
Compartimentação do Relevo do Uruguai com Uso de Geomorphons Obtidos em Classificação Automática

Landforms Compartmentalization in Uruguay with Use of Geomorphons Obtained in Automated Classification

Subdivisión del Relieve de Uruguay utilizando Geomorfones Obtenidos en Clasificación Automática

Luís Eduardo de Souza Robaina¹

 <https://orcid.org/0000-0002-2390-6417>

Romario Trentin²

 <https://orcid.org/0000-0002-0615-2801>

Marcel Achkar Borras³

 <https://orcid.org/0000-0001-7082-8557>

RESUMO: Esta pesquisa objetivou realizar uma classificação e zoneamento do relevo no Uruguai considerando a associação e distribuição de elementos de relevo, definidos como geomorphons, que podem ser representados pelos 10 mais comuns elementos: plano (flat), pico (peak), crista (ridge), ressaltos (shoulder), crista secundária (spur), encosta (slope), escavado (hollow), base de encosta (footslope), vales (valley), e fosso (pit). Para a realização do processamento do MDE e geração dos geomorphons, utilizou-se a aplicação online. A aplicação exige um conjunto de dados raster e dois valores escalares, livres, como parâmetros. O arquivo de entrada para a varredura é uma MDE. Os dois parâmetros livres são lookup "L" (distância em metros ou unidades de células) e threshold t (nivelamento em graus). Para os parâmetros livres aplicou-se valor de "L" igual a 20 pixels (1.800 metros) e graus "t" igual a 2°. A relação predominante e a localização dos elementos geomorphons permitiu dividir o Uruguai em 11 compartimentos de relevo, regionalmente denominados de Lagoa Mirim; Rio Negro, Santa Lucía; Cucchilla Dayman; Durazno; Tacuarembó; Cucchilla Grande Inferior; Cucchilla de Haedo; Cucchilla Grande; Isla Cristalina de Rivera e Cerro Cathedral. As características relevantes identificadas são consistentes com históricos trabalhos cartográficos realizados no Uruguai e foi muito eficiente na delimitação de diferentes formas de relevo com feições distintas e peculiares.

PALAVRAS-CHAVE: Geomorfometria; Mapeamento geomorfológico; Elementos de relevo.

¹ Doutorado em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Pós-Doutorado na Universidade do Porto, Portugal (UP) e na Universidade du Maine, Le Mans/França (UMaine). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). E-mail: lesrobaina@yahoo.com.br.

² Doutorado em Geografia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Pós-Doutorado em Geografia pela Le Mans Université, França (UMaine). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). E-mail: romario.trentin@ufsm.br.

³ Doutorado Environnement et gestion durable de l'espace (École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse - INP-ENSAT). E-mail: achkar@fcen.edu.uy.

ABSTRACT: *This research aimed to carry out a classification and zoning of Uruguay relief considering the association and dominance of certain relief elements, defined as geomorphons, that can be represented by 10 most common elements: flat, peak, ridge, shoulder, spur, slope, hollow, footslope, valley, and pit. For the processing on DEM and generation of geomorphons, it was used an online application. This requires a set of raster data and two scalar values such as free parameters. The input file for scanning is an MDE and two free parameters are lookup L (distance in meters or cell units) and threshold t (leveling in degrees). To the free parameters was applied L value of 20 pixels (1,800 meters) and t equal to 2 degrees. The predominance relationship and the location between the geomorphons elements allowed to divide Uruguay into eleven relief compartments, regionally called Lagoa Mirim; Rio Negro, Santa Lucia; Cucchilla Dayman; Durazno; Tacuarembó; Great Inferior Cucchilla; Haedo's Cucchilla; Large Cucchilla; Isla Cristalina de Rivera and; Cerro Catedral. Uruguay is characterized by a relief with large flat areas. The relevant characteristics identified are consistent with the cartographic history performed in Uruguay and was very efficient in the delimitation of different landforms with distinct and peculiar features.*

KEYWORDS: *Geomorphometry; Geomorphological mapping; Relief elements.*

RESUMEN: *Esta investigación tuvo como objetivo realizar una clasificación y zonificación del relieve en Uruguay considerando la asociación y distribución de los elementos del relieve, definidos como geomorfones, los cuales pueden ser representados por los 10 elementos más comunes: plano (flat), cumbre (peak), cresta (ridge), hombros (sholder), cresta secundaria (spur), pendiente (slope), ahuecado (hollow), base de pendiente (footslope), valle (valley) y fosso (pit). Para llevar a cabo el procesamiento del DEM y generación de los geomorfones se utilizó la aplicación en línea. La aplicación requiere un conjunto de datos ráster y dos valores escalares libres como parámetros. El archivo de entrada para el escaneo es un MDE. Los dos parámetros libres son la búsqueda "L" (distancia en metros o unidades de celda) y el umbral t (nivelación en grados). Para los parámetros libres se aplicó un valor de "L" igual a 20 píxeles (1.800 metros) y grados "t" igual a 2°. La relación predominante y la ubicación de los elementos geomórficos permitieron dividir a Uruguay en once compartimentos de relieve, denominados regionalmente Lagoa Mirim; Río Negro, Santa Lucía; Cucchilla Daymán; Durazno; Tacuarembó; Gran Cucchilla Inferior; Cucchilla de Haedo; Cucchilla grande; Isla Cristalina de Rivera y; cerro catedral. Las características relevantes identificadas son consistentes con los trabajos cartográficos históricos realizados en Uruguay y fue muy eficiente para delimitar diferentes accidentes geográficos con características distintas y peculiares.*

PALABRAS-CLAVE: *Geomorfometría; Cartografía geomorfológica; Elementos de relieve.*

INTRODUÇÃO

Os estudos morfométricos de relevo e rede de drenagem são amplamente utilizados para obter informações sobre a dinâmica da paisagem, sendo de grande importância em estudos geomorfológicos. Os primeiros trabalhos a utilizar os relevos para descrição regional foram Heberson, em 1905, e Fenneman, em 1916 (LOLLO, 1996). Posteriormente, Troeh (1965) e Huggett (1975) desenvolveram análise e classificação do relevo, a partir de parâmetros morfométricos das encostas. Troeh (1965), baseado na curvatura, apresentou uma classificação de quatro tipos principais de encostas: coletor de água com plano de curvatura convergente em perfil côncavo e convexo e os distribuidores de água com plano de curvatura divergente em perfil côncavo e convexo. Huggett (1975) estabeleceu a

combinação de formas de aspectos relacionando a curvatura vista em perfil e a planta, propondo nove padrões de encostas.

Os atuais métodos de classificação, principalmente aqueles que utilizam os SIGs, possibilitaram a divisão em elementos de relevo que indicam porções relativamente homogêneas para cada tipo de terreno (MACMILLAN; SHARY, 2009). Utilizando Sistemas de Informação Geográfica, Muñoz (2009), descreve quantitativamente as formas de superfície através de equações aplicadas a modelos numéricos de representação altimétrica.

Iwahashi e Pike (2007) apresentam um método automatizado de classificação topográfica não supervisionada baseado em três variáveis morfométricas: declividade, convexidade das encostas e textura da superfície. Jasiewicz e Stępiński (2013b) estabeleceram uma classificação de elementos de relevo usando ferramentas de visão computacional. Os autores fazem uma analogia entre a classificação textural da imagem, baseada em um arranjo espacial de tons de cinza para uma determinada região do arranjo espacial de elevação. Eles usaram o conceito de "Padrões Ternários Locais" (LTP) (LIAO, 2010) para identificar os elementos do relevo, chamados geomorphons por analogia aos textons (JULESZ, 1981). Os textons referem-se às microestruturas básicas de uma imagem e, assim, constituem os elementos básicos da percepção visual (JULESZ, 1984) e, da mesma forma, os geomorfos são microestruturas fundamentais do relevo. Portanto, os mapas de relevo podem ser trabalhados como algoritmos e, usando técnicas computacionais, os algoritmos médios podem classificar e mapear em formas de relevo que podem ser representadas por dez elementos mais comuns: plano, pico, crista, ressalto, crista secundária, encosta, escavado, base da encosta, vale e fosso.

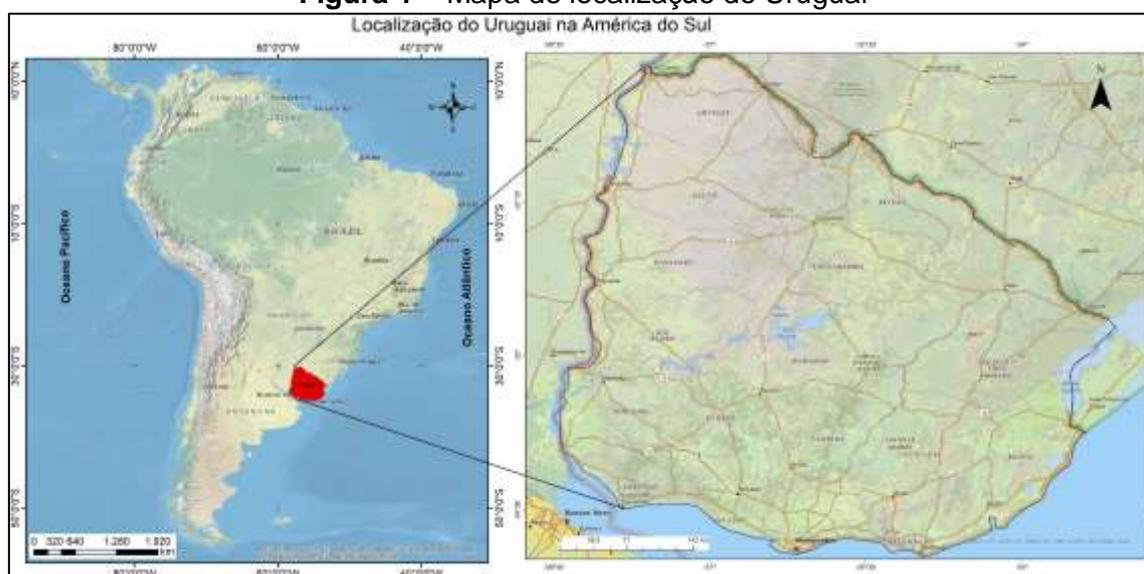
Robaina, Trentin e Laurent (2016) utilizaram essa metodologia na delimitação de diferentes compartimentos de relevos no Rio Grande do Sul, com características distintas e peculiares. Silveira *et al.* (2018) aplicaram a proposta de geomorphons para classificação automatizada de elementos de relevo no Paraná, verificando que quando analisados sob o ponto de vista regional, o agrupamento dos elementos identificados permitiu a visualização de compartimentos geomorfológicos homogêneos, e quando analisados sob uma perspectiva local, os elementos de relevo mostraram uma relação confiável com a verificação de campo. Petsch *et al.* (2020) avaliaram o potencial da metodologia dos geomorphons para identificar tipos de relevo em ambientes montanhosos glaciais. Atkinson, Clercq e Rozanov (2020) fornecem uma avaliação exploratória abrangente da representação digital do terreno e classificação do relevo usando uma abordagem de mapeamento geomorfométrico automatizado (*Geomorphon - geomorphological phonotypes*), avaliando três modelos digitais de superfície diferentes (SUDEM, SRTM, ASTER GDEM2) e diferentes

resoluções espaciais (30 metros e 90 metros) para uma bacia hidrográfica de 11.200 hectares em KwaZulu-Natal, África do Sul.

Esta pesquisa teve como objetivo realizar a classificação e zoneamento das formas do relevo do Uruguai considerando a associação e a dominância de certos elementos do relevo, definidos como geomorphons.

O Uruguai tem uma área terrestre de aproximadamente 176.000 quilômetros quadrados, e está localizado na parte SE da América do Sul. A única fronteira terrestre do Uruguai é com o estado brasileiro do Rio Grande do Sul, ao norte, a oeste o rio Uruguai, a sudoeste fica o estuário do rio da Prata e a leste o oceano Atlântico (figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização do Uruguai



Fonte: elaborado pelos autores.

MATERIAIS E MÉTODOS

As bases de dados cartográficas utilizadas neste trabalho foram feitas pelo limite político-administrativo do Uruguai, fornecido pelo ESRI (ARCGIS ONLINE, [2022]), utilizado para definir os limites da área de interesse e o Modelo Digital de Elevação gerado a partir da Missão de Topografia do Shuttle Radar (SRTM), fornecido pelo United States Geological Survey (USGS), com resolução espacial de 3 segundos de arco (90 metros).

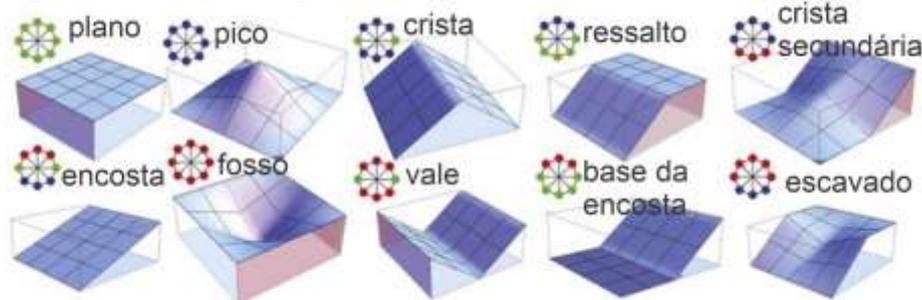
A metodologia utilizada na definição dos geomorphons é baseada na proposta de Jasiewicz e Stępiński (2013b). Os autores analisam a similaridade textural do DEM, que apresentará variação mais ou menos dos níveis de cinza entre células vizinhas, considerando um nível específico e transferido para o terreno os valores de elevação se mais "1", se menos "-1" for igual para "0". Para este cálculo, são definidos perfis para as

direções principais da célula central "*lookup distance*" L extraída do Modelo Digital de Elevação.

Para o processamento em DEM e geração dos geomorphons, utilizou-se um aplicativo online, disponível no site "<https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.geomorphon.html>". Este aplicativo foi desenvolvido e implementado por Jasiewicz e Stępiński (2013a) e permite o processamento do MDE. O código do aplicativo também está disponível para download pela University Of Cincinnati (2020). O aplicativo requer um conjunto de dados raster e dois valores escalares, como parâmetros livres. O arquivo de entrada para digitalização é um MDE. Os dois parâmetros livres são *lookup* L (distância em metros ou unidades de célula) e *threshold* t (nivelamento em graus). Aos parâmetros livres foi aplicado o valor L de 20 pixels (1.800 metros) e t igual a 2 graus. A partir das versões 3.14 do QGIS, o código de geração dos geomorphons encontra-se implementado juntamente com as ferramentas do GRASS e o processamento dos dados pode ser executado localmente na máquina do usuário.

As escalas espaciais dessas variadas paisagens são identificadas na figura 2 com diferentes padrões de cores representando os elementos do relevo identificados automaticamente através de aplicação de análise do Modelo Digital de Elevação. A compartimentalização do relevo ocorreu por meio do agrupamento manual dos principais elementos, conforme sua distribuição espacial dos elementos geomorphons.

Figura 2 – Elementos geomorphons identificados na análise do relevo



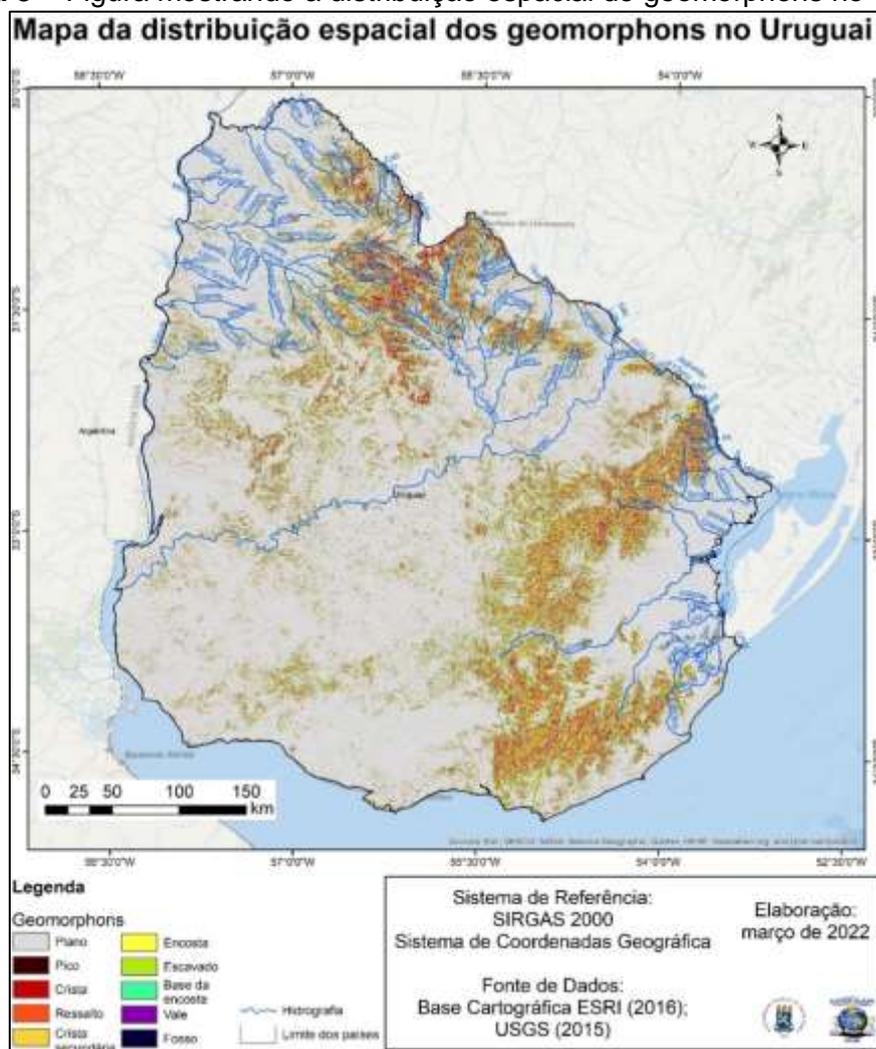
Fonte: adaptado de Jasiewicz e Stępiński (2013b).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os elementos geomorphons podem ser conceituados como constituídos por partes de um tipo de relevo relativamente homogêneo em relação à forma (curvatura do perfil e plano), inclinação (gradiente), orientação ou exposição (aspecto ou radiação solar) e posição do relevo (por exemplo, superior, central ou inferior). Os dez tipos de geomorphons identificados são: plano, pico, crista, ressalto, crista secundária, encosta, fosso, vale, base da encosta e escavado. A distribuição e a associação entre os dez tipos são mostradas no

mapa da figura 3, enquanto a porcentagem desses elementos no Uruguai é representada no gráfico da figura 4.

Figura 3 – Figura mostrando a distribuição espacial de geomorphons no Uruguai



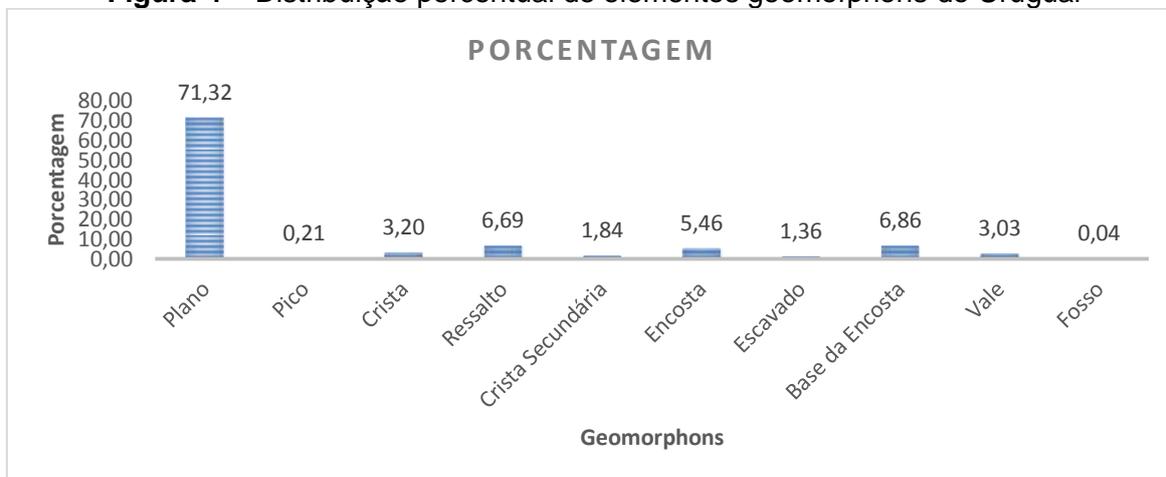
Fonte: elaboração dos autores.

A observação dos números mostra que o Uruguai é caracterizado por um relevo com grandes áreas planas, onde o elemento plano corresponde a 71% da área total. Segue em importância o elemento de base de encosta representada por pequenas elevações levemente inclinada no sopé de Colinas, a encosta ampla e o elemento ressaltado que é componente convexo na meia encosta.

Os tipos de geomorphons que constituem o relevo e a relativa predominância permitiram dividir o Uruguai em 11 compartimentos. Na figura 5 está apresentada a porcentagem de cada elemento de relevo presente nas unidades de relevo do Uruguai e na figura 6 é apresentado o mapa com a distribuição dos compartimentos, denominados com base em toponímias regionais: Lagoa Mirim; Rio Negro; Santa Lúcia; Cuchilla Dayman;

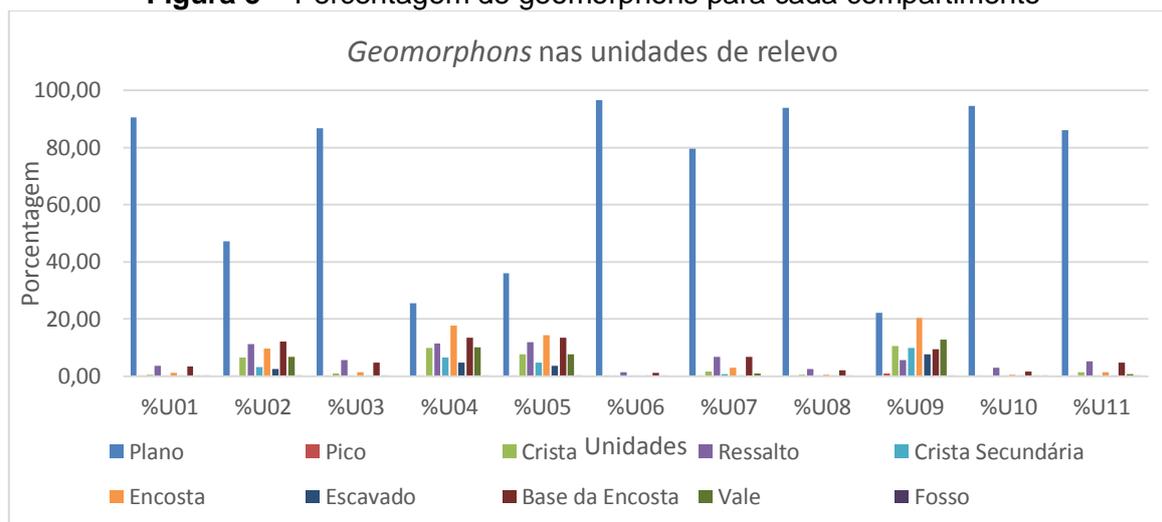
Durazno; Tacuarembó; Cuchilla Grande Inferior; Cuchilla de Haedo; Cuchilla Grande; Isla Cristalina de Rivera e Cerro Catedral.

Figura 4 – Distribuição percentual de elementos geomorphons do Uruguai



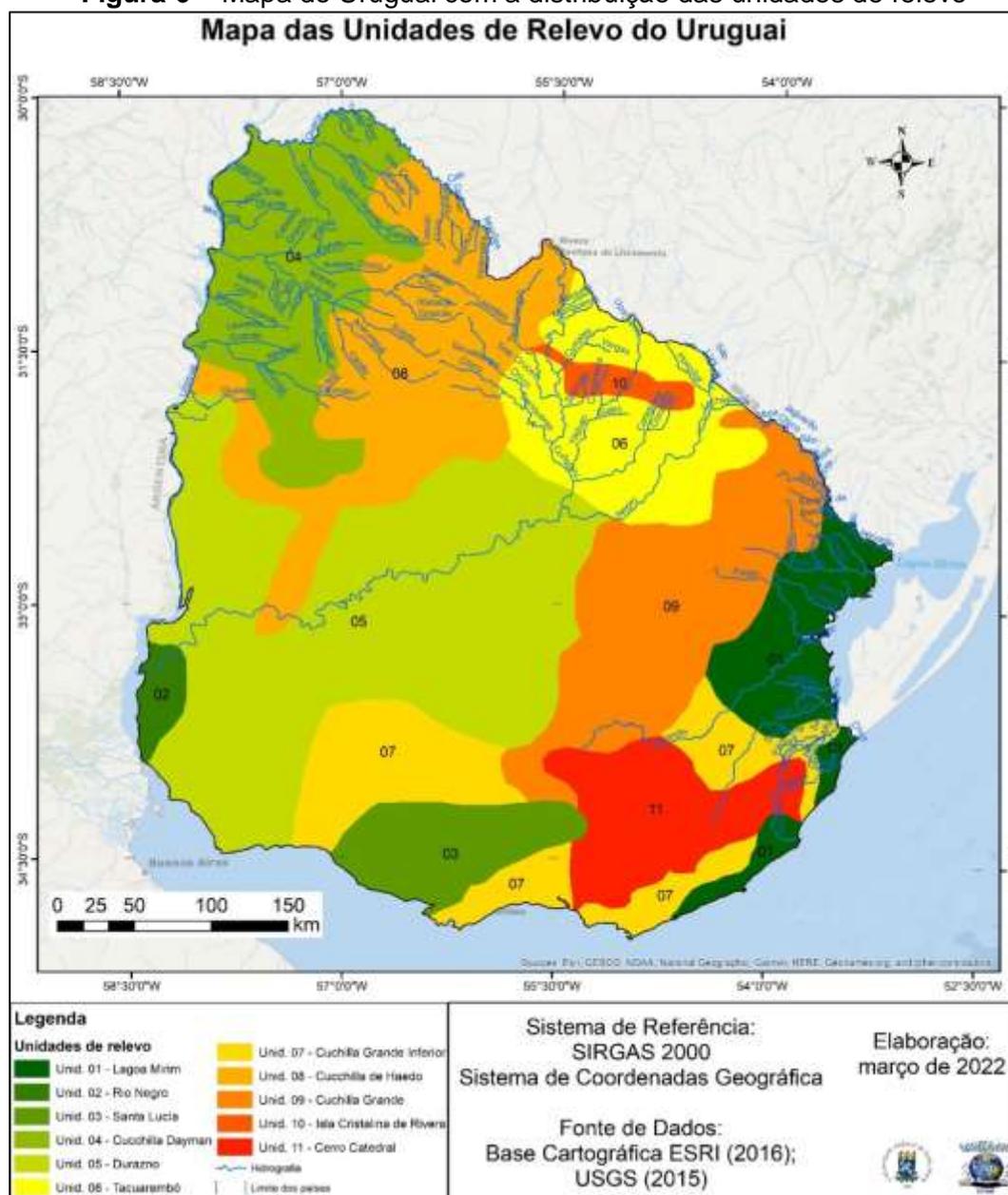
Fonte: autores.

Figura 5 – Percentagem de geomorphons para cada compartimento



Fonte: autores.

Figura 6 – Mapa do Uruguai com a distribuição das unidades de relevo



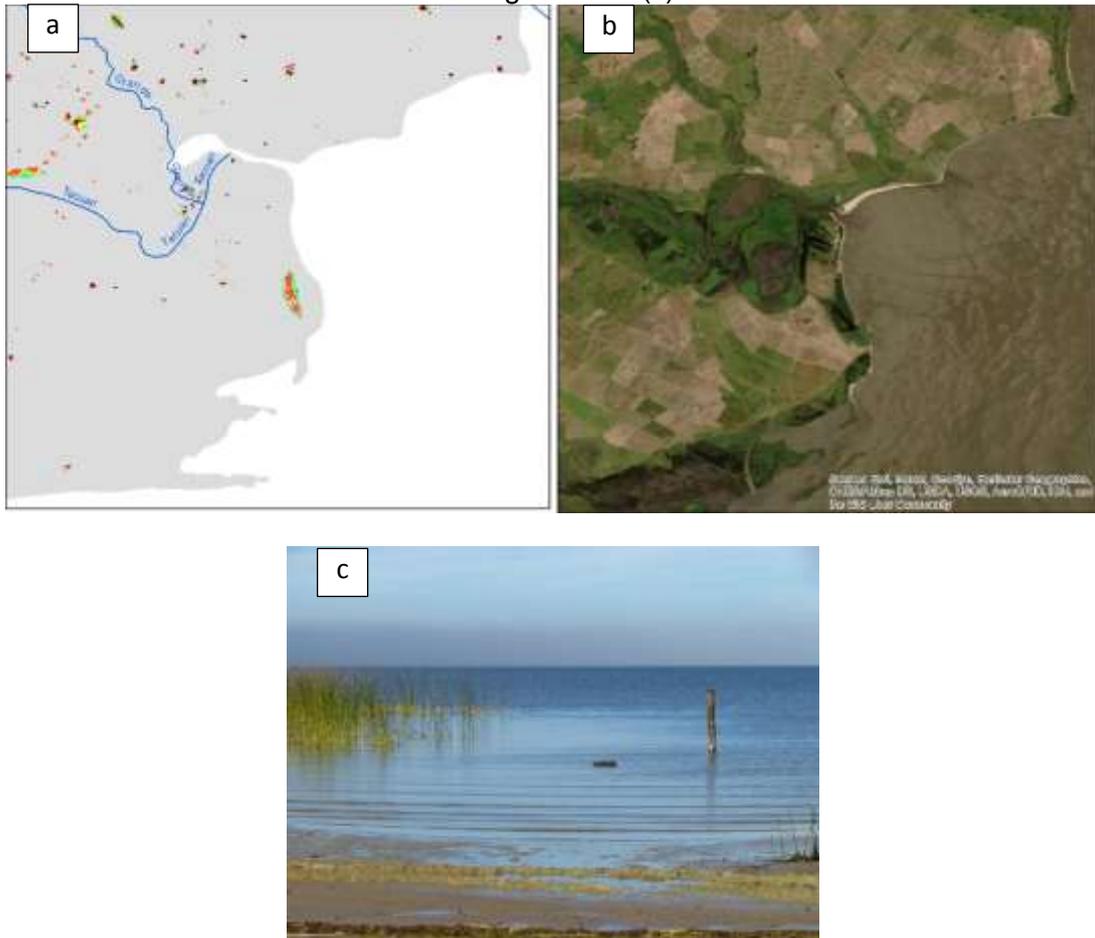
Fonte: elaboração dos autores.

Unidade 1 – Lagoa Mirim

Esta unidade é representada por elementos planos que ocorrem em 97% da área e está na região leste e sudeste do Uruguai. Compreende na porção leste da fossa tectônica a Lagoa Mirim, composta por sedimentos do Terciário e processos ativos até o Quaternário (PANARIO, 1988), formando um relevo de terraços compostos por depósitos fluvio-deltaicos a marinhos. A segunda área na porção sudeste corresponde à zona costeira com relevo desenvolvido sobre depósitos de areias recentes, sequências de sedimentos franco-argilosos e silte-argilosos marinho-costeiros com idade do Pleistoceno (PORTA *et al.*, 1985).

A figura 7 (a) apresenta uma área do compartimento, junto às margens da Lagoa Mirim, onde se observa o predomínio do elemento plano e elementos geomorphons do tipo ressaltos que ocorrem de forma dispersa, na figura (b) observa-se a imagem de satélite dessa porção e na figura 7 (c) uma fotografia mostra uma pequena área da lagoa.

Figura 7 – Figura apresentando os geomorphons - (a) imagem de satélite GeoEye-1 de 08/04/2021 disponibilizada pela MAXAR via serviço de mapa ESRI (b) fotografia de margem da Lagoa Mirim (c)

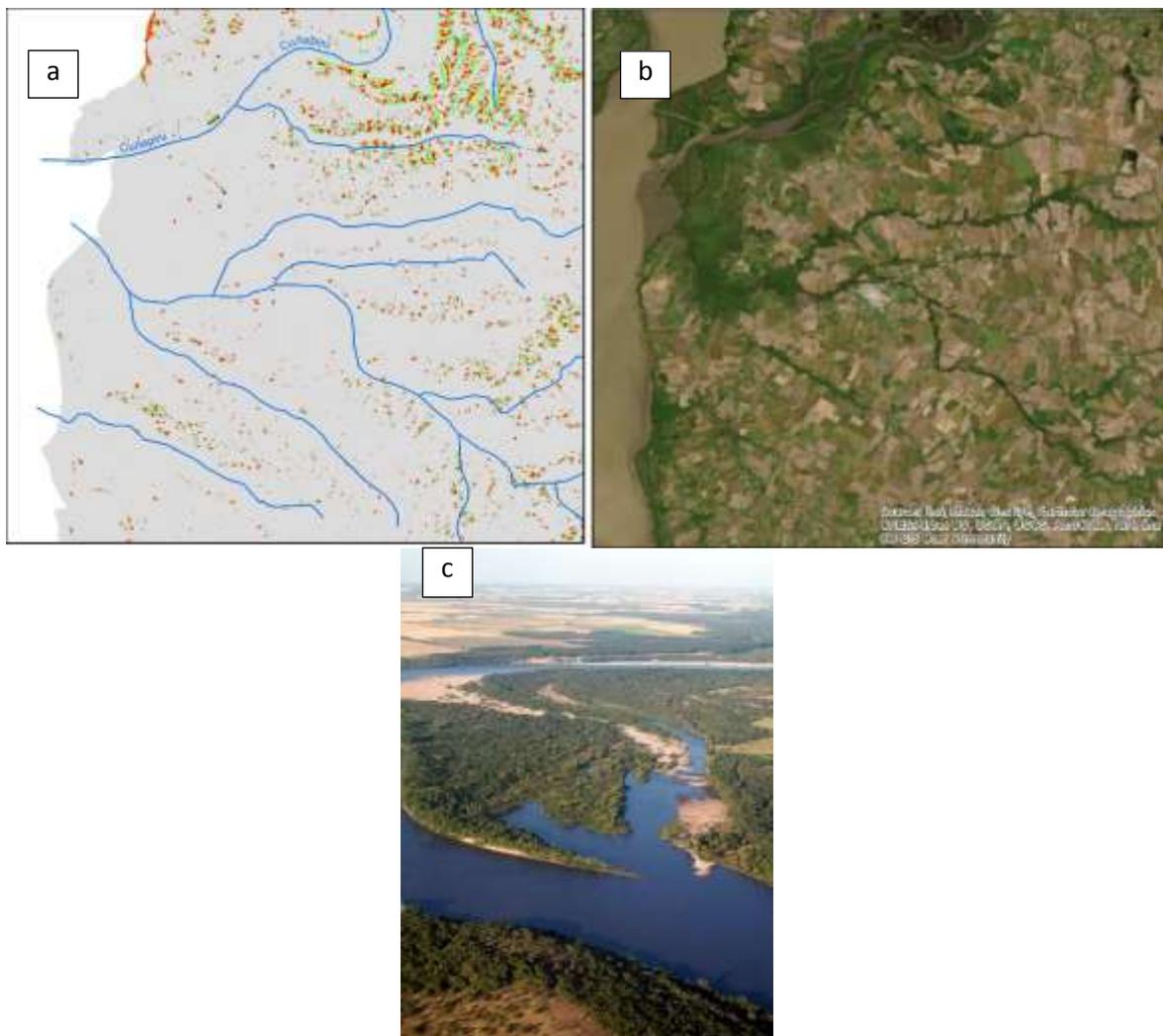


Fonte: autores.

Unidade 02 – Rio Negro

Ocorrem em uma pequena porção do sudoeste, ao longo do rio Uruguai e próximo à foz do rio Negro (figura 8). Esta unidade está se conectando com o extremo sul da bacia sedimentar oeste, composta por áreas planas com pequenas elevações formando ressaltos (figura 8 a e b) marcadas por áreas de inundação onde a umidade é semipermanente (figura 8 c).

Figura 8 – Figura apresentando os geomorphons (a) imagem de satélite Worldview-02 de 07/10/2020 disponibilizada pela MAXAR via serviço de mapa ESRI (b) fotografia da unidade 2, na foz do rio Negro (c)



Fonte: autores.

O substrato é composto por sedimentos recentes, depósitos arenosos e silicosos do Pleistoceno, arenitos finos e siltitos carbonatados interpretados como de origem continental em ambiente semiárido do Oligoceno (PORTA *et al.*, 1985).

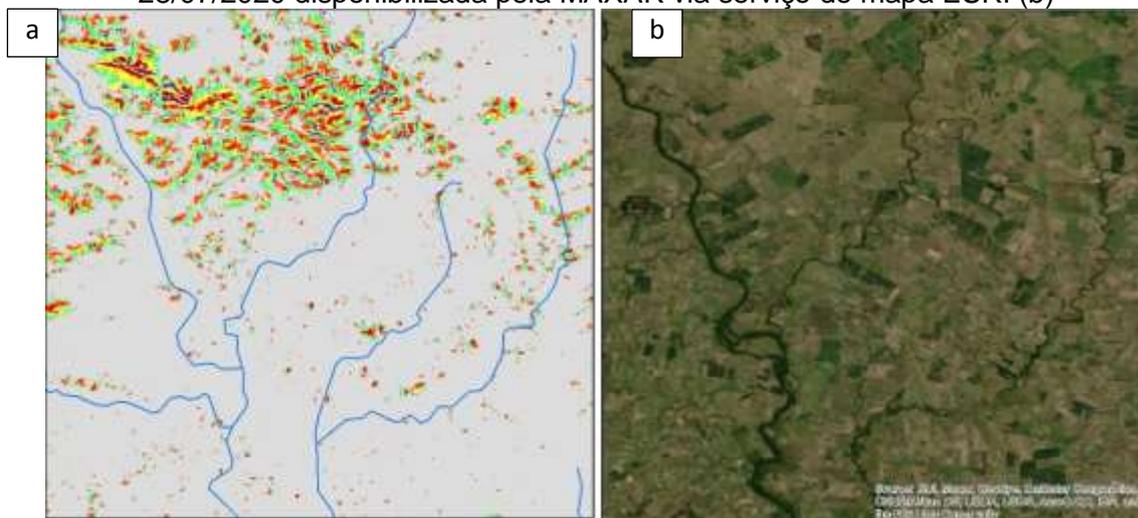
Elementos planos definem esta unidade com 94% da área. A diferença da anterior é a maior ocorrência de elementos do tipo ressalto associada a arenitos de grão fino com cimento ferruginoso ou silicoso do Cretáceo Superior.

Unidade 3 – Santa Lucía

Esta unidade está representada no Sul do Uruguai na foz do rio La Plata. Está associada à fossa tectônica do rio Santa Lucía (PANARIO, 1988). São depósitos silicosos maciços classificados como depósitos de *loess* do Pleistoceno que compõem uma vasta área representada por elementos planos (94%). É comum a sequência de arenitos, lentes argilosas e conglomerados do Plioceno (PORTA *et al.*, 1985).

Se caracteriza por um relevo aplanado, representado por geomorphons planos, e com leves ondulações definidas por geomorphons do tipo ressaltos e base de encosta. A ocorrência mais comum desses dois elementos é que separa esse compartimento dos anteriores. A figura 9 mostra os geomorphons que ocorrem no compartimento (9a), com predomínio do tipo plano, e a imagem de satélite (9b) da mesma área.

Figura 9 – A figura mostra os geomorphons (a) imagem de satélite Worldview-02 de 28/07/2020 disponibilizada pela MAXAR via serviço de mapa ESRI (b)



Fonte: autores.

Unidade 4 – Cucchilla Dayman

Ocorre no norte e noroeste do Uruguai, associando à Cuesta basáltica, caracterizada por ser constituída por derrames de lava com estruturas horizontais, que geram formas aplanadas descontínuas e pequenas porções inclinadas devido à maior resistência erosiva (PANÁRIO, 1988).

Os geomorphons são representados principalmente pelo elemento plano (91%) sobre o substrato de rochas vulcânicas. Porções mais resistentes de rochas vulcânicas e *intertraps* de arenitos silicificados geram formas convexas representado pelo *geomorphon* do tipo ressalto (3,7%) e as formas levemente inclinadas da base representado pelo *geomorphon* base da encosta (3,4%).

Unidade 5 – Durazno

A unidade, que ocorre na região Centro do Uruguai, está associada à bacia sedimentar do Oeste, em uma área drenada pelo médio-baixo curso do Rio Negro. Ocorre em um substrato de rochas vulcânicas passando para rochas sedimentares paleozóicas a norte e rochas graníticas a leste (PORTA *et al.*, 1985). As rochas cristalinas do embasamento geológico da área foram erodidas e aplainadas durante o final do Terciário e início do Quaternário formando relevos com elementos do tipo plano. Mais tarde, durante o Quaternário, essas áreas recebem materiais sedimentares dos morros e porções mais resistentes ao intemperismo e à erosão e são representadas na paisagem por geomorphons do tipo ressaltos e encostas com base de encostas associados.

Unidade 6 – Tacuarembó

A unidade 6 ocorre na região NE, que corresponde, segundo Panario (1988), à bacia sedimentar Gonduânica. Está localizada no alto curso do Rio Negro, composta por grandes acumulações de sedimentos do Terciário depositados sobre rochas sedimentares do Paleozóico Superior que vão desde os arenitos até os lamitos.

Esta condição forma uma representação extensa de elementos do tipo plano. A ocorrência de porções mais resistentes, devido às diferenças na diagênese, gera formas convexas na meia encosta representadas pelos elementos do tipo ressaltos. Os elementos geomorphons do tipo pico e crista estão associados a porções resistentes de arenitos silicificados.

Unidade 7 – Cuchilla Grande Inferior

A unidade, representada no sul do Uruguai, é composta por duas áreas: a oeste representa as cabeceiras da bacia do rio Santa Lúcia, formada por material do embasamento cristalino com cobertura de materiais sedimentares mais ou menos desenvolvidos do Quaternário (PANARIO, 1988), gerando paisagens de colinas suaves; a leste se manifesta nas áreas litorâneas do Rio da Prata com afloramentos de embasamento cristalino recobertos por sedimentos finos ao norte e arenosos ao sul.

O contato entre sedimentos quaternários com rochas metamórficas e migmatitos do embasamento cristalino (Figura 10) formam relevos que consistem, principalmente, de elementos do tipo ressaltos, e encostas suaves com associação de bases de elevações.

Figura 10 – Fotografia da praia de Punta del Este, contato entre sedimentos do Quaternário com rochas metamórficas



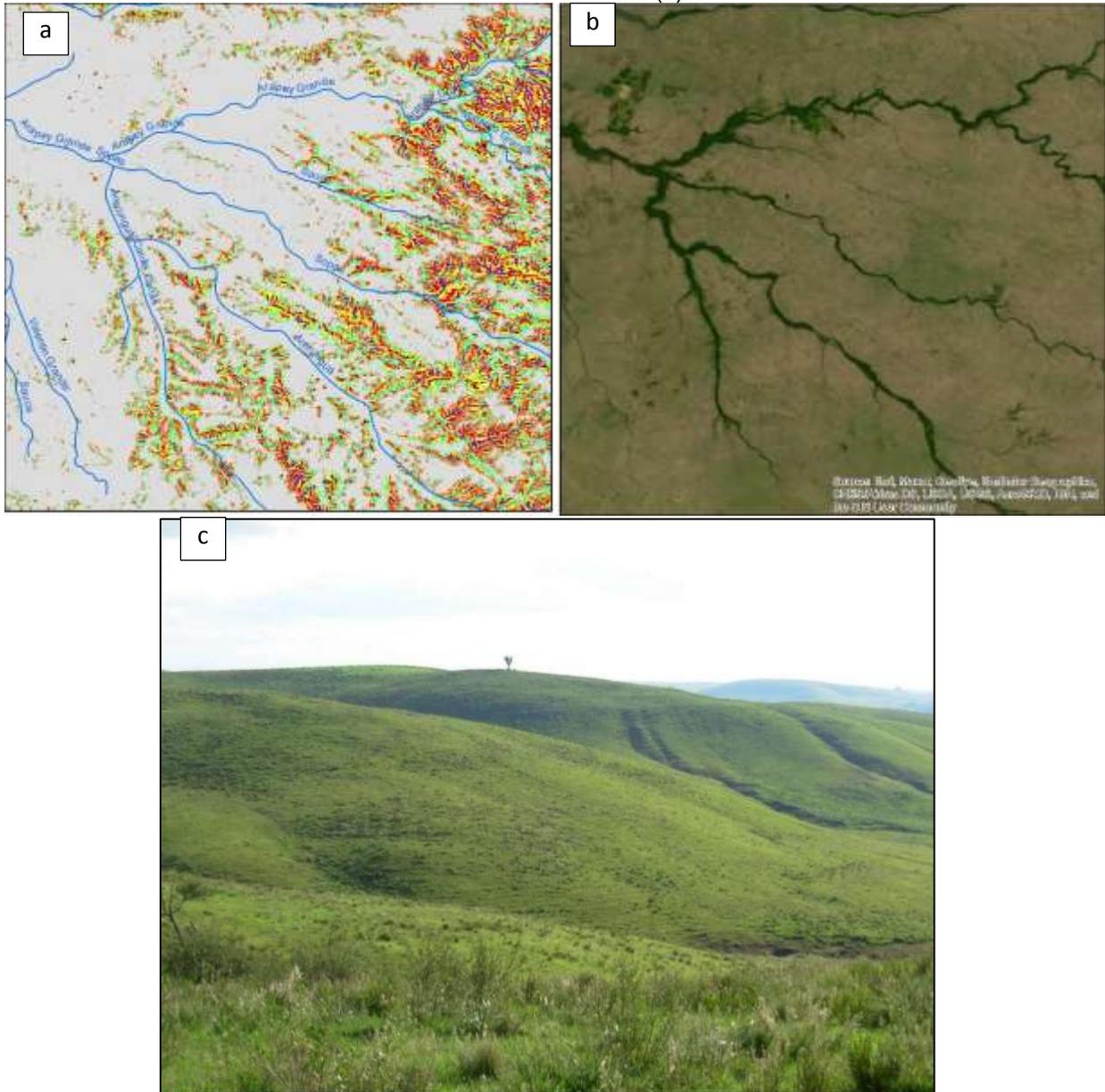
Fonte: autores.

Unidade 8 – Cucchilla de Haedo

Ocorre na região norte e corresponde à recuperação do efeito da Cuesta basáltica anterior da erosão remontante dos materiais friáveis dos arenitos subjacentes. A predominância de materiais mais resistentes à erosão forma um alto topográfico conhecido como Cucchilla de Haedo no centro-oeste do Uruguai. Os relevos são colinas compostas por rochas vulcânicas e rochas sedimentares de arenito.

Os elementos de geomorphons que representam o relevo desse compartimento são as encostas cortadas por estreitas cristas e vales. As rochas areníticas *intertraps* geram formas convexas na meia encosta representadas pelo elemento tipo ressaltos e base da encosta. Na figura 11, esses elementos podem ser vistos na fotografia de encosta (a), o mapa com a distribuição dos geomorphons (b) e na imagem de satélite (c).

Figura 11 – Figura mostrando os geomorphons (a) imagem de satélite Worldview-02 de 12/03/2016 disponibilizada pela MAXAR via serviço de mapa ESRI (b) fotografia mostrando o reverso da Cuesta (c)



Fonte: autores.

Unidade 9 – Cuchilla Grande

A unidade 9 é composta por uma série de dobras que constituem grande parte de Cuchilla Grande (figura 12) formada por uma associação de rochas metamórficas e ígneas do embasamento (PORTA *et al.*, 1985). Os elementos alternados de vale e cristas alinhados caracterizam a evolução das formas de relevo dobradas. O Norte apresenta os níveis mais baixos de altitude com processos aplanados representados pelos elementos planos. As áreas mais movimentadas estão caracterizadas por elementos do tipo encosta, ressaltos e base da encosta.

Figura 12 – Fotografia dos Morros da Cuchilla Grande formado por rochas magmáticas e metamórficas com elementos de crista alinhado



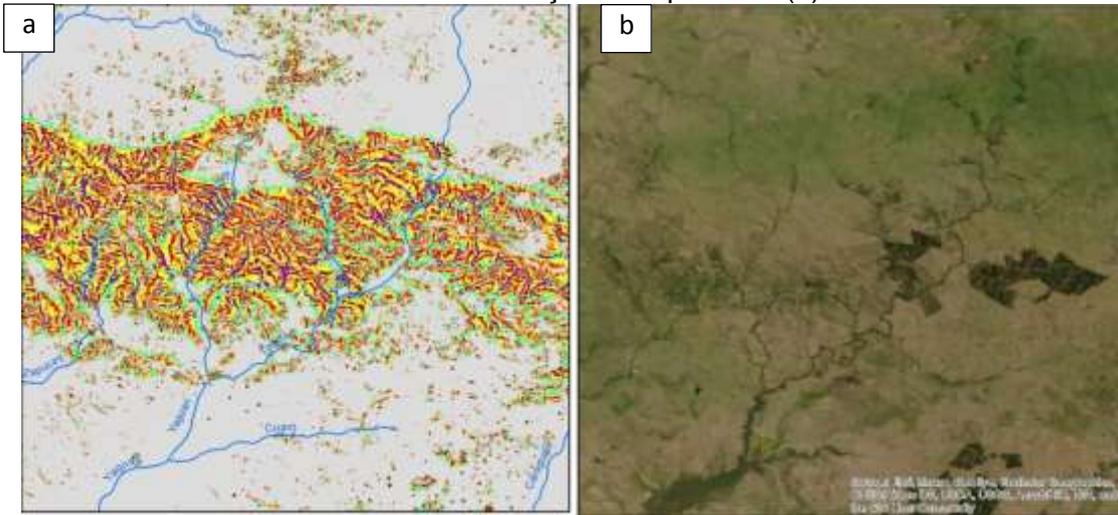
Fonte: autores.

Unidade 10 – Isla Cristalina de Rivera

Esta unidade forma uma área elevada dentro da unidade Tacuarembó (6), representando uma exposição do embasamento cristalino, soerguido por erosão diferencial, em rochas sedimentares ao redor conhecida como “Ilha cristalina Rivera”.

Os antigos processos de erosão geraram algumas áreas elevadas com topos aplanados nas partes mais altas da paisagem (PANARIO, 1988) caracterizado por elementos de geomorphons do tipo encostas, ressaltos e base da encosta (em torno de 41%) e elementos planos (25%). A ocorrência de rochas dobradas e falhadas marcam elementos da crista (10%), crista secundária (7%) e vale (10%). Na figura 13 apresenta-se os geomorphons que caracterizam o compartimento Isla cristalina de Rivera (a) e a imagem de satélite (b) vista da mesma área.

Figura 13 – Isla Cristalina de Rivera representando uma exposição do embasamento cristalino, soerguido por erosão diferencial, em rochas sedimentares ao redor. Elementos de geomorphons (a); imagem de satélite Worldview-02 de 02/01/2021 disponibilizada pela MAXAR via serviço de mapa ESRI (b)



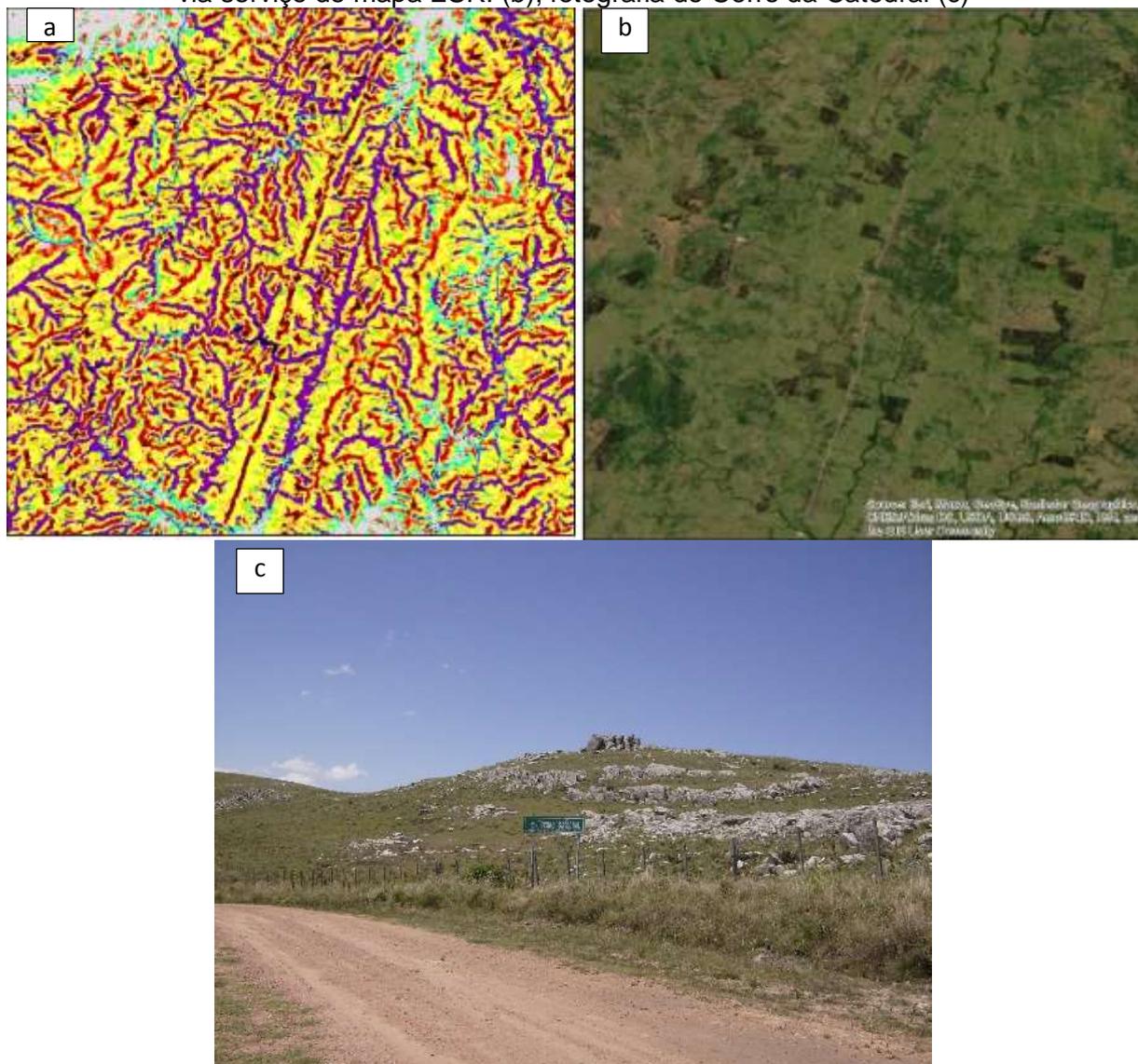
Fonte: autores.

Unidade 11 – Cerro Cathedral

Esta unidade é caracterizada com um relevo inclinado que forma uma paisagem marcada por geomorphons do tipo encosta e base de encosta. Os alinhamentos e dobras das rochas do embasamento são definidos pelos elementos geomorphons cristas, cristas secundárias e vales que podem ser vistos na figura 14, distribuição espacial de geomorphons (a) e a imagem de satélite (b).

Este compartimento apresenta as maiores altitudes do país, com importantes rebaixamentos tectônicos que geraram vales com diferentes níveis de acúmulo de sedimentos gerando paisagens de colinas intermontanas (figura 14c).

Figura 14 – Exposição do embasamento cristalino “Cerro da Catedral”. Elementos geomorphons (a); imagem de satélite GeoEye-1 de 15/10/2020 disponibilizada pela MAXAR via serviço de mapa ESRI (b); fotografia do Cerro da Catedral (c)



Fonte: autores.

CONCLUSÃO

As definições dos elementos do relevo permitiram o zoneamento das 11 unidades de relevo regionalmente denominadas de Lagoa Mirim; Rio Negro, Santa Lucía; Cucchilla Dayman; Durazno; Tacuarembó; Cucchilla Grande Inferior; Cucchilla de Haedo; Cucchilla Grande; Isla Cristalina de Rivera e Cerro Catedral, que representam configurações morfológicas distintas de acordo com as características do substrato geológico e dos processos superficiais.

A proposta de identificação de elementos geomórficos, incorporando procedimentos de um método automatizado foi muito eficiente na delimitação de diferentes formas de

relevo no Uruguai, pois permitiu determinar feições distintas e peculiares. Para o processamento no MDE e geração de geomorphons, foi utilizado um aplicativo *online* com arquivo de entrada para escaneamento do MDE com dois parâmetros livres que são *lookup* L (distância em metros ou unidades de célula) e *threshold* t (nivelamento em graus). Atualmente o procedimento pode ser executado no SIG QGIS que implementou a rotina de processamento e geração dos geomorphons associado às suas aplicações Grass.

A classificação e zoneamento do relevo do Uruguai consideraram a associação e dominância de elementos do relevo, definidos como geomorphons, que podem ser representados pelos dez elementos mais comuns: plano, crista, crista secundária, encosta, base da encosta, ressaltos, pico, fosso, escavado e vale. A relação de predominância e a localização entre os elementos geomorphos permitiram dividir o Uruguai em 11 compartimentos. As características relevantes identificadas são consistentes com a história cartográfica realizada no Uruguai com técnicas convencionais de coleta de dados, como carta geológica e mapa geomorfológico.

As 11 unidades de relevo apresentadas no presente trabalho contextualizam o comportamento do relevo do Uruguai, sendo representada por suas áreas bastante aplainadas associadas às unidades Lagoa Mirim, Rio Negro e Santa Lucia, bem como áreas suavemente onduladas formando colinas associada às unidades Cuccilla Dayman, Durazno, Taruarembó, às áreas de colinas onduladas nas unidades Cuccilla Grande Inferior, Cucchilla de Aedo e Cucchilla Grande, além das porções de relevo bastante movimentado associado às unidades Isla Cristalina de Rivera e Cerro Catedral.

REFERÊNCIAS

ARCGIS ONLINE. **Bem-Vindo ao ArcGIS Online**. [2022]. Disponível em: <http://www.arcgis.com/home/index.html>. Acesso em: 18 jul. 2022.

ATKINSON, Jonathan; CLERCQ, Willem de; ROZANOV, Andrei. Multi-resolution soil-landscape characterisation in KwaZulu Natal: Using geomorphons to classify local soilscapes for improved digital geomorphological modelling. **Geoderma Regional**, [s.l.], v. 22, p. 1-17, 2020.

HUGGETT, Richard John. Soil landscape systems: A model of soil genesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 13, n. 1, p. 1-22, 1975.

IWAHASHI, Junko; PIKE, Richard. J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 86, n. 3-4, p. 409-440, 2007.

JASIEWICZ, Jaroslaw; STEPINSKI, Tomasz F. Example-Based Retrieval of Alike Land-Cover Scenes from NLCD2006 Database. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, New York, v. 10, n. 1, p. 155-159, 2013a.

JASIEWICZ, Jaroslaw; STEPINSKI, Tomasz. F. Geomorphons a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 182, p. 147-156, 2013b.

JULESZ, Bela. A brief outline of the texton theory of human vision. **Trends in Neuroscience**, Amsterdam, v. 7, p. 41-45, 1984.

JULESZ, Bela. Textons, the elements of texture perception, and their interactions. **Nature**, [s. l.], v. 290, p. 91-97, 1981.

LIAO, Wen-Hung. Region Description Using Extended Local Ternary Patterns. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 20., 2010, Washington. **Proceedings** [...]. Washington: IEEE, 2010. p. 1003-1006.

LOLLO, José Augusto de. **O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de avaliação do mapeamento geotécnico**: Sistematização e aplicação na quadrícula de Campinas/SP. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/jlollo/tese-de-doutorado>. Acesso em: 18 jul. 2022.

MACMILLAN, Robert A.; SHARY, P. A. Chapter 9 Landforms and landform elements in geomorphometry. *In*: HENGL, Tomislav; REUTER, Hannes. I. (ed.). **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 227-254. (Developments in Soil Science, v. 33).

MUÑOZ, Viviana Aguilar. **Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

PANARIO, Daniel. **Geomorfología del Uruguay, Propuesta de un marco estructural y un esquema de evolución del modelado del relieve uruguayo**. Montevideo: Facultad de Humanidades y Ciencias UdelaR, 1988.

PETSCH, Carina; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; TRENTIN, Romario; ROSA, Kátia Kellem da; FIGUEIREDO, Anderson Ribeiro de; SIMÕES, Jefferson Cardia. O uso de métodos de mapeamento automático de relevo para análise de formas glaciais. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, Curitiba, v. 21, n. 2, p. 253-269, 2020. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1771/386386486>. Acesso em: 18 jul. 2022.

PORTA, Fernando Preciozzi; PIOPO, Jorge Spoturno; MARZIOTTO, Walter Heinzen; KEMPA, Pier Rossi. **Memoria explicativa de la carta geológica del Uruguay a la escala 1:500.000**. Montevideo: Ministerio de Industria y Energía; DINAMIGE. 1985.

ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; TRENTIN, Romario; LAURENT, François. Compartimentação do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, através do uso de geomorphons obtidos em classificação topográfica automatizada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Curitiba, v. 17, n. 2, p. 287-298, 2016. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/857/534>. Acesso em: 18 jul. 2022.

SILVEIRA, Claudinei Tabora; SILVEIRA, Ricardo Michel Pinheiro; TRENTIN, Romario; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza. Classificação automatizada de elementos de relevo no estado do Paraná (Brasil) por meio da aplicação da proposta dos geomorphons. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Curitiba, v. 19, n. 1, p. 33-57, 2018. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1263/641>. Acesso em: 18 jul. 2022.

TROEH, Frederick. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal Science**, [s. l.], v. 263, n. 7, p. 616-627, 1965. Disponível em: <https://doi.org/10.2475/ajs.263.7.616>. Acesso em: 13 mar. 2016.

UNIVERSITY OF CINCINNATI. **Space informatics lab**. Cincinnati: University of Cincinnati, 2020. Disponível em: <http://sil.uc.edu/>. Acesso em: 18 jul. 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Recebido: maio de 2022.

Aceito: julho de 2022.