APÊNDICES

APÊNDICE A – Código do programa implementado.....178

APÊNDICE B – Arquivo de configuração dos conjuntos fuzzy (fuzzy_sets.txt).....183

APÊNDICE C – Arquivo de configuração das regras fuzzy (fuzzy_rules.txt).....184

APÊNDICE D – Artigo apresentado no XV SBSR, Curitiba, Paraná.....185

APÊNDICE E – Artigo apresentado em Geomorphometry 2011, Redlands, California.....192

APÊNDICE A – Código do programa implementado

```
#!/bin/sh
#
############################################################################
#
# MODULE:       r.multiscale.analysis
# AUTHOR(S):    Marcello A. V. Gorini <gorini at gmail dot com >
# PURPOSE:      Multi-scale characterization of DEMs.
#
# COPYRIGHT:    (C) 2006-2011 by the GRASS Development Team
#
#               This program is free software under the GNU General Public
#               License (>=v2). Read the file COPYING that comes with GRASS
#               for details.
#
############################################################################

#%Module
#% description: Characterizes the multi-scale geomorphometry of a DEM.
#% keywords: geomorphometry, features, multi-scale
#%End
#%option
#% key: input
#% gisprompt: old,cell,raster
#% type: string
#% description: Name of input raster layer
#% required : yes
#%end
#%option
#% key: min_size
#% type: integer
#% description: Minimum size of processing window (odd number only, max: 69)
#% required : no
#% answer : 3
#%end
#%option
#% key: int_size
#% type: integer
#% description: Increment size of processing window (even number only)
#% required : no
#% answer : 2
#%end
#%option
#% key: max_size
#% type: integer
#% description: Maximum size of processing window (odd number only, max: 69)
#% required : no
#% answer : 69
#%end
#%option
#% key: shape
#% type: string
#% description: Shape of fuzzy set
#% required : no
#% options : sshaped,linear,jshaped,gshaped
#% answer : linear
#%end
#%option
#% key: conf_tol
#% type: double
#% description: Confusion index threshold (number between 0 and 1)
#% required : no
#% answer : 0.6
#%end
#%option
#% key: min_stable
#% type: integer
#% description: Minimum number of stable features to validate a stability lost.
#% required : no
#% answer : 4
#%end
```

```
# checks if script is called from within GRASS
if  [ -z "$GISBASE" ]; then
        echo "You must be in GRASS GIS to run this program" >&2
        exit 1
fi

# saves command line
if [ "$1" != "@ARGS_PARSED@" ]; then
    CMDLINE="`basename $0`"
    for arg in "$@" ; do
        CMDLINE="$CMDLINE \"$arg\""
    done
    export CMDLINE
    exec g.parser "$0" "$@"
fi

PROG=`basename $0`

# checks if base map exists
check_existence()
{
eval `g.findfile element=cell file=$1`
if [ -z "$name" ] ; then
   echo "ERROR: map <$1> not found."
   exit 1
fi
}

# Cleans temporary maps
cleanup()
{
    rm -f woodin.map woodout.map woodin.rul woodout.rul
    g.remove -f rast=counter,feature.$$,funfeature.$$, \
        sumfeaturescaleweight,halffunfuzzymemb,sumfuzzy --quiet
}

# What to do in case of user break
exitprocedure()
{
    echo "User break!"
    cleanup
    exit 1
}

# Shell check for user break (signal list: trap -l)
trap "exitprocedure" 2 3 15

# Applies color palette for feature maps
feature_color()
{
for map in "$@"; do
r.colors $map color=rules --q <<EOF
1 black
2 blue
3 cyan
4 green
5 yellow
6 orange
7 red
8 200:200:200
9 100:100:100
EOF
done
}

# Applies color palette for membership, confusion and scale maps
grey_color()
{
for map in "$@"; do
        r.colors -n $map color=grey --q
done
}
```

```
# Sets variables
MAP=$GIS_OPT_INPUT;S1=$GIS_OPT_S1;S2=$GIS_OPT_S2;C1=$GIS_OPT_C1;C2=$GIS_OPT_C2;
min_win=$GIS_OPT_MIN_SIZE;int_win=$GIS_OPT_INT_SIZE;max_win=$GIS_OPT_MAX_SIZE;
shape=$GIS_OPT_SHAPE;ct=$GIS_OPT_CONF_TOL;ms=$GIS_OPT_MIN_STABLE
n_win="`echo $max_win $min_win $int_win | awk '{printf("%f", ( $1 - $2 ) / $3 + 1);}'`"

# Sets the auxiliary text files that brings the configuration of the fuzzy system
fileoriginal=fuzzy_sets.txt;ruleoriginal=fuzzy_rules.txt

check_existence $MAP

# Sets initial working region
g.region rast=$MAP

############################## The main code ##############################
########### Generates single-scale fuzzy morphometric features ############
win=$min_win
while [ $win -le $max_win ]; do

# This portion generates temporary versions of the input rules and maps files
# in order to modify them.
        cat $fileoriginal > woodin.map
        filein=woodin.map
        fileout=woodout.map
        cat $ruleoriginal > woodin.rul
        rulein=woodin.rul
        ruleout=woodout.rul

        exp=2.718281828
        # The constant "line" relates to line spacing in the maps file and is used in
        # order to make sed's work easier.
        line=5
        # This for loop generates the crisp morphometric maps to serve as input for
        # the fuzzy system
        for i in slope crosc minic maxic; do
                outmap="${MAP}_${i}_${win}"
                r.param.scale input=$MAP output=$outmap size=$win param=$i --o
                        # Uses sed command to modify the temporary copies of the initial
                        # configuration files
                        sed "$line,$line s/$i/$outmap/g" $filein > $fileout
                        cat $fileout > $filein
                        sed "s/$i/$outmap/" $rulein > $ruleout
                        cat $ruleout > $rulein
                line="$(expr $line + 5)"
        done

        # This is only necessary for an apparent bug in "r.fuzzy.system" where a value
        #less than 0.0001 cannot be set
        crosc="${MAP}_crosc_${win}"
        r.mapcalc "$crosc=$crosc*10000"
        minic="${MAP}_minic_${win}"
        r.mapcalc "$minic=$minic*10000"
        maxic="${MAP}_maxic_${win}"
        r.mapcalc "$maxic=$maxic*10000"


        # Automatic parameterization of fuzzy sets
        slope="${MAP}_slope_${win}"
        Smean=$(r.univar -e $slope | grep "^mean: " | awk '{printf("%.5f", $2);}')
        perc1=$(echo $exp $Smean | awk '{printf("%.0f", (150*($1^(-$2/2)))+0);}')
        perc2=$(echo $exp $Smean | awk '{printf("%.0f", (150*($1^(-$2/2)))+100);}')
        S1=$(echo $Smean $perc1 | awk '{printf("%.5f", $1 * $2 / 100);}')
        S2=$(echo $Smean $perc2 | awk '{printf("%.5f", $1 * $2 / 100);}')
        perc1=$(echo $exp $Smean | awk '{printf("%.0f", (200*($1^(-$2/3)))+50);}')
        perc2=$(echo $exp $Smean | awk '{printf("%.0f", (200*($1^(-$2/3)))+150);}')
        r.mapcalc "cpos=if($crosc>=0,$crosc,null())"
        r.mapcalc "cneg=if($crosc<=0,abs($crosc),null())"
        Ccrosmeanp=$(r.univar -e cpos | grep "^mean: " | awk '{printf("%.7f", $2);}')
        Croscp1=$(echo $Ccrosmeanp $perc1 | awk '{printf("%.5f", $1 * $2 / 100);}')
        Croscp2=$(echo $Ccrosmeanp $perc2 | awk '{printf("%.5f", $1 * $2 / 100);}')
        Ccrosmeann=$(r.univar -e cneg | grep "^mean: " | awk '{printf("%.7f", $2);}')
```

```
        Croscn1=$(echo $Ccrosmeann $perc1 | awk '{printf("%.5f", $1 * $2 / 100);}')
        Croscn2=$(echo $Ccrosmeann $perc2 | awk '{printf("%.5f", $1 * $2 / 100);}')
        Minicn1=$Croscn1;Minicn2=$Croscn2;Minicn2=$Croscn2;Minicp1=$Croscp1;Minicp2=$Croscp2;
        Maxicn1=$Croscn1;Maxicn2=$Croscn2;Maxicp1=$Croscp1;Maxicp2=$Croscp2

        # This sed command writes the calculated parameters in the configuration files
        sed -e "s/S1/$S1/g" -e "s/S2/$S2/g" -e "s/Croscp1/$Croscp1/g" -e \
        "s/Croscp2/$Croscp2/g" -e "s/Croscn1/$Croscn1/g" -e "s/Croscn2/$Croscn2/g" -e \
        "s/Minicp1/$Minicp1/g" -e "s/Minicp2/$Minicp2/g" -e "s/Minicn1/$Minicn1/g" -e \
        "s/Minicn2/$Minicn2/g" -e "s/Maxicp1/$Maxicp1/g" -e "s/Maxicp2/$Maxicp2/g" -e \
        "s/Maxicn1/$Maxicn1/g" -e "s/Maxicn2/$Maxicn2/g" -e "s/shape/$shape/g" $filein > $fileout
        cat $fileout > $filein

        # Sets the names for the fuzzy feature membership maps and writes them in the
        # configuration files
        outfuzzy="X${MAP}_fuzzy_${win}"
        sed "$line,$line s/output/$outfuzzy/g" $filein > $fileout

        # The fuzzy system calculates fuzzy feature membership maps
        r.fuzzy.system -m maps=$fileout rules=$ruleout output=$outfuzzy --o

        # Defuzzification using the maximum operator
        outfeature="X${MAP}_fuzzyfeature_${win}"
        outmember="X${MAP}_maxmembership_${win}"
        r.series input="`g.mlist pattern=${outfuzzy}_* sep=,`" output=feature.$$, \
                        $outmember method=max_raster,maximum --o --q
        r.recode input=feature.$$ output=$outfeature rules=recoderules.txt --o --q

        # Creates blank maps to store the second feature map and second largest fuzzy
        # membership map
        outfeature2="X2${MAP}_fuzzyfeature_${win}"
        outmember2="X2${MAP}_maxmembership_${win}"
        r.mapcalc $outfeature2=0
        r.mapcalc $outmember2=0

        # This for loop finds the second feature map and second largest fuzzy membership map
        id=1
        for i in pit channel schannel pass ridge sridge peak plane splane; do
                r.mapcalc "$outfeature2=if("${outfuzzy}_${i}">$outmember2 && \
                          "${outfuzzy}_${i}"<$outmember,$id,$outfeature2)"
                r.mapcalc "$outmember2=if("${outfuzzy}_${i}">$outmember2 && \
                          "${outfuzzy}_${i}"<$outmember,"${outfuzzy}_${i}",$outmember2)"
                id="$(expr $id + 1)"
        done
        r.mapcalc "$outfeature2=if($outfeature2>0,$outfeature2,null())"

        # Calculates confusion index map
        confusion="X${MAP}_confusion_${win}"
        r.mapcalc "$confusion=1-($outmember-$outmember2)"

        # Applies color palettes to rasters
        feature_color $outfeature $outfeature2
        grey_color $outmember $outmember2 $confusion

        win="$(expr $win + $int_win)"

done

###################### Generates maximum scale map ########################
# Creates blank maps to store the maximum scales and to serve as a counter
maxscale="X${MAP}_maxscale_${max_win}"
r.mapcalc $maxscale=0
r.mapcalc counter=0

# Finds the local maximum scales of analysis
max_win2="$(expr $max_win - $int_win)"
win=$min_win
while [ $win -le $max_win2 ]; do
        win2="$(expr $win + $int_win)"
        outfeature="X${MAP}_fuzzyfeature_${win}"
        outfeature2="X${MAP}_fuzzyfeature_${win2}"
        confusion1="X${MAP}_confusion_${win}"
```

```
        confusion2="X${MAP}_confusion_${win2}"
        r.mapcalc "counter=if($outfeature!=8 && $confusion1<$ct,counter+1,0)"
        r.mapcalc "$maxscale=if($win==$max_win2 && $maxscale==0,$win2, \
                        if($confusion2>=$ct && $confusion1<$ct && $maxscale==0 \
                           && counter>=$ms,$win, \
                        if($outfeature2==8 && $maxscale==0 && $outfeature!=8, \
                           $win,$maxscale)))"
        win="$(expr $win + $int_win)"
done

################# Generates the fundamental feature map ##################
# This for loop calculates sum of maximum memberships up to the maximum scale of
# analysis for every feature.
id=1
for i in pit channel schannel pass ridge sridge peak plane splane; do
        maxscale="X${MAP}_maxscale_${max_win}"
        sumfeaturefuzzymemb="X${MAP}_sumfeaturefuzzymemb_${i}_${max_win}"
        featurefuzzymemb="X${MAP}_featurefuzzymemb_${i}_${max_win}"
        r.mapcalc $sumfeaturefuzzymemb=0
        r.mapcalc $featurefuzzymemb=0
        r.mapcalc "sumfeaturescaleweight=(($max_win-$min_win)/$int_win)+1"
        win=$min_win
        while [ $win -le $max_win ]; do
                outfeature="X${MAP}_fuzzyfeature_${win}"
                outmember="X${MAP}_maxmembership_${win}"
                r.mapcalc "$sumfeaturefuzzymemb=if($outfeature==$id && $win<=$maxscale, \
                           $sumfeaturefuzzymemb+$outmember,$sumfeaturefuzzymemb)"
                win="$(expr $win + $int_win)"
        done
        r.mapcalc "$featurefuzzymemb=if(sumfeaturescaleweight!=0,($sumfeaturefuzzymemb \
                                    / sumfeaturescaleweight),0)"
        grey_color $featurefuzzymemb
        id="$(expr $id + 1)"
done

# Multi-scale defuzzification using the maximum operator
funfeature="X${MAP}_fundamentalfeature_${max_win}"
funfeaturefuzzymemb="X${MAP}_funfeaturefuzzymemb_${max_win}"
r.series input="`g.mlist pattern=X${MAP}_featurefuzzymemb_* sep=,`" output=funfeature.$$, \
                $funfeaturefuzzymemb method=max_raster,maximum --o --q
r.recode input=funfeature.$$ output=$funfeature rules=recoderules.txt --o --q

# Creates blank maps to store the second fundamental feature map and second largest
# multi-scale fuzzy membership map
funfeature2="X2${MAP}_fundamentalfeature_${max_win}"
funfeaturefuzzymemb2="X2${MAP}_funfeaturefuzzymemb_${max_win}"
r.mapcalc $funfeature2=0
r.mapcalc $funfeaturefuzzymemb2=0

# This for loop finds the second fundamental feature map and second largest multi-scale
# fuzzy membership map
id=1
for i in pit channel schannel pass ridge sridge peak plane splane; do
        featurefuzzymemb="X${MAP}_featurefuzzymemb_${i}_${max_win}"
        r.mapcalc "$funfeature2=if($featurefuzzymemb>$funfeaturefuzzymemb2 && \
                   $featurefuzzymemb<$funfeaturefuzzymemb,$id,$funfeature2)"
        r.mapcalc "$funfeaturefuzzymemb2=if($featurefuzzymemb>$funfeaturefuzzymemb2 \
                   && $featurefuzzymemb<$funfeaturefuzzymemb, \
        $featurefuzzymemb,$funfeaturefuzzymemb2)"
        id="$(expr $id + 1)"
done

# Calculates multi-scale confusion index map
funconfusion="X${MAP}_funconfusion_${max_win}"
r.mapcalc "$funconfusion=1-($funfeaturefuzzymemb-$funfeaturefuzzymemb2)"

################# Generates the fundamental scale map ##################
# Generates a raster with half the multiscale fuzzy memberships
r.mapcalc "halffunfuzzymemb=$funfeaturefuzzymemb * sumfeaturescaleweight / 2"

# Creates blank maps to store the maximum scales and to serve as a counter
scale="X${MAP}_fundamentalscale_${max_win}"
```

```
r.mapcalc $scale=0
r.mapcalc counter=0
r.mapcalc sumfuzzy=0

        # Finds the local fundamental scales of analysis
        win=$min_win
        while [ $win -le $max_win ]; do
                confusion="X${MAP}_confusion_${win}"
                outfeature="X${MAP}_fuzzyfeature_${win}"
                outmember="X${MAP}_maxmembership_${win}"
                r.mapcalc "sumfuzzy=if($outfeature==$funfeature,sumfuzzy+$outmember,sumfuzzy)"
                r.mapcalc "$scale=if(sumfuzzy>=halffunfuzzymemb && $scale==0,$win,$scale)"
                r.mapcalc "counter=if($outfeature==$funfeature && $win<=$maxscale,counter+1, \
                        counter)"
                win="$(expr $win + $int_win)"
        done

# Applies color palettes to rasters
feature_color $funfeature $funfeature2
grey_color $maxscale $funfeaturefuzzymemb $funfeaturefuzzymemb2 $funconfusion $scale
cleanup
```

APÊNDICE B – Arquivo de configuração dos conjuntos fuzzy (fuzzy_sets.txt)

```
#fuzzy_sets.txt



        %slope
$ flat {right; S1,S2; shape; 0; 1}
$ steep {left; S1,S2; shape; 0; 1}



        %crosc
$ concave {right; -Croscn2,-Croscn1; shape; 0; 1}
$ planar {both; -Croscn2,-Croscn1,Croscp1,Croscp2; shape; 0; 1}
$ convex {left; Croscp1,Croscp2; shape; 0; 1}

        %minic
$ concave {right; -Minicn2,-Minicn1; shape; 0; 1}
$ planar {both; -Minicn2,-Minicn1,Minicp1,Minicp2; shape; 0; 1}
$ convex {left; Minicp1,Minicp2; shape; 0; 1}

        %maxic
$ concave {right; -Maxicn2,-Maxicn1; shape; 0; 1}
$ planar {both; -Maxicn2,-Maxicn1,Maxicp1,Maxicp2; shape; 0; 1}
$ convex {left; Maxicp1,Maxicp2; shape; 0; 1}

        %output
$ pit {right; 1,1; shape; 1;1}
$ channel {right; 2,2; shape; 1;1}
$ schannel {right; 2.5,2.5; shape; 1;1}
$ pass {right; 3,3; shape; 1;1}
```

$ ridge {right; 4,4; shape; 1;1}

$ sridge {right; 4.5,4.5; shape; 1;1}

$ peak {right; 5,5; shape; 1;1}

$ plane {right; 6,6; shape; 1;1}

$ splane {right; 6.5,6.5; shape; 1;1}

APÊNDICE C – Arquivo de configuração das regras fuzzy (fuzzy_rules.txt)

```
#fuzzy_rules.txt
$ pit {slope = flat & maxic = concave & minic = concave};
$ channel {slope = flat & maxic = planar & minic = concave};
$ schannel {slope = steep & crosc = concave};
$ pass {slope = flat & maxic = convex & minic = concave};
$ ridge {slope = flat & maxic = convex & minic = planar};
$ sridge {slope = steep & crosc = convex};
$ peak {slope = flat & maxic = convex & minic = convex};
$ plane {slope = flat & maxic = planar & minic = planar};
$ splane {slope = steep & crosc = planar};
```

Análise geomorfométrica multiescala de modelos numéricos de terreno

Marcello Antonio Ventura Gorini
Guilherme Lucio Abelha Mota

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rua São Francisco Xavier 524, Maracanã, Rio de Janeiro, CEP: 20550-900, RJ, Brasil
gorini@gmail.com, guimota@ime.uerj.br

Abstract. The world we live in and its complex landscapes result from the combined action of a multitude of processes operating in diverse temporal and spatial scales. In order to grasp the multi-scale character of such surfaces through digital terrain analysis, specific methods are needed to incorporate scale effects and ideally identify fundamental scales of the relief. The present paper introduces one such method based on the fuzzification of Wood's 1996 classification system for morphometric feature extraction. Through the analysis of the scale tendency of feature fuzzy memberships, local maximum scales of calculation are identified, yielding a classification of the fundamental features and scales of a digital elevation model (DEM). We develop and apply the method to a portion of the ocean floor offshore the northeastern United States using a GEBCO_08 1,000 meter grid. The results show that the multi-scale feature map thus derived has a number of advantages with respect to Wood's original method, such as greater preservation of geomorphological information content, unsupervised constraining of the scales used and associated fundamental scale map. The scale map, in turn, has a number of possible applications that can lead to improved geomorphometric parameterization of surfaces, as well as to more complete frameworks for unsupervised landform classification systems.

Palavras-chave: fuzzy logic, scale tendency, morphometric features, Wood, lógica fuzzy, tendência de escala, feições morfométricas, Wood

1. Introdução

O mundo em que vivemos e suas complexas paisagens só são assim percebidos devido à nossa habilidade natural de acessar múltiplas escalas de uma só vez. Escalas espaciais e temporais de diversas magnitudes agem conjuntamente para esculpir as superfícies geomorfológicas nas formas e contornos que podemos ver. Por outro lado, o que realmente somos capazes de ver depende dos nossos objetivos em relação a essas superfícies e da nossa habilidade de extrair informações pertinentes delas. No contexto da geomorfometria – a análise quantitativa das superfícies topográficas – essas informações são normalmente extraídas de Modelos Numéricos de Terreno (MNTs) através de uma gama de métodos de análise digital de terreno. De forma a arrecadar o máximo de informações possíveis dessas superfícies multiescala, o analista deve enfrentar a difícil (porém necessária) tarefa de escolher um número limitado de escalas para analisar ou algum tipo de sumário estatístico multiescala das variáveis em estudo. Contudo, esse tipo de escolha é normalmente não só arbitrária e subjetiva, como também suscetível a significativa perda de informações. Essa escolha raramente é um bom comprometimento entre o que existe para ser visto e o que simplesmente queremos ver.

O esforço de acessar o caráter multiescala de MNTs é ainda mais complicado se considerarmos o principal problema em geomorfometria, segundo Evans (1972) – o fato de que todas as medidas variam com a escala de análise. Escala, nesse contexto, pode ser definida como a combinação de duas características: a *resolução* do dado e a *extensão espacial* da análise. Goodchild e Quattochi (1997) explicam que variando-se uma ou ambas essas características, o valor do parâmetro medido tende a mudar, apresentando um efeito chamado de *tendência de escala*. Qualquer tentativa de se descrever completamente uma superfície deve então considerar sua inerente tendência de escala em um esforço de identificar escalas críticas ou dominantes, onde quebras significativas na tendência ocorrem. Esse procedimento, contudo, não é óbvio ou direto e, apesar de muito já ter sido escrito sobre o assunto como os trabalhos de Gallant e Hutchinson (1997), Schmidt e Andrew (2005), Dragut et al. (2009) e Behrens et al. (2009), ainda há a necessidade de metodologias robustas para a identificação de tais escalas, especialmente de forma automatizada.

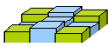
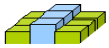
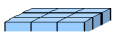
O presente trabalho tem como objetivo identificar essas escalas - aqui chamadas de *escalas fundamentais*. Trabalhamos com a hipótese de que n*ão há razão geral para se medir uma propriedade em uma escala discrepante da escala da feição geomorfológica local.* Essa premissa

simples nos oferece uma estrutura metodológica robusta para a identificação das escalas fundamentais: primeiro, devemos identificar as *feições fundamentais* do relevo e então obter as escalas mais características de tais feições. Para tanto, utilizamos uma abordagem que tem como base o método de extração de feições morfométricas de Wood (1996), porém o desenvolve em um número de maneiras através da utilização de Lógica Fuzzy e da análise detalhada da tendência de escala das feições morfométricas. O resultado é a geração não só de um mapa de escalas fundamentais, como também um mapa de feições morfométricas mais rico em informações. Nós avaliamos no decorrer do trabalho se esse tipo de análise pode eventualmente contribuir para o desenvolvimento de abordagens multiescala mais completas e objetivas do que as atualmente disponíveis na literatura.

2. O método de Wood

Wood (1996) criou um sistema de classificação que subdivide uma superfície em seis tipos de feições morfométricas - *fossas, picos, canais, cristas, passos* e *planos.* Esse sistema, conforme apresenta a Tabela 1, é baseado em quatro parâmetros geomorfométricos – *gradiente, curvatura transversal, máxima e mínima* - combinados através de nove regras. As regras, por sua vez, utilizam limiares *crisp* que identificam o menor gradiente para que uma superfície seja considerada íngreme e a menor curvatura para que ela seja considerada convexa ou côncava.

Tabela 1: Sistema de classificação de Wood (1996) para a extração de feições morfométricas. "X" significa que o parâmetro não é utilizado na classificação.

	Fossa	**Canal**		**Passo**	**Crista**		**Pico**	**Plano**	
									
Gradiente	horizontal	horizontal	íngreme	horizontal	horizontal	íngreme	horizontal	horizontal	íngreme
Curvatura transversal	X	X	côncava	X	X	convexa	X	X	planar
Curvatura mínima	côncava	côncava	X	côncava	planar	X	convexa	planar	X
Curvatura máxima	côncava	planar	X	convexa	convexa	X	convexa	planar	X

Com o objetivo de incorporar os efeitos da escala em suas análises, Wood (1996) isola os componentes da escala, fixando a resolução do MNT e variando o tamanho da janela local utilizada no cômputo das variáveis geomorfométricas. Dessa maneira, ele consegue estabelecer graficamente a tendência de escala não só dos parâmetros geomorfométricos, como também de feições morfométricas.

No caso das feições morfométricas, Wood sumariza os efeitos da escala através de um mapa modal, ou seja, um mapa contendo a feição que mais se repete ao longo das escalas estudadas. No entanto, Fisher et al. (2004) apontam um número de limitações que persistem no método:

- limiares de gradiente e curvatura devem ser arbitrados pelo analista;
- a escala máxima de análise, ou seja, o tamanho máximo da janela local utilizada, também é arbitrada pelo analista, e;
- o cálculo assume pesos idênticos para todas as escalas de análise.

Além disso, há uma crescente planificação do mapa morfométrico resultante com o aumento da escala, ocasionando uma perda crescente de informações e uma constante mudança do mapa modal de acordo com a escala máxima utilizada. A metodologia proposta tem como objetivo minimizar essas limitações, modificando o algoritmo original de forma a obter as feições e escalas fundamentais do terreno.

3. Metodologia Proposta

3.1 Fuzzificação das Feições Morfométricas

A primeira etapa do trabalho foi então *fuzzificar* o sistema de Wood (1996). Segundo Fisher (2000b) e Fisher et al. (2004), a Lógica Fuzzy se adapta bem à modelagem da natureza vaga das formas topográficas, permitindo a representação de conceitos conflitantes como por exemplo, *horizontal* e *íngreme*, a partir de conjuntos fuzzy, conforme apresenta a Figura 1. Assim, um mesmo local pode, simultaneamente, ser considerado horizontal e íngreme, mas com graus de pertinência diferentes. Estendendo-se esse princípio para o sistema de classificação morfométrica, temos que um mesmo local pode apresentar diferentes graus de pertinência a mais de um tipo de feição. Isso possibilita uma análise muito mais detalhada da tendência de escala das feições morfométricas, como veremos na seção 3.2.

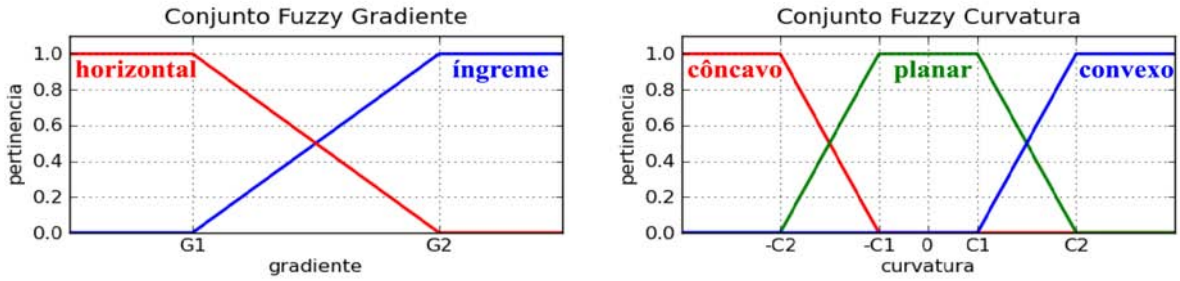


Figura 1. Conjuntos fuzzy que substituem os limiares *crisp* da abordagem original.

O sistema fuzzy proposto utiliza as mesmas regras que o método original de Wood, porém, cada regra resulta em uma classe distinta, ou seja, *canais*, *cristas* e *planos* que eram individualmente gerados por duas regras, agora dividem-se em duas sub-classes: uma classe *horizontal* e uma classe *íngreme*, como pode ser percebido na Tabela 1.

No sistema, os antecedentes das regras são combinados através do operador fuzzy *E* que corresponde à definição *t-norm mínimo*. A fim de exemplificar este procedimento, a Equação 1 apresenta o cálculo do consequente da regra fuzzy associada à classe morfométrica *crista íngreme*.

$$\mu_{crista\ ingreme}(grad(s), ctransv(s), s) = \min[\mu_{ingreme}(grad(s)), \mu_{convexo}(ctransv(s))] \quad (1)$$

onde *grad*(*s*) e *ctransv*(*s*) correspondem respectivamente aos valores das variáveis morfométricas gradiente e curvatura transversal medidas numa determinada escala *s* enquanto $\mu_{íngreme}$ e $\mu_{convexo}$ representam as pertinências aos conceitos nebulosos *íngreme* e *convexo*.

No presente trabalho, a agregação dos consequentes produzidos pelas regras fuzzy é feita através do *s-norm máximo*. Este procedimento é apresentado na equações (2) e (3).

$$\mu_{feição}(s) = \max_{\forall i \in \Omega}[\mu_i(grad(s), ctranv(s), cmin(s), cmax(s))] \quad (2)$$

$$feição(s) = \arg\max_{\forall i \in \Omega}[\mu_i(grad(s), ctranv(s), cmin(s), cmax(s))] \quad (3)$$

onde $\mu_{feição}(s)$ é a pertinência máxima obtida em cada escala, *feição*(*s*) é a feição extraída e Ω é o conjunto que compreende as nove classes de feições morfométricas.

3.2 Definição da Escala Máxima de Análise

Aplicando-se o sistema a crescentes escalas de análise, podemos analisar graficamente a variação das pertinências fuzzy, ou seja, a tendência de escala de cada uma das nove feições morfométricas, conforme apresenta a porção superior da Figura 2. As pertinências variam em um padrão ondulatório como se buscassem por escalas onde a pertinência máxima, ou seja, aquela referente à feição extraída em uma dada escala, seja consideravelmente maior que as pertinências secundárias, conferindo um caráter estável à classificação. Essa estabilidade pode, então, ser medida, nos oferecendo um critério objetivo para a definição da escala máxima local de análise: é a escala onde a estabilidade é perdida pela primeira vez.

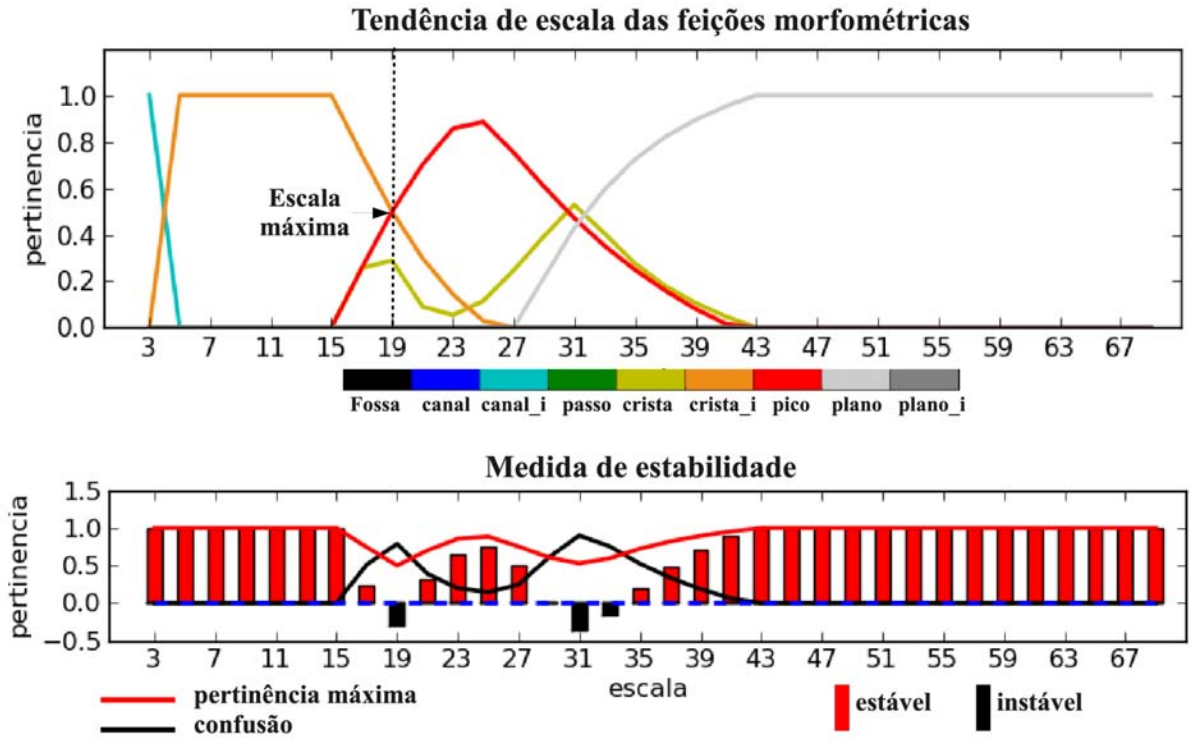


Figura 2. Definição da escala máxima local de análise. Acima, vê-se o padrão ondulatório das pertinências fuzzy das feições morfométricas. Abaixo, uma medida de estabilidade é introduzida para identificar a primeira escala onde a estabilidade é perdida (linha preta tracejada).

A ideia conceitual é permitir que ao menos uma feição estável seja extraída, sem no entanto, expandir demasiadamente a escala de análise, incorrendo em grande tempo de processamento e na obtenção de feições não tão significativas. Para o cálculo da estabilidade, a Equação 4 introduz uma medida diferente do índice de confusão utilizado em trabalhos como o de Burrough et al. (1997).

$$ME(s) = \arg\max_{\forall i \in \Omega} \mu_i(s) - \sum_{\forall i \in \left\{ \Omega - \arg\max_{\forall i \in \Omega} \mu_i(s) \right\}} \mu_i(s) \quad (4)$$

A porção inferior da Figura 2 demonstra graficamente os componentes da Equação 4. A medida de estabilidade *ME* (barras pretas e vermelhas) é obtida a partir da diferença entre a pertinência máxima *arg max* $\mu_i(s)$ (linha vermelha) e a soma das pertinências secundárias $\mu_i(s)$ (linha preta). Quando a linha preta corta a linha vermelha para cima, a medida de estabilidade torna-se negativa (barras pretas) e considera-se, então, que a estabilidade foi perdida. Dessa forma, a medida *ME* apresenta um limiar de estabilidade implícito e não arbitrado pelo analista. A escala onde a medida torna-se negativa é, então, definida como a escala máxima local de análise (linha preta tracejada).

Além disso, ainda usando o exemplo da Figura 2, caso a estabilidade não fosse perdida, a escala máxima seria definida como aquela onde uma feição *plano horizontal* é extraída pela primeira vez, no caso, a escala 33x33. Essa restrição é necessária porque com o aumento da escala, eventualmente uma feição *plano horizontal* será sempre extraída, causando um efeito de planificação indesejável (como demonstrado na Figura 7). Dessa forma, partimos do princípio que toda feição morfométrica verdadeiramente plana deve ser composta por outras feições planas de menor escala espacial, caso contrário, representa a obliteração de feições morfométricas não-planas locais. Assim, independentemente da perda de estabilidade ocorrer, definimos a escala onde uma feição *plano horizontal* é extraída como o limite máximo local de análise.

3.3 Obtenção das Feições e Escalas Fundamentais

A partir do agora restrito conjunto de escalas consideradas localmente, deve-se obter algum tipo de sumário estatístico das feições extraídas de forma a definir a feição fundamental. Wood utiliza a moda estatística, ou seja, ele identifica a feição que mais se repete ao longo das escalas

consideradas. Para esse cálculo, ele atribui pesos iguais para cada escala. A presente abordagem explora a utilização de pesos diferenciais para cada escala, buscando harmonizar os efeitos (i) da imprecisão dos dados, os quais normalmente apresentam ruído, levando à extração de feições errôneas em escalas pequenas; e (ii) da limitação do próprio método, o qual extrai feições que representam cada vez mais aproximações do relevo real à medida que a escala aumenta. A Figura 3 mostra a função *peso de escala* considerada. Como escala máxima para a construção de tal função, utilizou-se o limite operacional do software empregado (69x69 células).

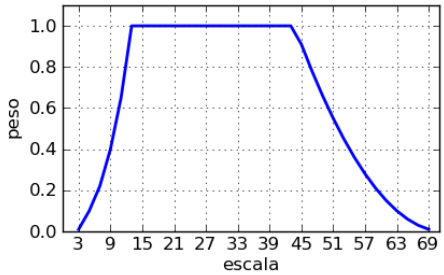
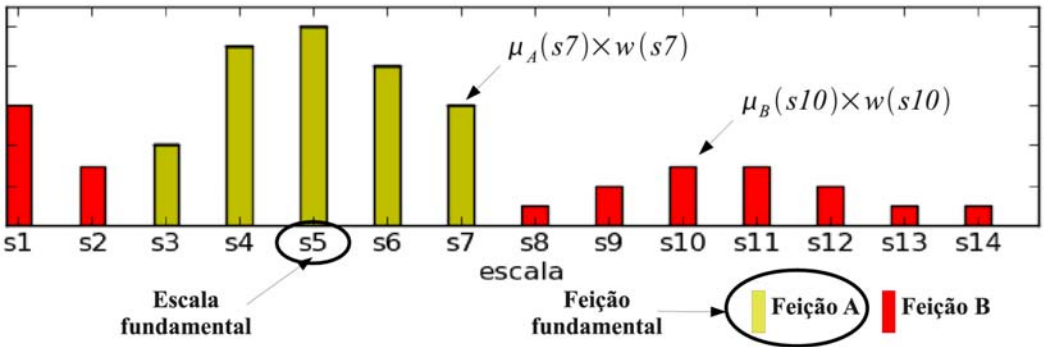


Figura 3. Função *peso de escala*.

A Figura 4 demonstra gráfica e numericamente a obtenção da feição e da escala fundamental. Inicialmente, obtém-se, a partir da Equação 5, funções discriminantes, g_i, equivalentes à soma das pertinências fuzzy de cada feição i ponderadas pelo peso w em todas as escalas s em que a feição é encontrada. A Equação 6 define então a feição fundamental j como aquela que apresenta o maior valor de g_i. Note que esta não é necessariamente a feição que mais se repete ao longo das escalas. No exemplo esquemático da Figura 4, a feição A é extraída menos vezes que a feição B, no entanto, apresenta a maior soma ponderada de pertinências, sendo considerada a feição fundamental. Por sua vez, a escala fundamental corresponde ao centróide de todas as escalas onde a feição fundamental foi extraída.



$$g_i = \sum_{\forall s \in S} \mu_i(s) \times w(s) \quad \Rightarrow \text{Soma ponderada das pertinências} \tag{5}$$

$$j = \arg\max_{\forall i \in \Omega} g_i \quad \Rightarrow \text{Feição fundamental} \tag{6}$$

$$centróide\left(\mu_j(s)\right) \quad \Rightarrow \text{Escala Fundamental} \tag{7}$$

Figura 4. Esquema demonstrativo do cálculo das feições e escalas fundamentais a partir das pertinências fuzzy das feições morfométricas ponderadas pelo peso de escala.

4. Procedimento Experimental

4.1 Área de Estudo

A metodologia e os resultados aqui apresentados foram desenvolvidos utilizando-se um MNT extraído da base global de dados topográficos do fundo dos oceanos GEBCO_08 (*"General Bathymetric Charts of the Oceans"*) com resolução de trinta segundos do arco. O MNT foi reinterpolado para uma resolução de mil metros em projeção Mercator e representa uma porção do

setor nordeste da margem continental dos Estados Unidos, desde o Banco George ao norte até o Canyon Hudson ao sul, conforme apresenta a Figura 5. A região é uma típica margem passiva, ou do tipo atlântico, apresentando plataforma, talude e elevação continentais bem desenvolvidos e é uma das regiões mais bem estudadas do mundo. A área de estudo engloba ainda parte dos montes submarinos que formam a Cadeia de New England e parte da planície abissal de Sohm.

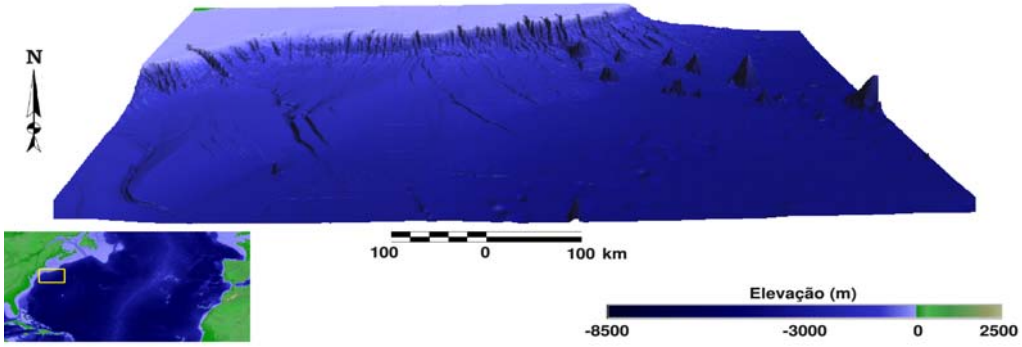


Figura 5. Área de estudo – setor nordeste da margem continental dos Estados Unidos.

4.2 Resultados e Discussão

A Figura 6 apresenta o resultado principal da metodologia, na forma de um mapa de feições fundamentais e um mapa de escalas fundamentais. Apesar de a análise ter englobado todas as escalas desde 3x3 até 69x69, a legenda do mapa de escalas nos mostra que a maior escala fundamental obtida foi 43x43, demonstrando a extensão máxima significativa de uma janela local que deve ser aplicada à área de estudo. Comparando-se ambos os mapas, podemos notar, por exemplo, que todo o ruído do dado original (como listras paralelas devido aos levantamentos originais de batimetria multi-feixe) foi claramente identificado no mapa de escalas (tons de cinza claro), porém não constam do mapa de feições, graças ao uso da função *peso de escala*. Note também que montes submarinos maiores apresentam tonalidades progressivamente mais escuras, demonstrando escalas fundamentais coerentemente maiores. Grandes feições lineares como a quebra da plataforma e a base do talude continental também apresentam tonalidades mais escuras, mostrando que apesar de o método não levar em consideração a anisotropia do relevo, tais feições foram corretamente identificadas como persistentes por várias escalas de análise.

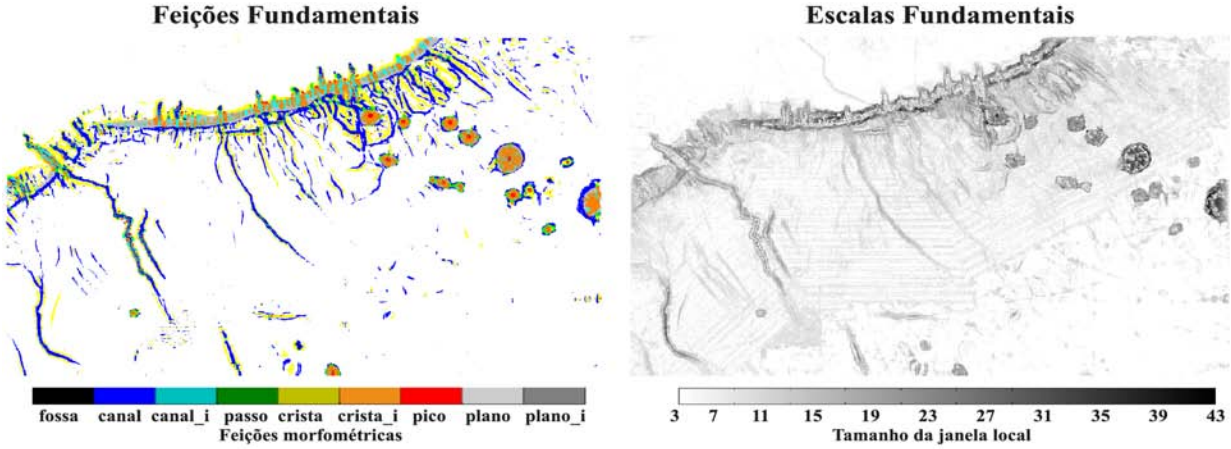


Figura 6. Mapa de feições morfométricas fundamentais e mapa de escalas fundamentais.

A Figura 7 traz mapas de feições morfométricas modais produzidos com a abordagem original de Wood a partir de diferentes escalas máximas. O mapa modal 69x69 leva em consideração as mesmas escalas utilizadas na presente abordagem e demonstra o efeito deletério da planificação das feições quando escalas muito grandes são consideradas. Quase todas as feições são obliteradas, restando apenas os montes submarinos mais proeminentes e pequenas porções do talude continental. Se utilizarmos escalas máximas menores como 49x49 ou mesmo 29x29, a planificação

ainda é grande. Mesmo no mapa 29x29, nota-se uma continuidade bem menor dos canyons submarinos existentes na área, até mesmo deixando escapar por completo uma grande feição como o Canyon do Higrógrafo. Note que esta feição foi identificada na Figura 6, no mapa de feições fundamentais, produzido pelo método proposto.

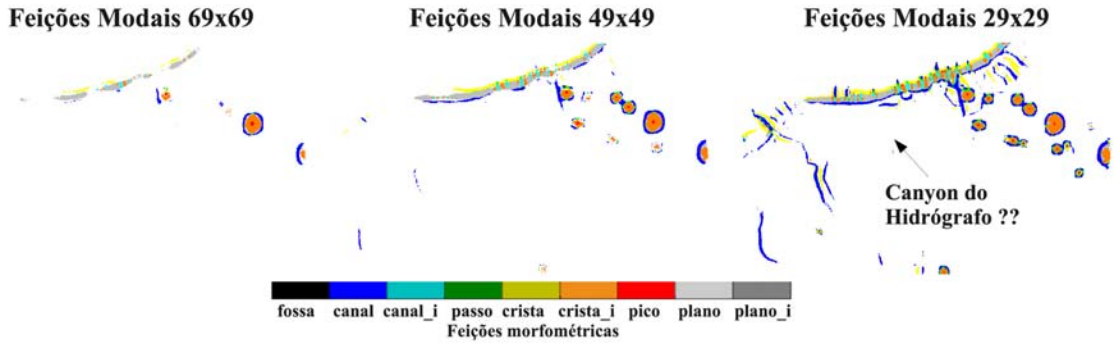


Figura 7. Mapas de feições morfométricas modais obtidos a partir do método original de Wood (1996) utilizando-se diferentes escalas máximas de análise.

Se variarmos a escala máxima de análise desde 3x3 até 69x69 e gerarmos os respectivos mapas modais de Wood, eventualmente identificaremos aquele que melhor representa a área de estudo. A opinião dos autores é que este mapa seria o referente à escala 19x19, cuja visualização em três dimensões é encontrada na Figura 8 (à esquerda). Podemos notar que a grande maioria das feições importantes foi extraída. Comparando-o com o mapa fundamental (à direita), notam-se grandes semelhanças. No entanto, enquanto a decisão pelo mapa modal em questão demandou uma laboriosa apreciação subjetiva de trinta e quatro mapas, o mapa fundamental foi obtido de maneira automática e não-supervisionada, ainda assim sendo capaz de captar grande parte da estrutura geomorfológica inerente ao relevo da área.

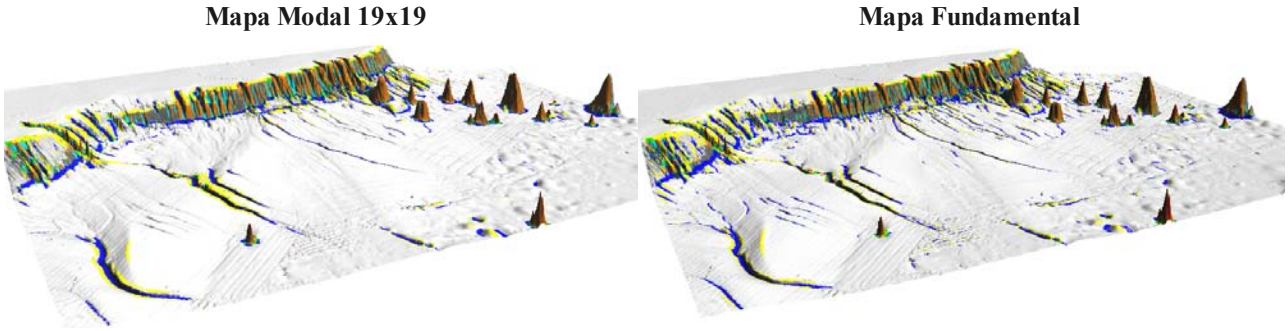


Figura 8. Visualização em três dimensões do melhor mapa modal (19x19) e do mapa fundamental.

Os testes preliminares realizados sugerem que o método apresentou avanços na direção de uma descrição mais fiel de MNTs, captando feições formadas em diferentes situações geomórficas e com diversas escalas de expressão no relevo. No entanto, algumas limitações ainda persistem. Por exemplo, uma das maiores utilidades na detecção de escalas é eventualmente produzir melhores representações paramétricas. Para isso, é interessante que as escalas a serem usadas no cálculo de parâmetros geomorfométricos reduzam-se em áreas rugosas onde há mais detalhes importantes e ampliem-se em áreas mais monótonas. No entanto, o mapa de escala denota escalas muito pequenas em todas as regiões caracterizadas por feições planas, onde o relevo é notoriamente suave. Isso é coerente para o processo de extração de feições e demanda um tempo de processamento mais baixo, porém, tal mapa não é o ideal na produção de parâmetros geomorfométricos multiescala.

Outro inconveniente refere-se à criação dos conjuntos fuzzy que modelam os conceitos *horizontal*, *íngreme*, *côncavo*, *convexo* e *plano*. Assim como na definição dos limiares utilizados no método original de Wood, no presente trabalho, os conjuntos são definidos manualmente. Contudo, em função de características específicas do MNT sob análise, como, por exemplo, sua resolução espacial, ou das características geomorfológicas da área em estudo, os parâmetros e as formas do

conjuntos fuzzy podem vir a demandar ajustes. Por outro lado, a função *peso de escalas* utilizada mostrou-se bastante genérica e transferível, reforçando, juntamente com a definição automática das escalas máximas de análise, o caráter promissor dos resultados ora obtidos e encorajando a continuidade da pesquisa por novas representações multiescala de modelos numéricos de terreno.

4. Conclusão

O trabalho objetivou estudar a natureza multiescala de modelos numéricos de terreno em uma tentativa de identificar suas escalas fundamentais. Partindo do princípio que tais escalas devem corresponder às feições fundamentais do relevo, a abordagem proposta corresponde a uma versão fuzzy do método de extração de feições morfométricas de Wood (1996). Apesar das limitações que ainda persistem, considera-se que o resultado foi promissor, uma vez que o mapa de feições fundamentais foi produzido de forma não supervisionada e apresentou um conteúdo geomorfológico ainda mais completo do que mapas modais de Wood, aparentemente captando melhor a estrutura multiescala do relevo. O mapa de escalas fundamentais, por sua vez, foi capaz de caracterizar desde ruídos até grandes feições fisiográficas, sugerindo inúmeras aplicações possíveis. Dentre elas, destacam-se a obtenção de mapas paramétricos multiescala que melhor reflitam a estrutura topográfica e a possibilidade de se caracterizar diferentes tipos de terreno e/ou feições fisiográficas a partir de sua tendência de escala. Esperamos que métodos como esse possam eventualmente levar a estudos mais completos do ponto de vista geomorfológico do que abordagens restritas à escala inerente à resolução do dados ou a uma escala arbitrária apenas.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à fundação de amparo à pesquisa do estado do Rio de Janeiro (Faperj) pelo apoio financeiro fornecido ao projeto IOBAC; e a todos os pesquisadores citados no presente trabalho, cujas realizações foram nossa fonte de inspiração.

6. Referências Bibliográficas

Behrens, T.; Zhu, A.; Schmidt, K.; Scholten, T. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. **Geoderma**, 10258, pp. 11, 2009.

Burrough, P.A.; van Gaans, P.F.M.; Hootsmans, R. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries . **Geoderma**, v. 77, p. 115-135, 1997.

Dragut, L.; Schauppenlehner, T.; Muhar, A.; Strobl, J.; Blaschke, T. Optimization of scale and parametrization for terrain segmentation: An application to soil-landscape modeling. **Computers & Geosciences**, v. 35, p.1875-1883, 2009.

Evans, I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. In **Spatial Analysis in Geomorphology**. London, Harper & Row, 1972. pp. 17–90.

Fisher, P. F. Sorites paradox and vague geographies . **Fuzzy Sets and Systems**, v. 113, p. 7–18, 2000b.

Fisher, P.; Wood, J.; Cheng, T. Where is Helvellyn? Fuzziness of multiscale landscape morphometry. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 29, n. 1, p. 106–128, 2004.

Gallant, J.C.; Hutchinson, M.F. Scale dependence in terrain analysis. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 43, p. 313-321, 1997.

Goodchild, M.F.; Quattrochi, D.A. Scale, multiscaling, remote sensing and GIS. In: Goodchild, M.F.; Quattrochi, D.A. (Eds.). **Scale in Remote Sensing and GIS**. London, CRC Press, 1997. p. 1-11.

Schmidt, J.; Andrew, R. Multi-scale landform characterization. **Royal Geographical Society (with The Institute of British geographers)**, v. 37, n. 3, p. 341-350, 2005.

The GEBCO_08 Grid, version 20100927, http://www.gebco.net

Wood, J. The geomorphological characterisation of digital elevation models. 1996. Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Leicester, Leicester, UK.

Which is the best scale? Finding fundamental features and scales in DEMs

Marcello A.V. Gorini
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rio de Janeiro, Brazil
gorini@gmail.com

Guilherme Lucio Abelha Mota
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rio de Janeiro, Brazil
guimota@ime.uerj.br

Abstract—**A method is presented to explicitly incorporate scale in geomorphometric analyses. It is based on Wood's 1996 method for morphometric feature extraction, but enhances it by fuzzifying its extraction function, automatically parameterizing it and locally limiting the maximum scale of analysis. As a result, maps of *fundamental features and scales* are produced, which describe well the overall topography of DEMs, as well as its multi-scale nature. The method was applied to diverse DEMs and compared to fixed-scale and modal feature approaches. Multi-scale geomorphometric variables were also produced and evaluated. The results suggest that the method allows thorough unsupervised geomorphometric characterizations of DEMs, stimulating further research.**

I. Introduction

It is widely accepted that a single scale of analysis is insufficient for accurate description or characterization of a landscape [1]. In terms of geomorphometry, this multi-scale character is even more emphasized by the fact that all measures vary with the scale of analysis [2], thus, exhibiting a scale tendency. If parameters and objects vary with scale, it is acceptable to regard landforms as vague objects [3][4]. Moreover, this scale vagueness sums itself up with spatial vagueness because of the continuous distributions of features and values over space. However, this "double vagueness" in geomorphometry is rarely investigated [5].

The existing approaches to deal with scale in geomorphometric analysis may be considered on a continuum, where the level of incorporation of scale increases as the number of approaches decreases. The *de facto* standard is the sole use of the inherent scale of the data. Next in the continuum, some kind of *a priori* knowledge or statistical analysis defines a single better fixed scale to use. Improved approaches derive parameters and/or features in a number of predefined scales and use some kind of statistical summary to produce usable morphometric maps [6][7]. In this kind of analysis, scale fuzziness is an inherent concept. A few other approaches analyze scale signatures globally in search for characteristic scales or thresholds [8][9]. On the rarest end of the continuum, scale breaks are used to derive spatially-varying scale maps [10][11]. The spatial vagueness of geographic objects; however, is not incorporated in these works.

Our conclusion is twofold: (i) scale effects are poorly recognized in digital terrain analysis and; (ii) the double vagueness of landforms is even less investigated. Therefore, our main objective is also twofold: (i) to present an improved method to incorporate scale in geomorphometry and; (ii) to use the inherent double vagueness of objects as its working core.

We hypothesize that the analysis of the scale tendency of fuzzy feature memberships enables the identification of the fundamental features and scales of DEMs. In order to accomplish that, we build upon Wood's 1996 method of morphometric feature extraction [6], further developing it in three ways: by fuzzifying its extraction function, automatically parameterizing it and locally limiting the maximum scale of analysis.

II. Method

A. Fuzzifying Wood's Method

A fuzzy classification system is created based on Wood's original nine rules, each of which now result in a different class and is assigned an approximate geomorphographic term, namely, *pit*, *channel*, *hollow* (sloping channel), *pass*, *ridge*, *spur* (sloping ridge), *peak*, *plane* or *slope* (sloping plane). Crisp thresholds are replaced by fuzzy concepts modeled by fuzzy sets (Fig. 1), as in [12]. The antecedents of each rule are then combined by the fuzzy operator AND to establish a membership map for each feature. The highest membership can then be used to determine the extracted morphometric feature at each location.

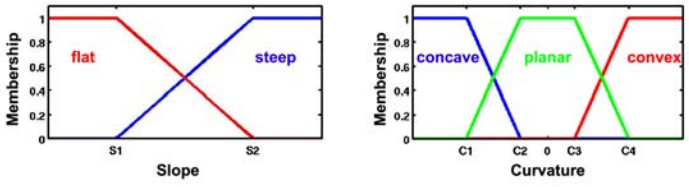


Figure 1. Fuzzy sets for slope and curvature.

B. *Automatic Parameterization of Fuzzy Sets*

For a successful classification, fuzzy sets must be properly parameterized, so that they can reflect the inherent relationships between concepts and the resultant features. Also, since geomorphometric properties vary with scale, so should fuzzy sets. Therefore, we calculate the mean slope, mean negative cross-sectional curvature and mean positive cross-sectional curvature of a given DEM and use these values as starting points to obtain an adaptive parameterization of fuzzy sets.

However, proper parameterization is hampered by the fact that flat areas shift the mean slope and mean curvature towards lower values. As a solution, the mean slope is used as input to functions of the form $y=ae^{(-x/b)}+c$ that were designed by trial-and-error to provide percentages to be applied to the means, so that increasingly higher parameters are applied to flatter DEMs (Fig. 2). The result is an automatic procedure that adapts the feature extraction function for any DEM in any scale.

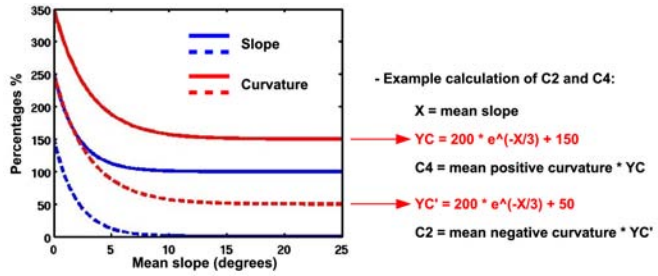


Figure 2. Parameterization functions and example calculation of parameters C2 and C4. See Fig. 1 for reference.

C. *Establishing the Maximum Scale of Analysis*

This nine-class fuzzy system is then run over multiple scales by increasing the local window of calculation until either (i) a plane feature is extracted after a non-plane feature or (ii) the classification stability is lost (Fig. 3).

The reason for the first scale constraint is to avoid loosing meaningful information. When plane features are extracted after non-plane features, they are considered as an obliteration of smaller-scale features and, therefore, disregarded in the analysis.

We also further restrict scales by analyzing the classification stability. As scale increases, an undulating pattern of intercalating moments of classification stability and confusion is formed (Fig. 3). These "waves" represent dominant scale ranges, whereas their boundaries identify specific scales where fundamental morphometric changes take place. In order to automatically identify these boundaries, we find the scales where classification stability is lost. A classification is considered stable when it produces features exhibiting a small confusion index [13] over a significant number of consecutive scales. By trial-and-error we defined a confusion index of 0.6 and 4 consecutive scales as adequate thresholds. Fig. 3 demonstrates the complete analysis.

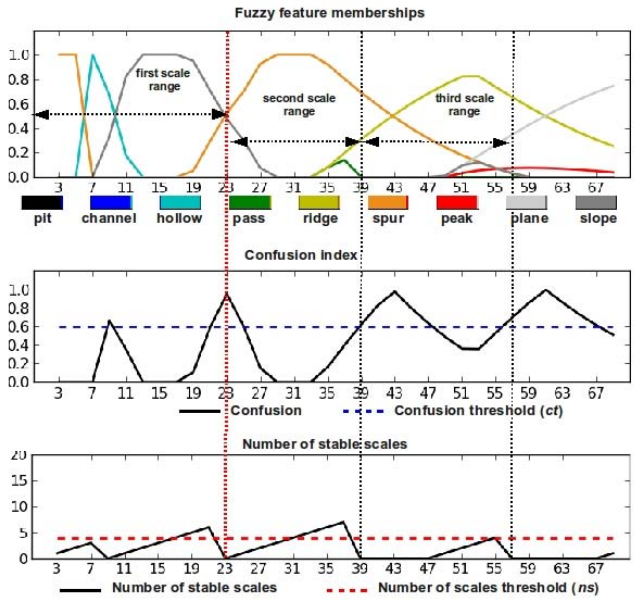


Figure 3. Identification of the maximum scale of analysis (red vertical line).

In the example displayed, the classification becomes stable and then loses stability three times, identifying a total of three scale ranges until a plane feature is extracted. For the purpose of an unsupervised assessment, we consider the use of only the first range of scales as the best compromising approach.

D. *Finding Fundamental Features and Scales*

After having defined the local range of scales to analyze, we can derive the multi-scale fuzzy feature memberships h_i, given by

$$h_i = \sum_{\forall\, s \le smax} g_i(s) \times w(s) \Big/ \sum_{\forall\, s \le smax} w(s) \quad , \qquad (1)$$

where $g_i(s)$ is the fuzzy feature membership for each i of the set C of nine features in every scale s, $smax$ is the local maximum scale of analysis and $w(s)$ is a weight applied to each scale (kept constant in the analysis).

The highest multi-scale fuzzy membership determines the *fundamental feature*, whereas the *fundamental scale* is simply the one that best represents the entire distribution of fundamental feature fuzzy memberships, i.e., its centroid.

III. The Experiment

In order to test its general applicability, the method was applied to five DEMs of varying resolutions, data sources and spatial extents (Tab.1). No preprocessing was applied to any of the DEMs, which are all freely available on the Internet[1]. The entire method was implemented through a GRASS-Shell script

1 http://www.gebco.net; http://pds.jpl.nasa.gov/; http://www.geomorphometry.org

that needs nothing but a DEM as input. Due to inherent limitations of the underlying GRASS modules, the local window of calculation was set to a maximum of 69x69 cells.

TABLE I. MAIN PROPERTIES OF DEMS USED IN THE ANALYSIS.

	MOLA DEM	***GEBCO_ 08***	***Baranja Hill***	***Ebergotzen***	***Fishcamp***
Data source	Satellite altimetry	Satellite altimetry / soundings	Topographic maps	Topographic maps	LIDAR
Nº of cells	393,848	750,836	21,903	160,000	320,000
Cell size (m)	7,000	1,000	25	25	5

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Fundamental Features and Scales

Instead of providing extensive geomorphological descriptions, our main focus here is to evaluate the proposed method in contrast to more common approaches, namely, the choice of one single fixed-scale to analyze; and the use of modal morphometric maps. As such, we derived confusion matrices between the fundamental maps and all fixed-scale and modal maps generated by scales ranging from 3x3 up to 69x69.

The resultant kappa index trends in the fixed-scale analysis show peaks that tend to cluster around scale 13x13 (Fig. 4 left). This indicates that the fundamental maps are biased toward smaller scales, thus, capturing most of the significant features without, however, keeping much noise. As scale increases, the discrepancies also escalate, being more pronounced in rougher DEMs due to excessive obliteration of non-plane features, which is contained in our approach by the adaptive parameterization.

The modal analysis, in turn, shows the majority of maximum kappas around scale 23x23 (Fig. 4 right). However, high kappa values were spread out among a larger number of scales, being less sensible to them. This suggests that there are many choices of maximum scales able to generate comparable results between the modal and fundamental approaches. Note, however, that all experiments were carried out with automatically generated parameters, contrasting with the original modal approach.

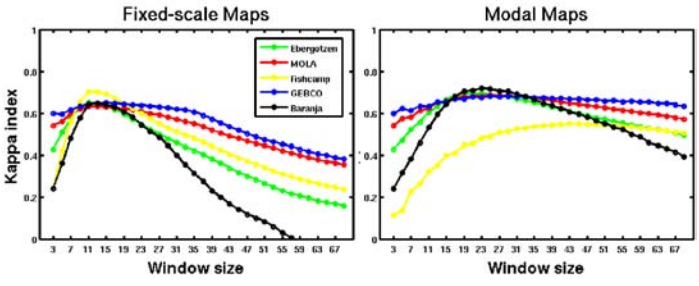


Figure 4. Kappa index trends with scale.

The oblique views of the Baranja Hill DEM depicted in Fig. 5 allow further evaluation of the results. The proposed approach, as well as the detected global scales (maximum kappas), produce morphometric maps that tend to be in good agreement with subjective visual assessments of the overall topography, attesting for the unsupervised character of the method.

Fig. 5 also brings the corresponding fundamental scale map, showing that larger features were coherently assigned to larger scales (darker shades of gray). Examples are seen in the continuous drainage divides, drainage channels and some point features, such as hill passes. In addition to the considered scales, a total of four scale ranges was identified in all studied DEMs; however, an average of 83% of each DEM presented only one range, justifying the choice of the first stability loss as the local maximum scale of analysis.

Also, although capturing detail, the analysis was able to identify fundamental scales up to 61x61 and local maximum scales as high as 69x69. While modal maps generated by considering these scales denote progressive loss of information, the spatially-varying detected scales allow one single map to gather as much information as possible from diverse scales simultaneously. The lack of need to choose a limited range of scales to analyze further emphasize the objective and unsupervised character of the method.

Also obtained in the proposed analysis is a complete set of fuzzy maps that comprise nine feature membership maps for every scale, nine multi-scale feature membership maps and a multi-scale confusion index map. All of them together capture the inherent double vagueness of landforms, enabling a thorough assessment of the multi-scale nature of DEMs that is unlikely to be achieved by crisp or fixed-scale approaches.

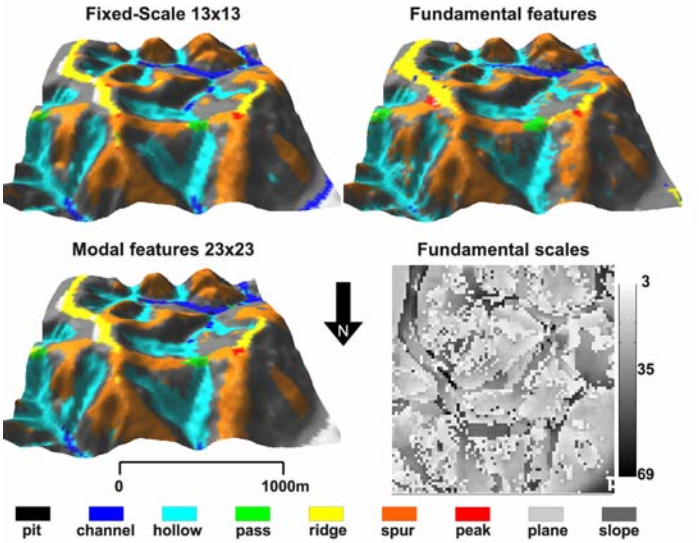


Figure 5. Comparison of morphometric feature maps of the Baranja Hill DEM.

B. *Multi-scale Geomorphometric Variables*

As stated in [10], the detection and delineation of spatially adaptive scales can not only improve the classification of landforms, but also lead to improved approaches in calculating surface derivatives. With this motivation, new geomorphometric variables were derived by a simple map algebra algorithm. It uses the fundamental scale map as a guide to locally select values that correspond to the appropriate scales. Following this approach, Fig. 6 shows a multi-scale slope map as compared to fixed-scale maps of local 3x3 and regional 35x35 scales.

The highlighted areas (black squares) show that the multi-scale map combines information from different scales. When the fundamental scale map indicates local scales (lighter shades) and detail is necessary, it resembles the 3x3 map; when coarser scales dominate, the resultant map is smoother, locally adapting to the detected scales and, hopefully, to the actual geomorphology. We consider these results as truly multi-scale versions of the original variables. Although more in-depth studies are required, we believe these maps should be preferable to any single fixed-scale map or even to statistical summaries based on multiple scales, as far as an unsupervised characterization of topography is desired.

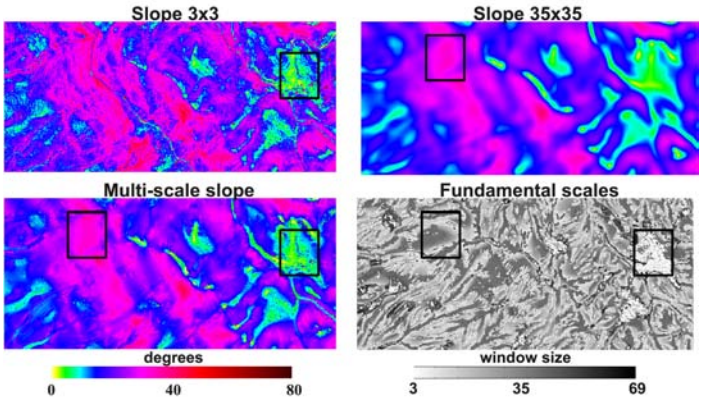


Figure 6. Multi-scale slope map of the Fishcamp DEM.

V. Conclusion

When a general geomorphometric assessment of a surface is needed, parameters and objects are usually extracted using the sole inherent scale of the data. However, the amount of scale-based relationships seen in the results of this paper and in the many others that influenced it show that this approach is insufficient, if not bound to erroneous conclusions. If nothing or little is known beforehand about a surface, how come we so carelessly use a fixed-scale approach? Geomorphology and specially geomorphometry are, in its essence, multi-scale.

With this motivation, our work has presented an unsupervised method to identify the fundamental features and scales of DEMs. We have considered the inherent double vagueness of landforms by applying fuzzy reasoning in every scale *per se* and also in a multi-scale sense. Fuzzy sets were parameterized automatically and the maximum scale of analysis was determined in a cell-by-cell basis, locally adapting to the actual topography. The result was a general and transferable method able to characterize the multi-scale geomorphometry of very discrepant DEMs.

Despite a number of associated shortcomings, such as the artificial limit of 69x69 cells imposed, we believe this effort is in the right direction towards a more thorough approach to geomorphometry, one that not only takes into consideration scale effects, but one that treats scale as an inherent dimension of any data. As such, the most important aspect in efforts like this one is not as much to reach an answer to the research question, as it is to simply keep it in mind:

Which is the best scale?

References

[1] Hengl, T., and H. I. Reuter, 2009. “Geomorphometry: Concepts, Software and Applications”, Elsevier, 765 p.

[2] Evans, I. S., 1972. “General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics”, In Spatial Analysis in Geomorphology, London, Harper & Row, 1972. pp. 17–90.

[3] Fisher, P. F., 2000b. “Sorites paradox and vague geographies”, Fuzzy Sets and Systems, 113 7–18.

[4] Varzi, A. C., 2001. “Vagueness in geography”, Philosophy and Geography, 4 49-65.

[5] Cheng, T., P. Fisher and Z. Li, 2004. “Double Vagueness: Effect of Scale on the Modelling of Fuzzy Spatial Objects”, Developments in Spatial Data Handling, pp.299-313.

[6] Wood, J., 1996. “The geomorphological characterisation of digital elevation models”, Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Leicester, Leicester, UK.

[7] Fisher, P., Wood, J. and T. Cheng, 2004. “Where is Helvellyn? Fuzziness of multiscale landscape morphometry”. Transactions of the Institute of British Geographers, v. 29, n. 1, p. 106–128, 2004.

[8] Drăgut, L., Schauppenlehner, T., Muhar, A., Strobl, J. and T. Blaschke, 2009, “Optimization of scale and parametrization for terrain segmentation: an application to soil-landscape modeling”. Computers & Geosciences, doi:10.1016/j.cageo.2008.10.008.

[9] Drăgut, L., Eisank, P., Strasser, T. and T. Blaschke, 2009. “A Comparison of Methods to Incorporate Scale in Geomorphometry”, In Geomorphometry 2009 Conference Proceedings, Edited by: Purves, R., Gruber, S., Straumann, R. and T. Hengl, University of Zürich, Zürich.

[10] Schmidt, J. and R. Andrew, 2005. Multi-scale landform characterization. Royal Geographical Society (with The Institute of British geographers), v. 37, n. 3, p. 341-350, 2005.

[11] Wood, J., 2009. “Geomorphometry in Landserf”, In Hengl, T., and H. I. Reuter, 2009. “Geomorphometry: Concepts, Software and Applications”, Elsevier, 765 p.

[12] Schmidt, J. and A. Hewitt, 2004. “Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position”. Geoderma, 121 243-256.

[13] Burrough, P. A., van Gaans, P. F. M. and R. Hootsmans, 1997. “Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries”, Geoderma, 77 115-135.