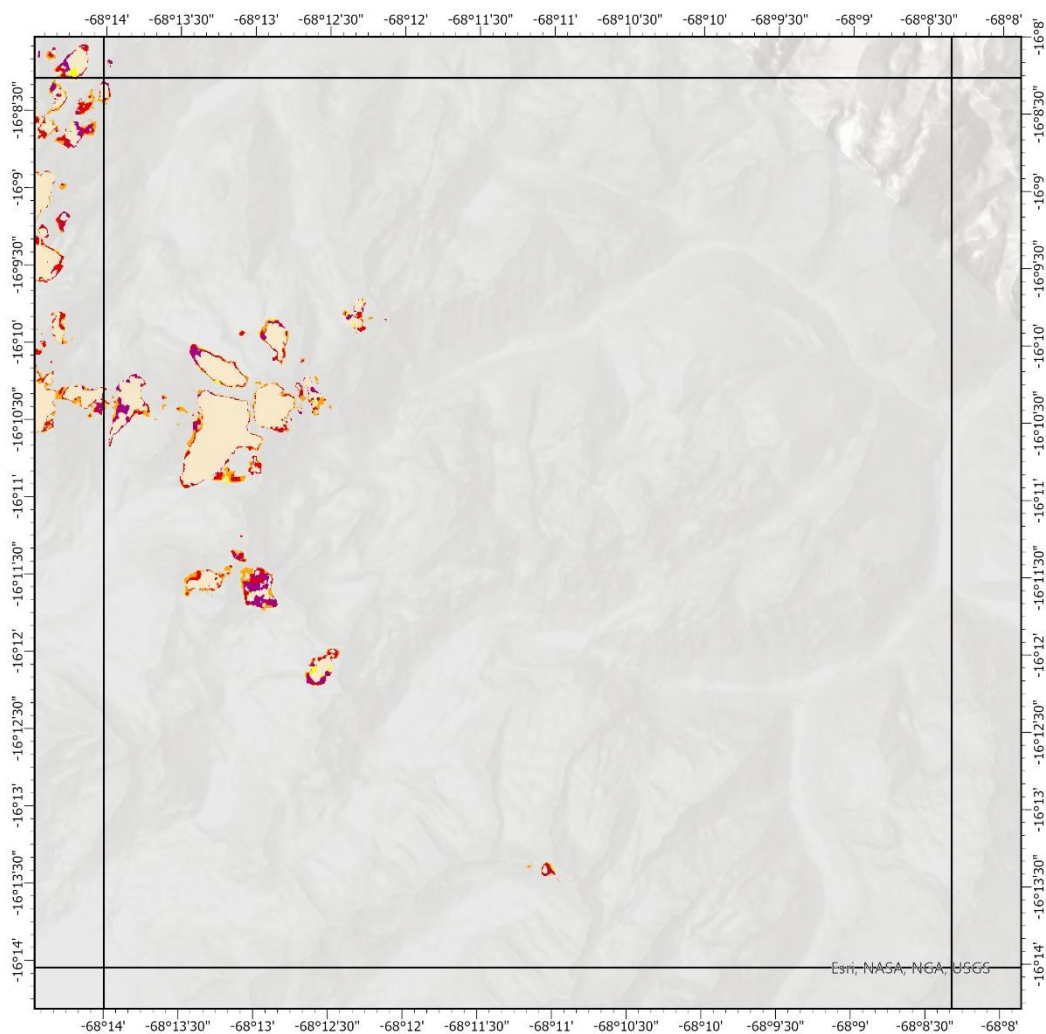
Détection des changements



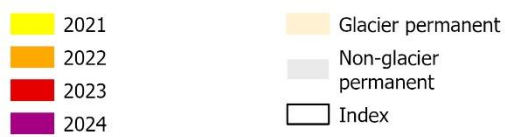
Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de
 la Cordillera Real sur la période d'étude



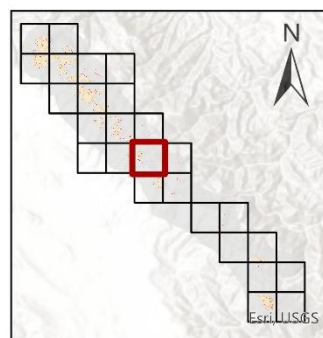


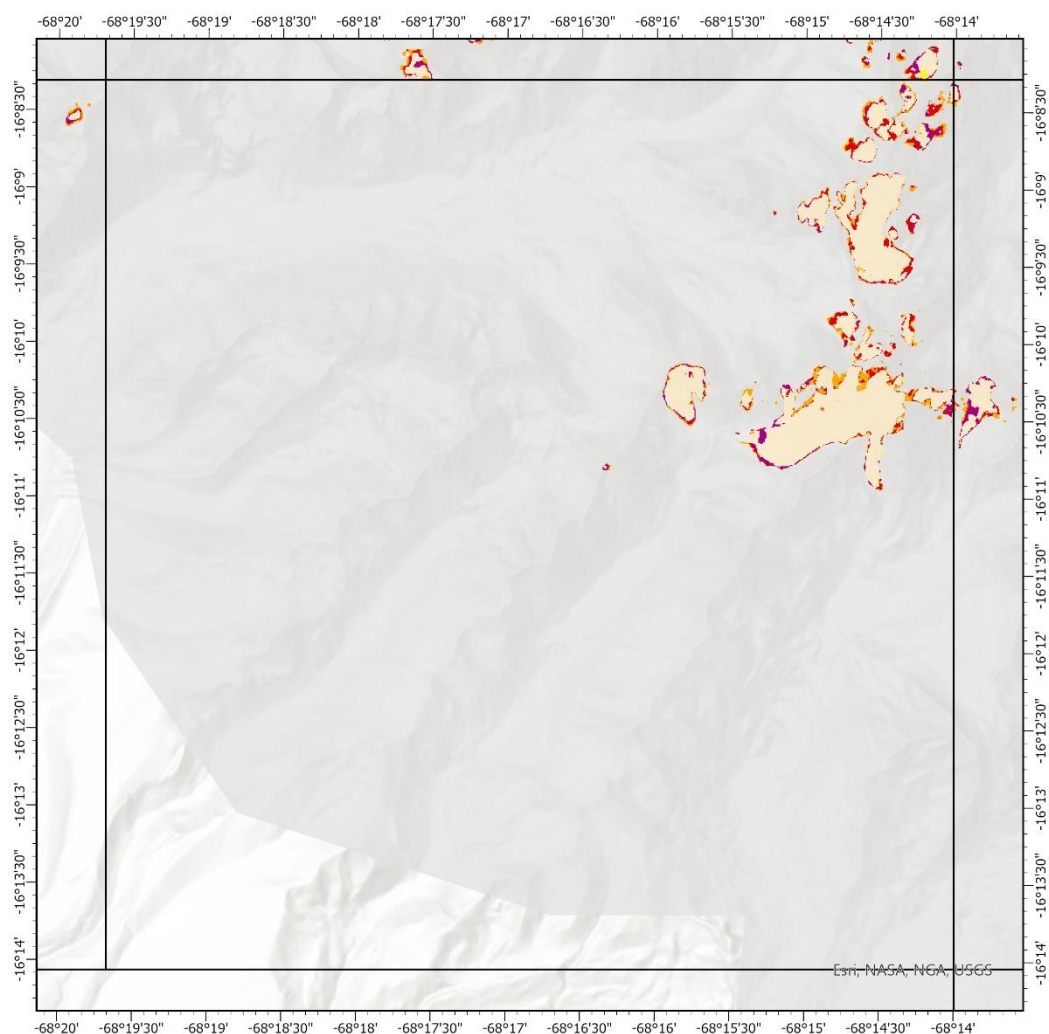
Détection des changements



Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

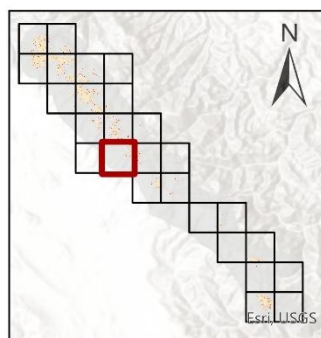


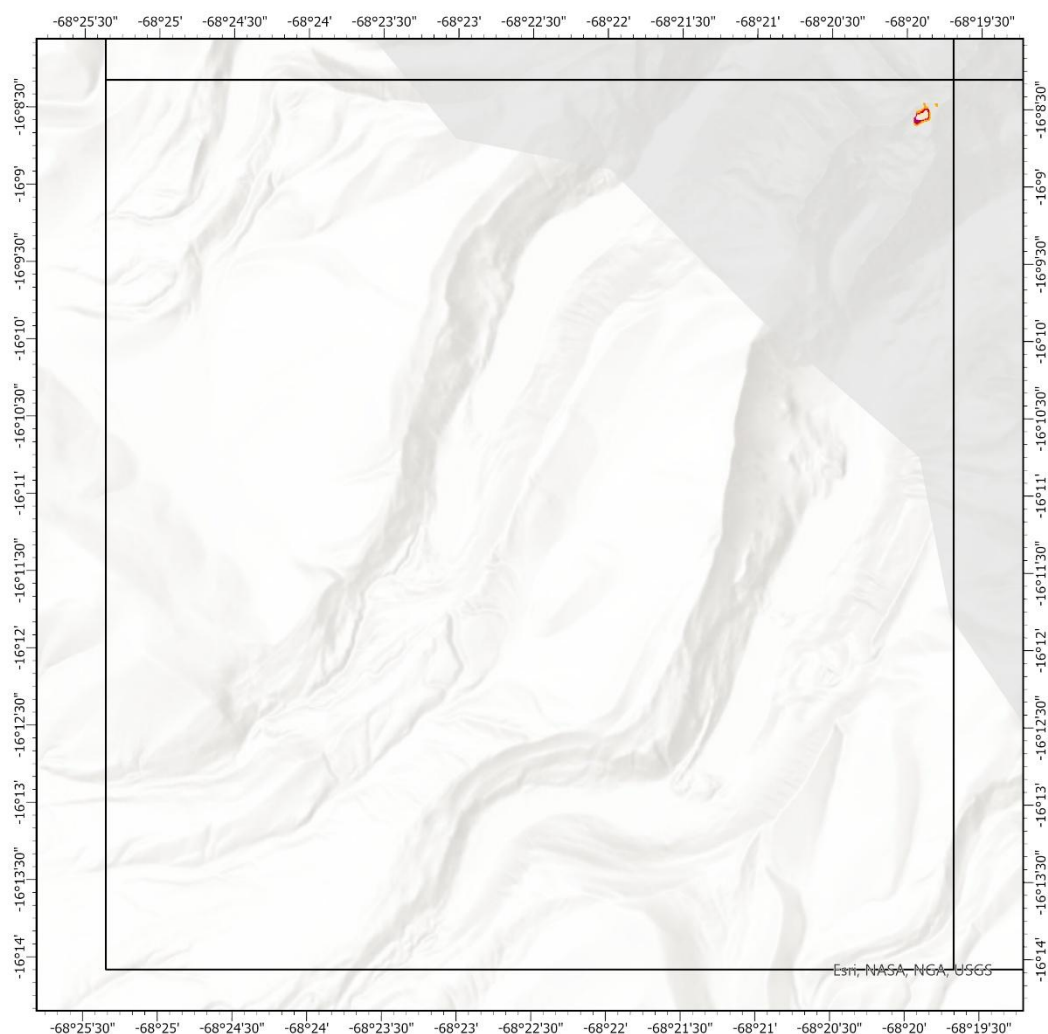
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

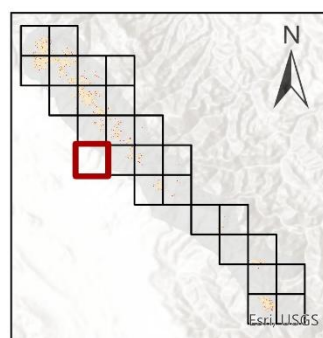


2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

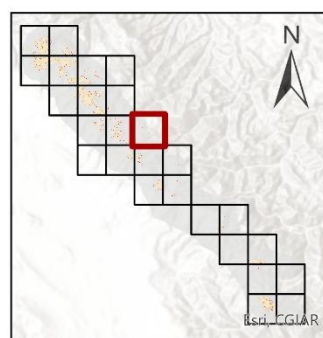


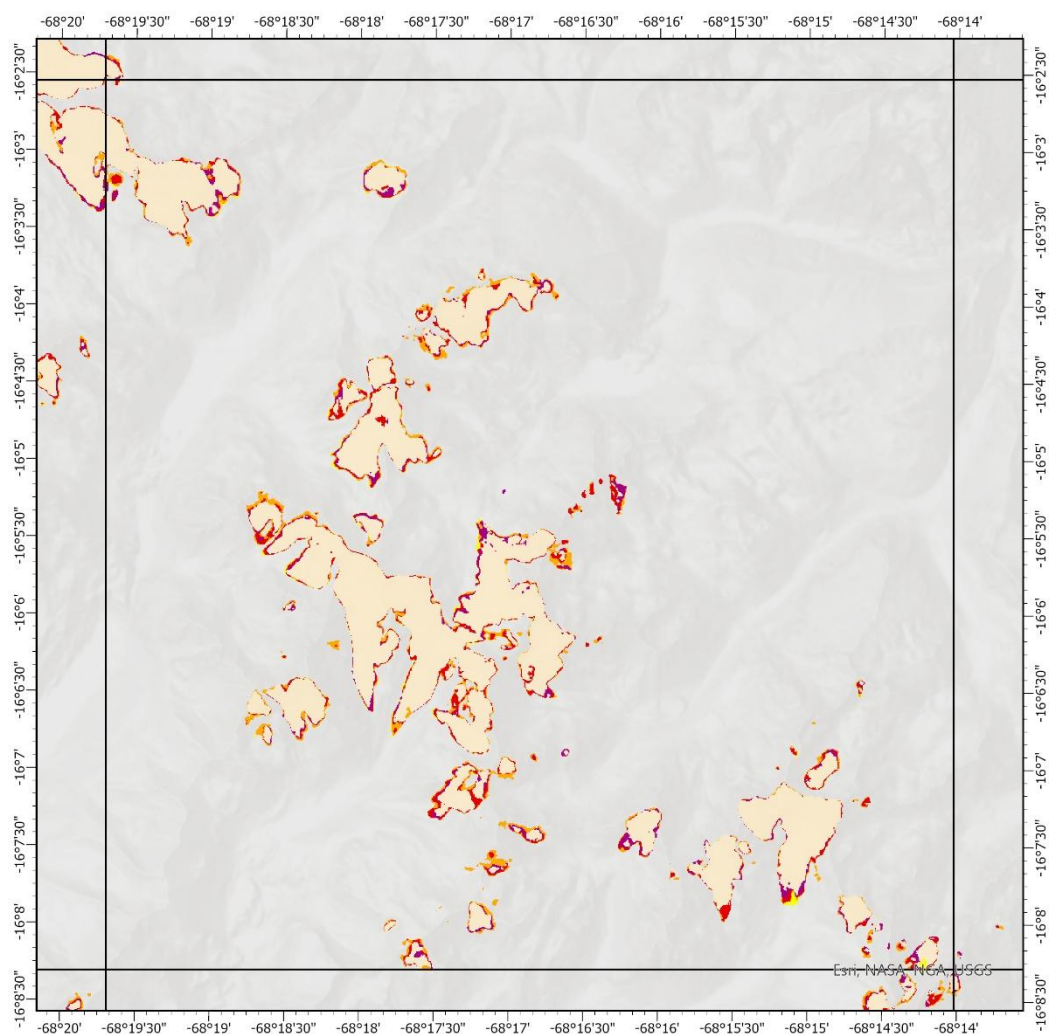
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

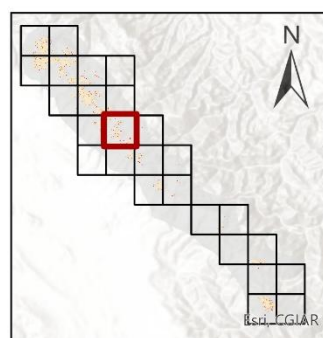


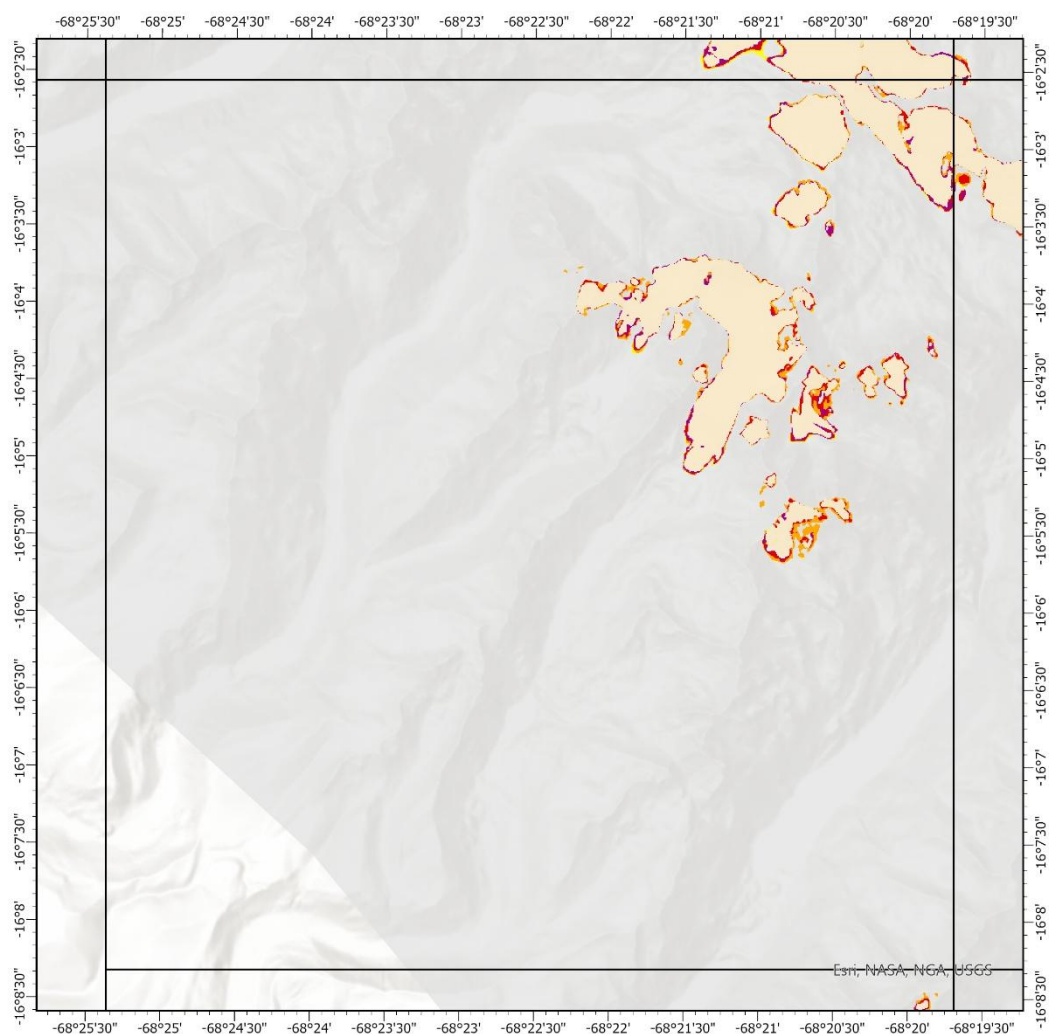
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

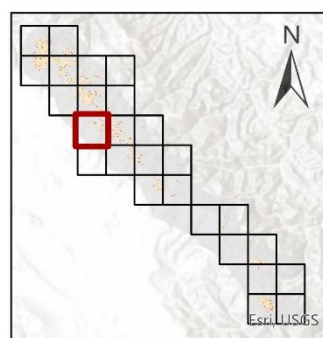


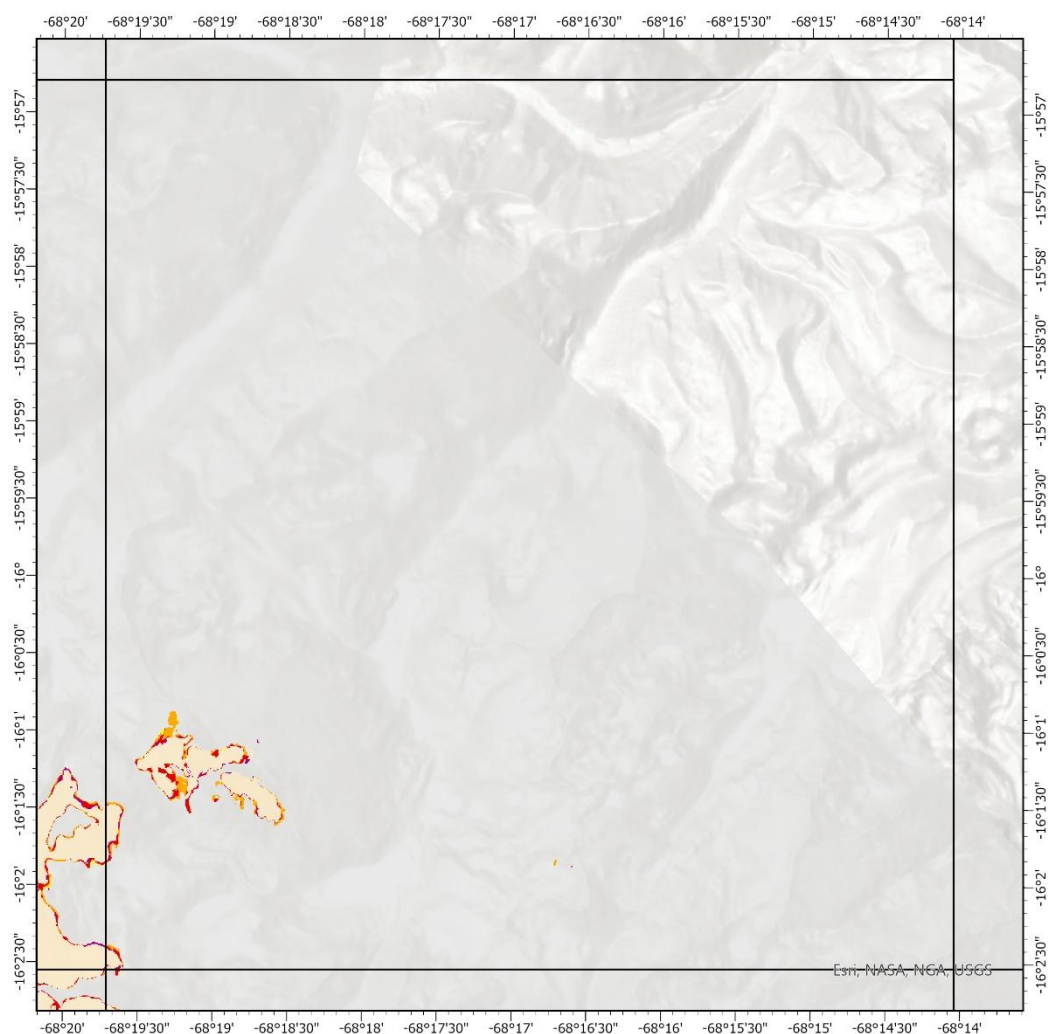
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

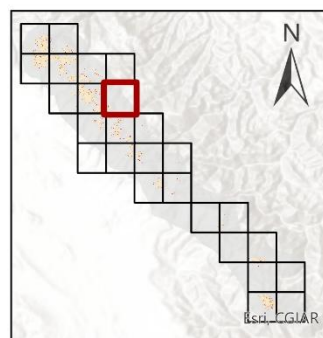


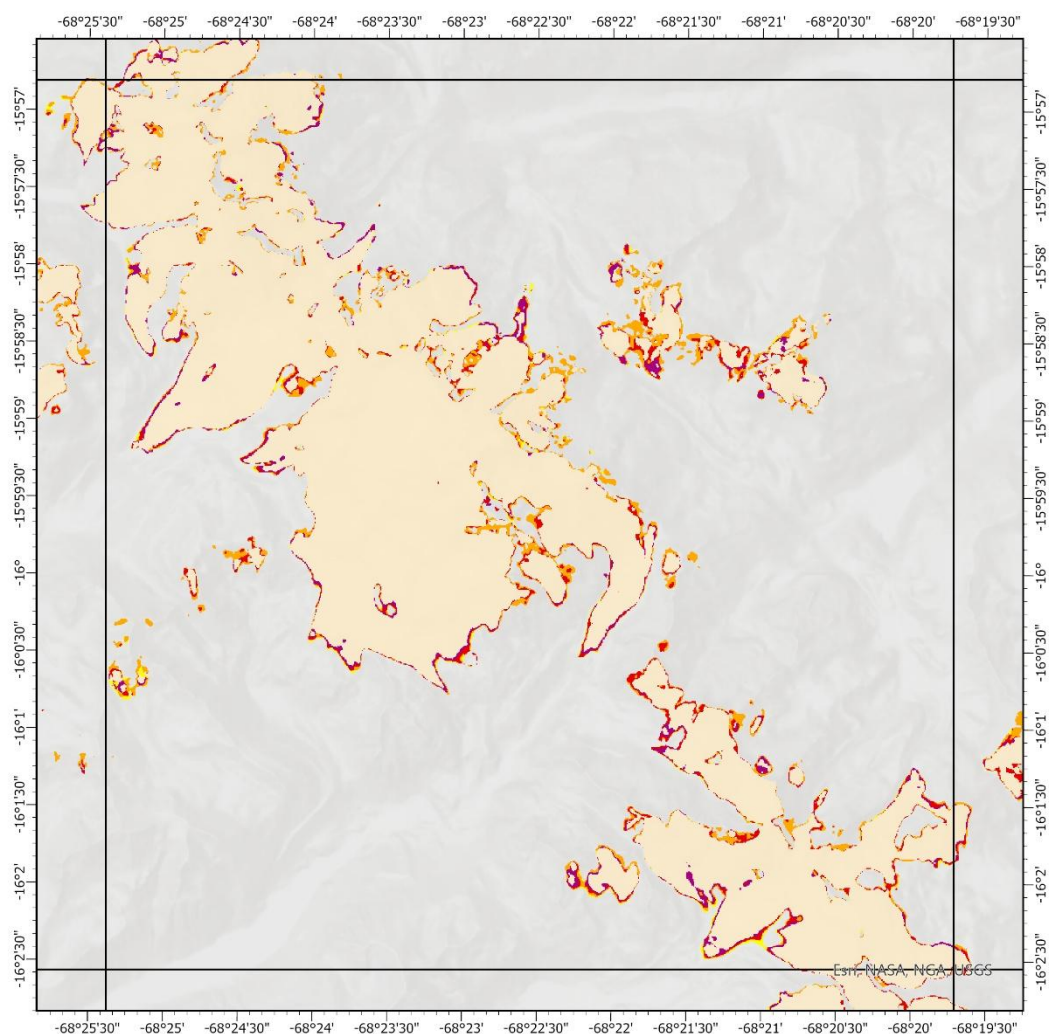
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

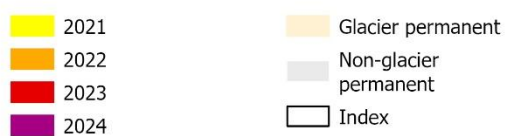
Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude



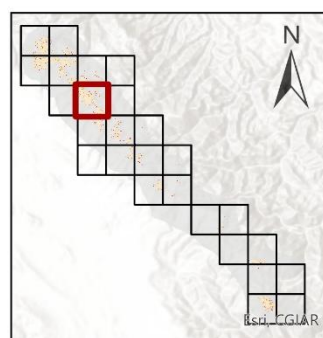


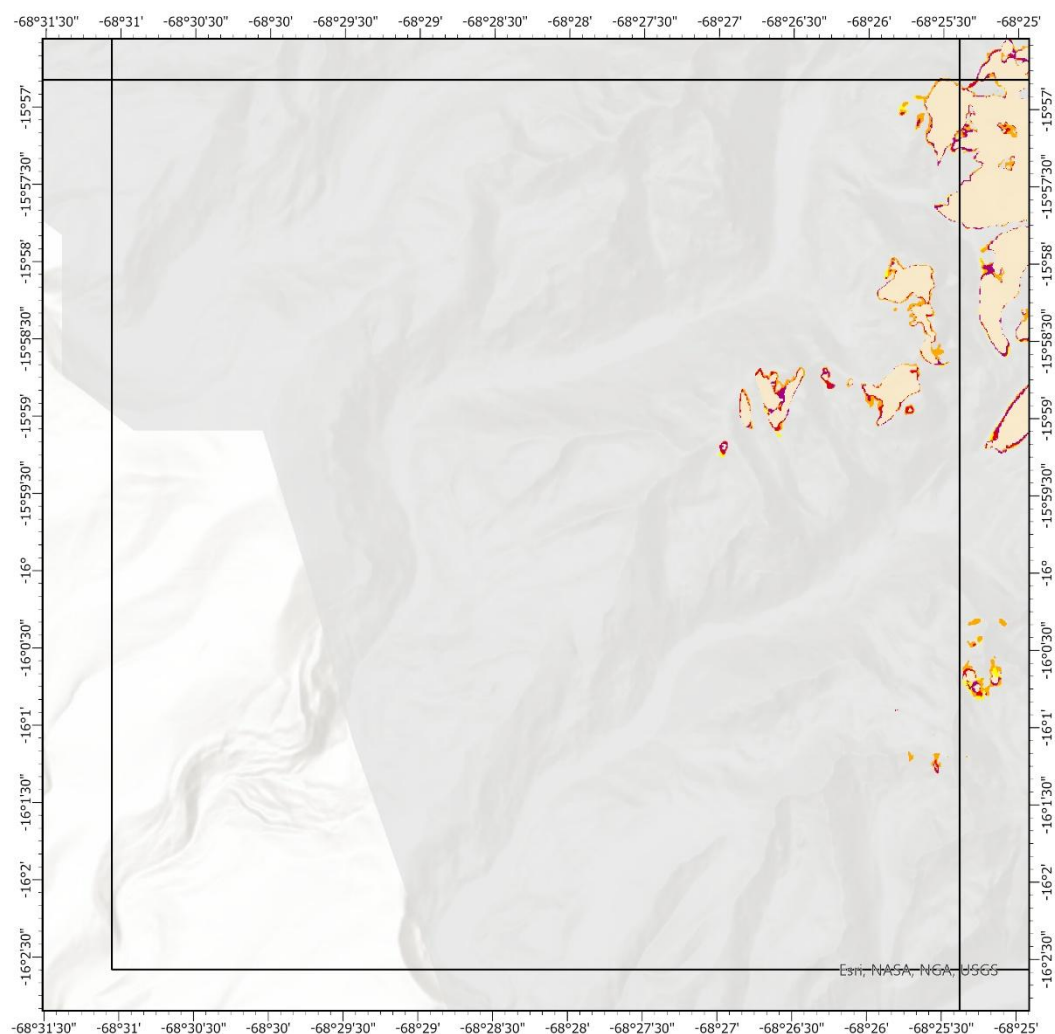
Détection des changements



Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de
 la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

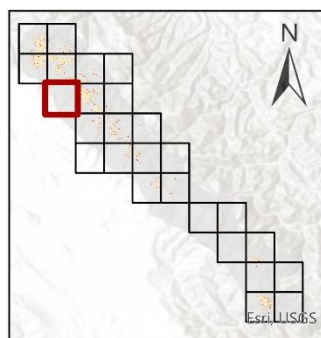


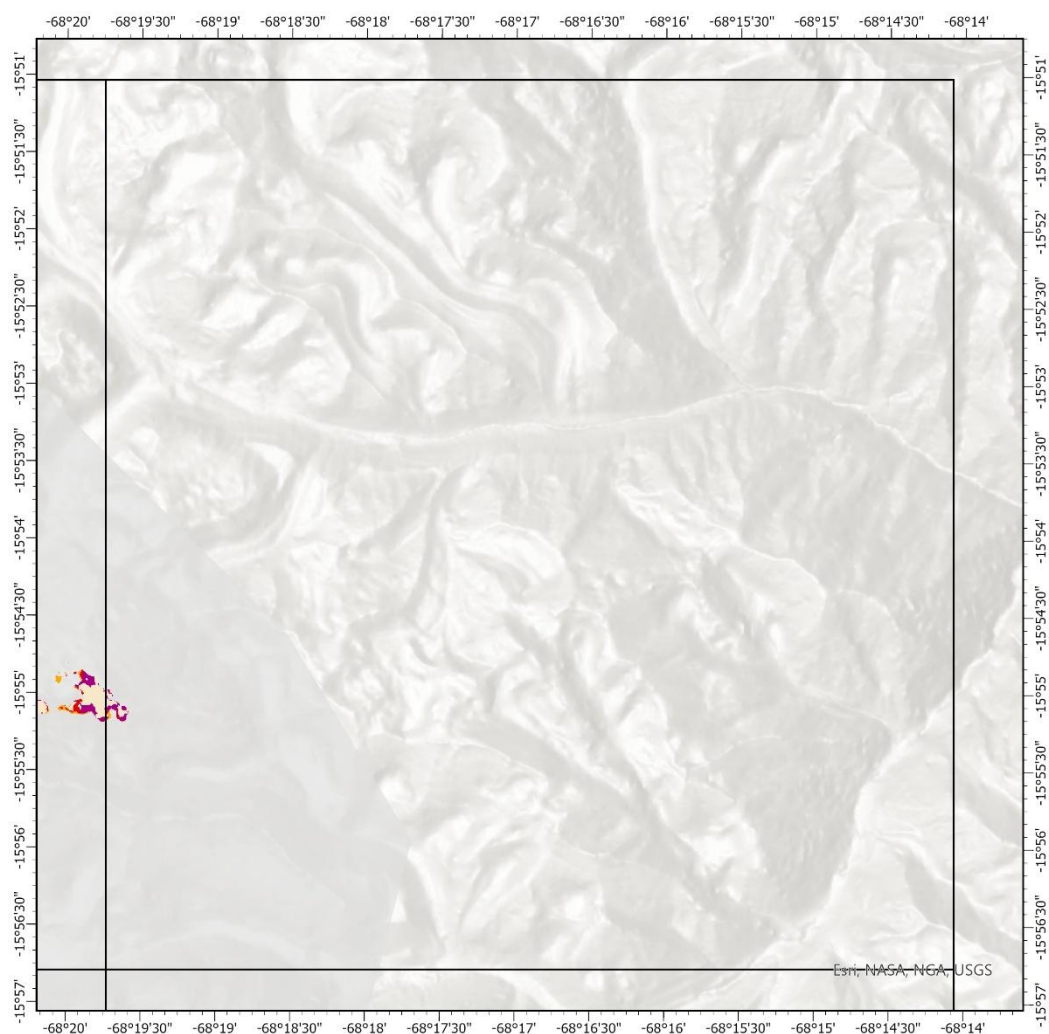
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

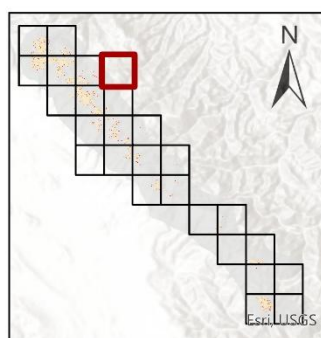


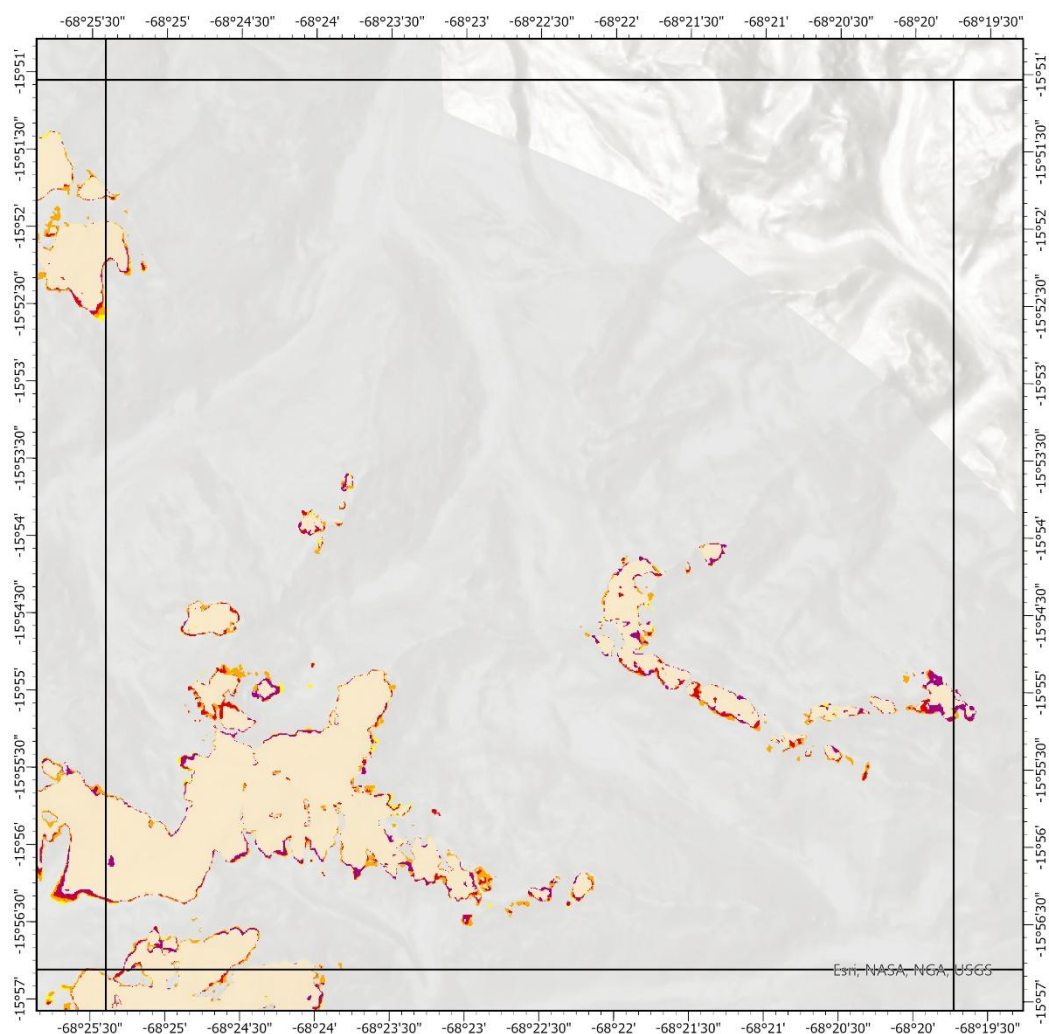
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

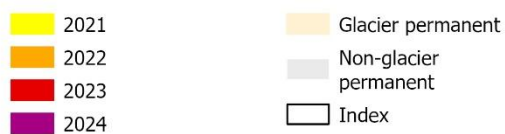
Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude



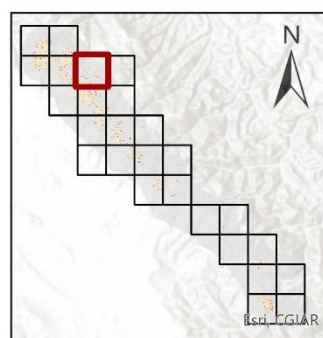


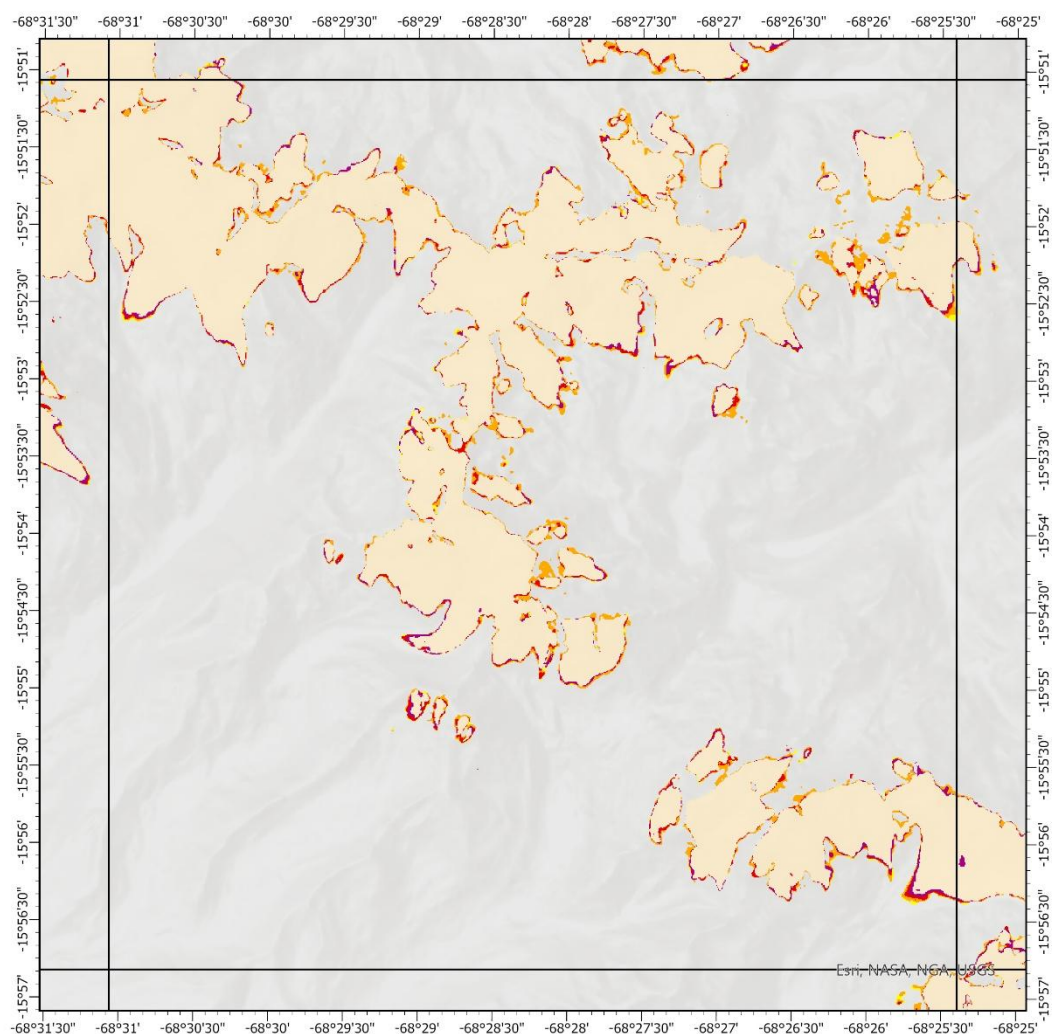
Détection des changements



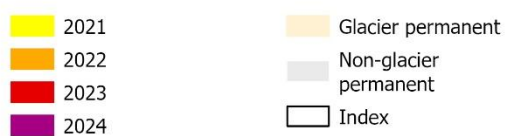
Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude



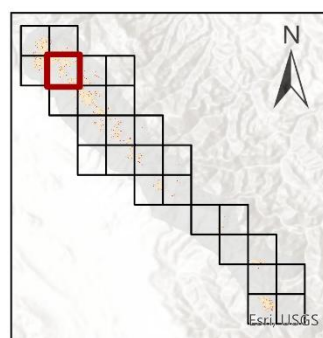


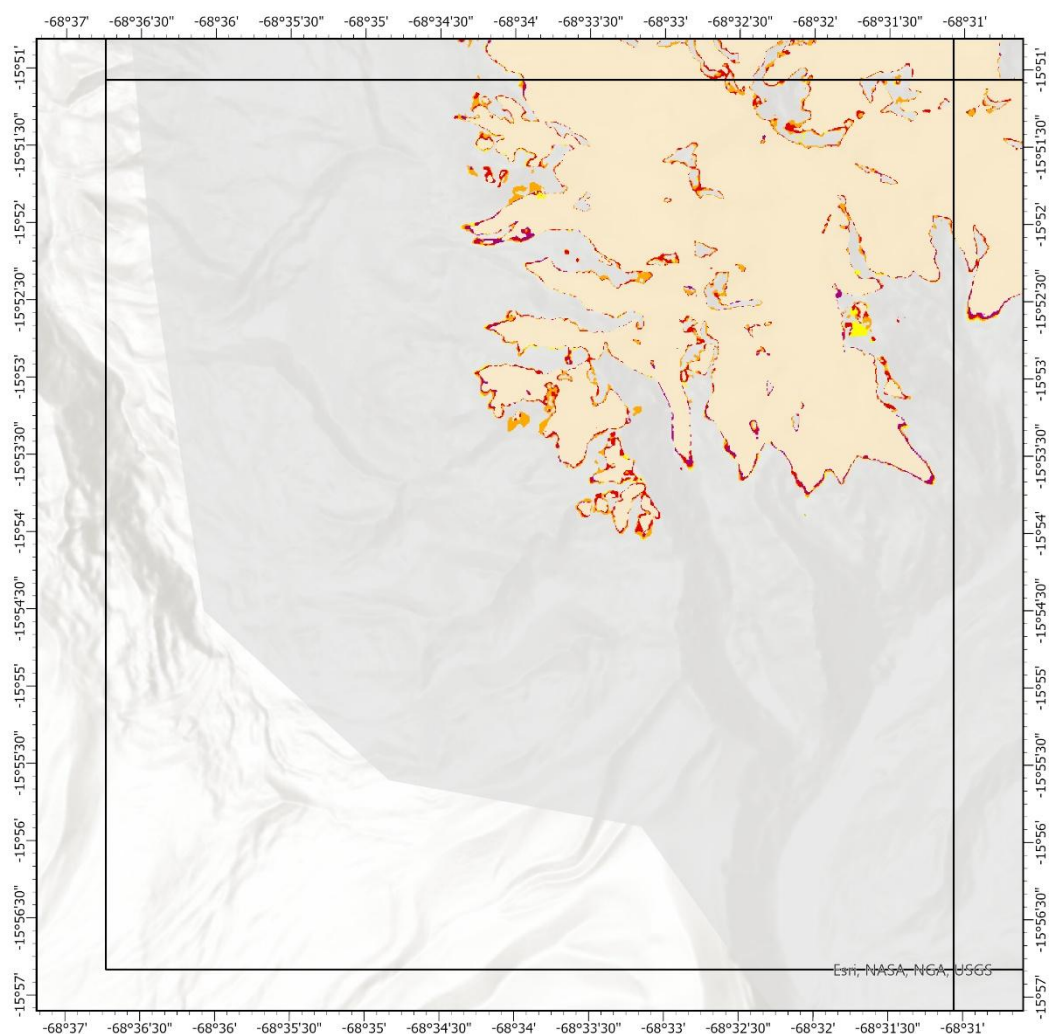
Détection des changements



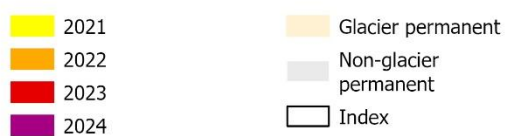
Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude



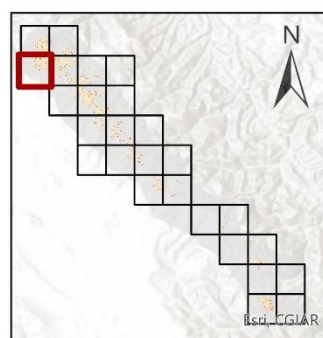


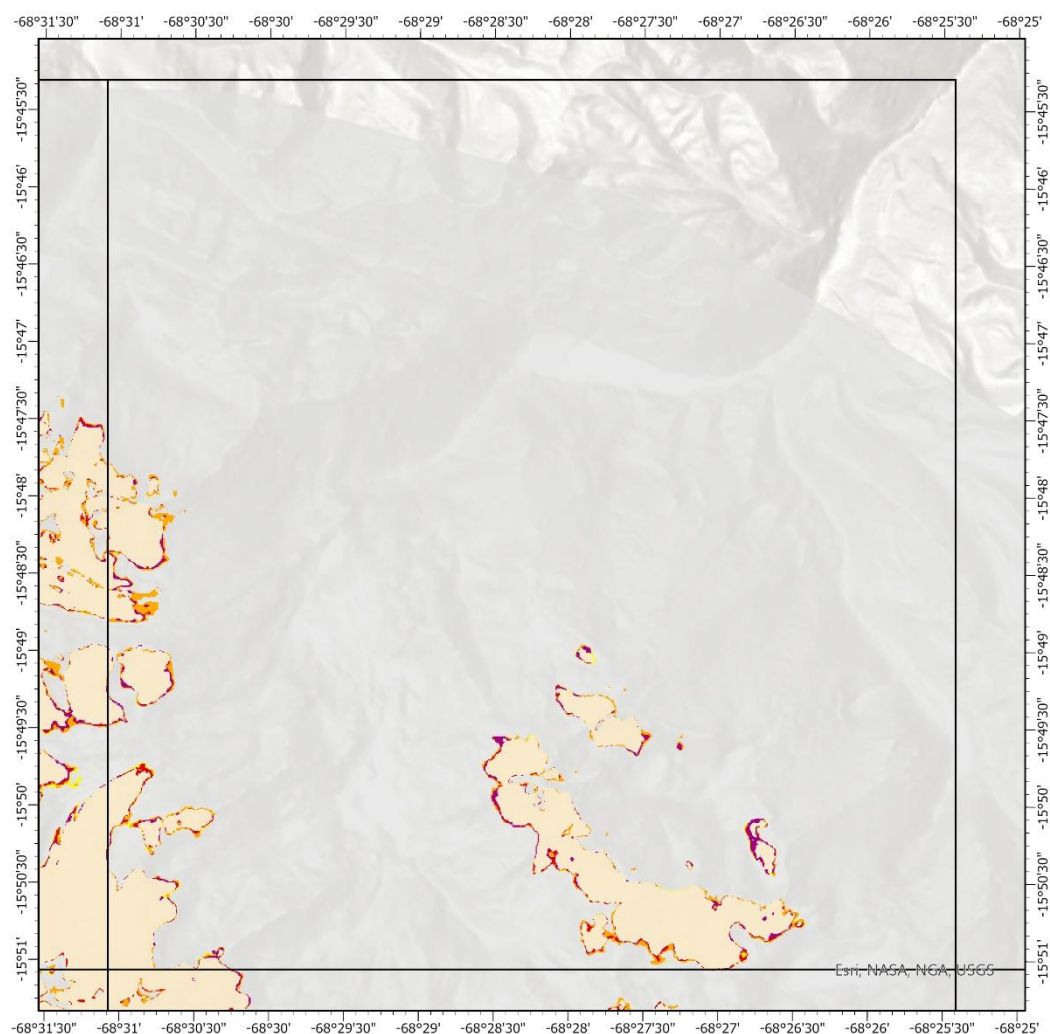
Détection des changements



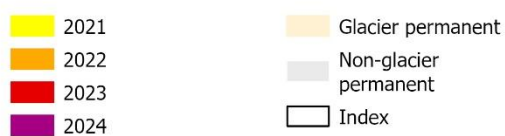
Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de
 la Cordillera Real sur la période d'étude



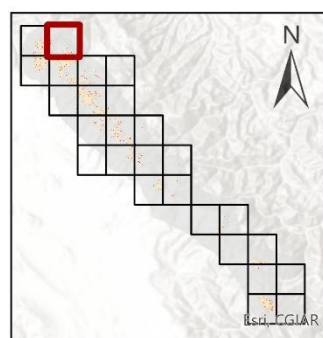


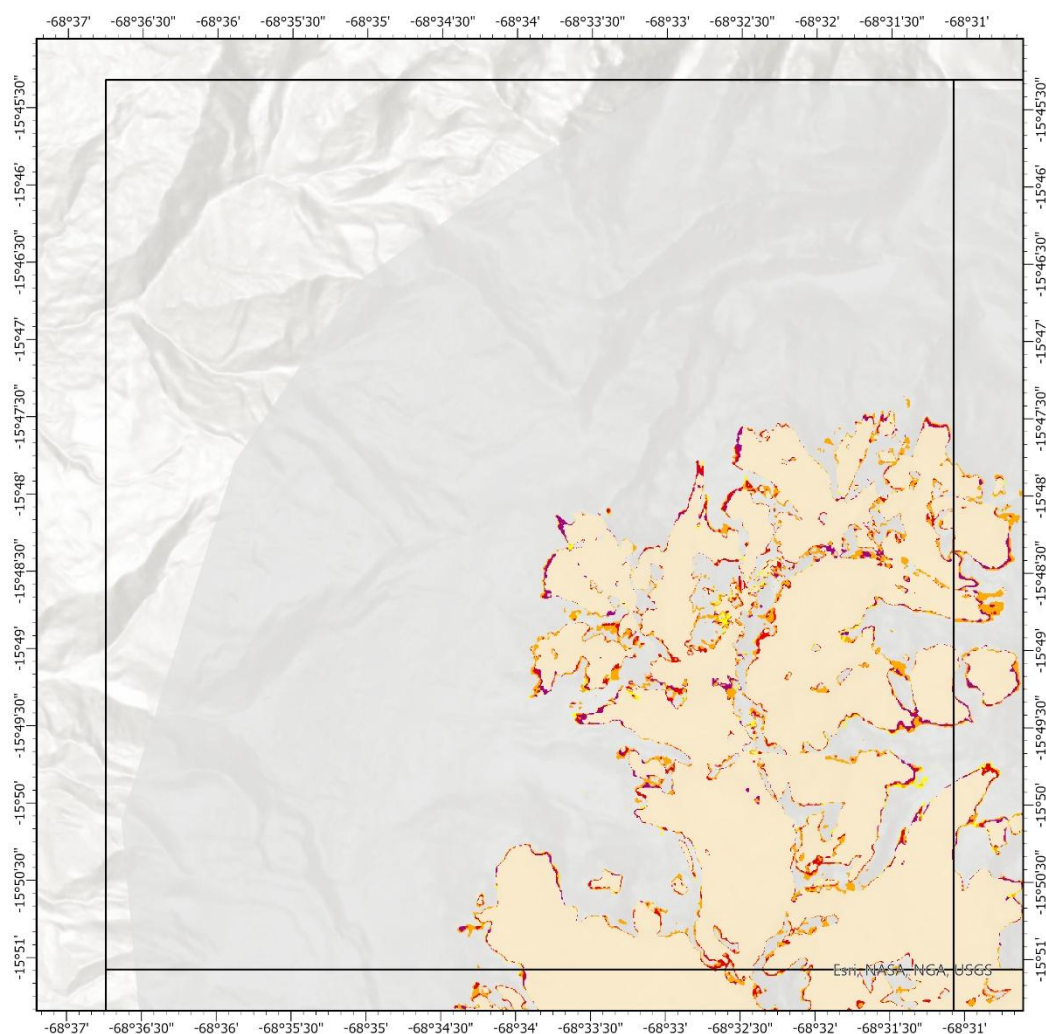
Détection des changements



Spatial Reference
 Name: MARGEN UTM Zone 19S
 Datum: Marco Geodesico Nacional
 Projection: Transverse Mercator
 Map Units: Meter
 Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

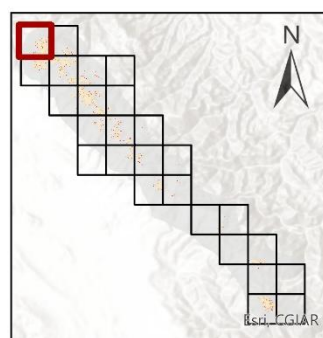


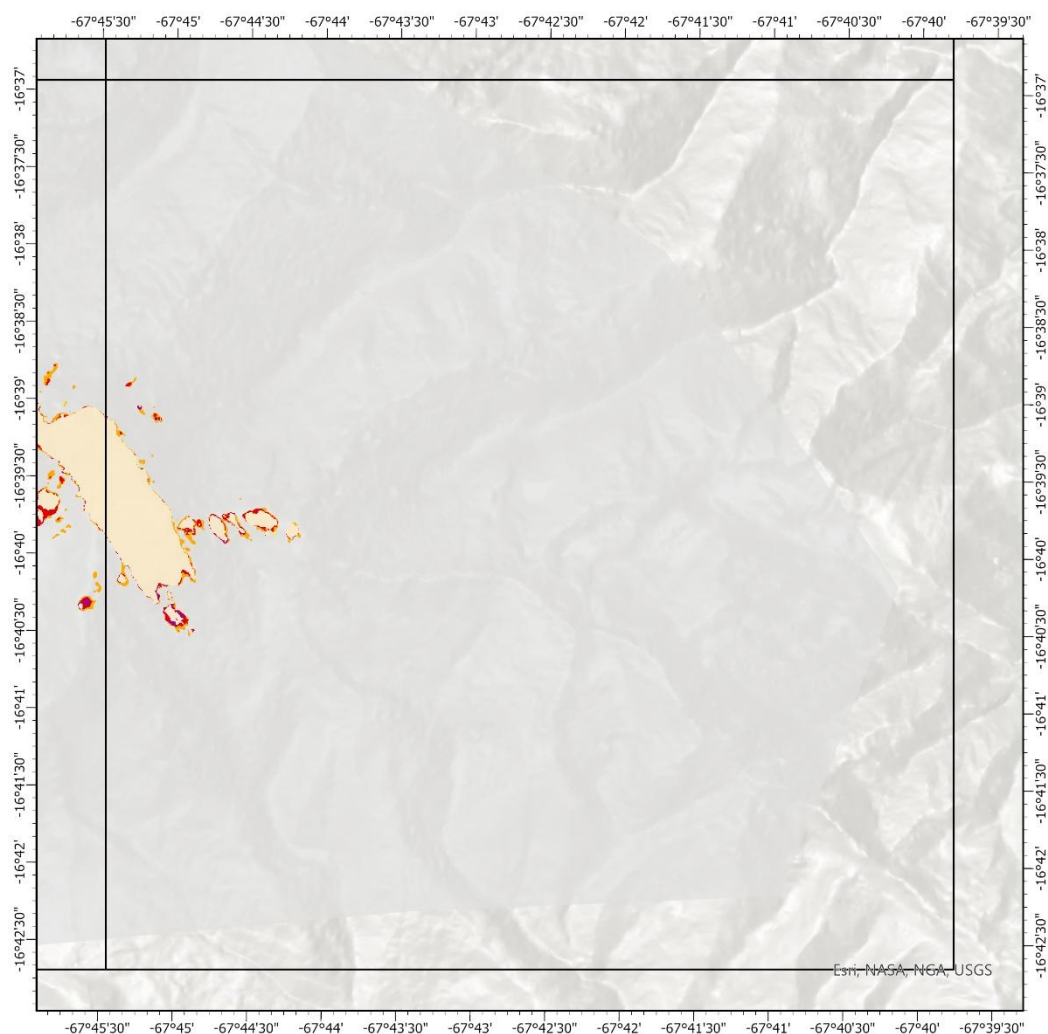
2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude





Détection des changements

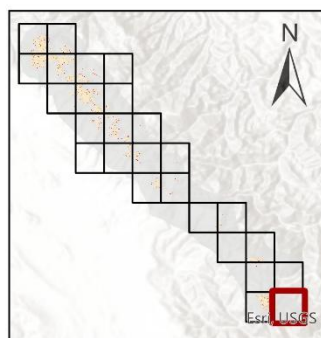


2021
2022
2023
2024

Glacier permanent
Non-glacier permanent
Index

Spatial Reference
Name: MARGEN UTM Zone 19S
Datum: Marco Geodesico Nacional
Projection: Transverse Mercator
Map Units: Meter
Scale: 1:800,000

Data source: Détection des changements de la Cordillera Real sur la période d'étude



7.2. Résultats de l'évaluation de la précision et exactitude

Tableau 7. Surface estimée pour la strate Non-glacier

Année	Surface total (km ²)	Surface Non-glacier (km ²)	Surface estimé Non-glacier (km ²)	SE non-glacier (km ²)	IC95_min Non-glacier (km ²)	IC95_max Non-glacier (km ²)	CV Non-glacier
2019	139,443	63,385	41,935	1,238	39,509	44,361	0,0295
2020	139,443	63,385	58,757	1,262	56,284	61,231	0,0215
2021	139,443	64,429	61,199	1,078	59,087	63,3116	0,0176
2022	139,443	75,8772	71,352	1,131	69,136	73,569	0,0158
2023	139,443	82,9675	72,683	1,298	70,140	75,228	0,0178
2024	139,443	86,9162	87,782	1,052	85,720	89,844	0,0120
2025	139,443	86,9162	74,707	1,232	72,293	77,123	0,0165

Tableau 8. Surface estimée pour la strate Glacier

Année	Surface total (km ²)	Surface Glacier (km ²)	Surface estimé Glacier (km ²)	SE Glacier (km ²)	IC95_min Glacier (km ²)	IC95_max Glacier (km ²)	CV Glacier
2019	139,443	97,508	1,238	95,0823	99,935	0,0127	97,509
2020	139,443	80,686	1,262	78,212	83,159	0,0156	80,686
2021	139,443	78,244	1,0777	76,132	80,357	0,0138	78,244
2022	139,443	68,091	1,131	65,874	70,307	0,0166	68,091
2023	139,443	66,760	1,298	64,215	69,304	0,0194	66,760
2024	139,443	51,661	1,0519	49,600	53,723	0,0204	51,661
2025	139,443	64,736	1,2323	62,320	67,151	0,01904	64,736

Tableau 9. Variations de la surface estimée pour la strate Glacier

Année	Delta Surface Glacier (km ²)	SE Delta Surface Glacier (km ²)	Incertitude (km ²) ($\pm 1,96 \cdot \Delta SE$)
2019			
2020	-16,823	1,768	3,465
2021	-2,441	1,659	3,253
2022	-10,154	1,562	3,061
2023	-1,331	1,721	3,374
2024	-15,098	1,671	3,274
2025	13,074	1,620	3,175