

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**INTEGRAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS COMO SUBSÍDIO A GESTÃO
INTEGRADA DE ZONAS COSTEIRAS, CAPÃO NOVO (RS-BRASIL) E
RAVENNA (ER-ITÁLIA)**

FREDERICO M. SCARELLI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Giovanni Gabbianelli (UNIBO)
Prof. Dr. Eduardo G. Barboza (UFRGS)

Porto Alegre - 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**INTEGRAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS COMO SUBSÍDIO A GESTÃO
INTEGRADA DE ZONAS COSTEIRAS, CAPÃO NOVO (RS-BRASIL) E
RAVENNA (ER-ITÁLIA)**

FREDERICO M. SCARELLI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Giovanni Gabbianelli (UNIBO)

Prof. Dr. Eduardo G. Barboza (UFRGS)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. César Aguilar Goso – Universidad de la República, Instituto de Ciencias
Geológicas, Departamento de Sedimentología y Geología Aplicada

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello – Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Instituto de Geociências da UFRJ, Departamento de Geologia

Prof. Dr. Daniele Scarponi – Università di Bologna, Dipartimento di Scienze
Biologiche, Geologiche e Ambientali

Prof. Dr. Francesco Mancini – University of Modena and Reggio Emilia,
Department of Engineering "Enzo Ferrari"

Tese de Doutorado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título
de Doutor em Ciências.

Porto Alegre – 2016

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá”.

Ayrton Senna

“Il male assoluto del nostro tempo è di non credere nei valori. Non ha importanza che siano religiosi oppure laici. I giovani devono credere in qualcosa di positivo e la vita merita di essere vissuta solo se crediamo nei valori, perché questi rimangono anche dopo la nostra morte. Pensate al futuro che vi aspetta, pensate a quello che potete fare, e non temete niente! Meglio aggiungere vita ai giorni, che non giorni alla vita”

Rita Levi Montalcini

“Homens que da sua terra não saem são como navios que acabam no estaleiro: errando por esse mundo, se aprende a não errar”.

José Bonifácio de Andrade e Silva

“You can't always get what you want, But if you try sometimes, yeah! You just might find you get what you need”!

Rolling Stones

“A onda está certa, o que está errado é esse negócio de aterro aí...
... a natureza está certa”

Raul Seixas (Entrevista atropelado por uma onda de ressaca no RJ)

...”Hey you
Don't help them to bury the light
Don't give in, without a fight”...

Pink Floyd

ALL PRAISE TO GOD

John Coltrane

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais que sempre apoiaram todas as minhas decisões, contanto que eu fizesse o que eu me dispuser a fazer com muito amor, dedicação e responsabilidade, e não foi diferente o apoio deles durante todo o período de desenvolvimento deste doutorado. Obrigado!

Agradeço ao Professor Giovanni Gabbianelli por todas as oportunidades que me proporcionou desde a dissertação do TCC em 2009 até hoje. Me propiciando além de ensinamento e cultura, experiências extraordinárias que me amadureceram tanto cientificamente como pessoalmente, fazendo só aumentar minha curiosidade e a paixão em estudar as zonas costeiras. Sendo o seu apoio e confiança depositados sobre mim, indispensáveis para a conclusão de mais este projeto de pesquisa. Sua contribuição na minha formação tanto pessoal quanto profissional será sempre grata. Grazie Prof.! E não esquecerei **TURN ON OWN BRAIN**.

Agradeço ao Prof. Luiz José Tomazelli por ter indicado o Prof. Eduardo G. Barboza, o qual teve a confiança no italiano de Jundiaí que bateu na sua porta, me aceitando como doutorando e tendo acreditado e apoiado esse projeto de pesquisa em todos os momentos, fazendo com que se torna-se muito mais que apenas uma Tese de doutorado. Obrigado pelos ensinamentos e pela paciência Edu! A sua contribuição e amizade foram indispensáveis para a conclusão deste doutorado, que não seria o mesmo desde as discussões que ocorreram da melhor maneira possível, com muito ensinamento acompanhadas de spritz Campari, vinho (rosso no inverno e branco no verão), até as companhias tua e do Prof. Nelson Gruber nas idas e vindas entre Porto Alegre e Bologna, sempre muito divertidas e produtivas. Grato!

Agradeço ao Prof. *Jerri* Luigi Cantelli, por também me apoiar e mergulhar com muito entusiasmo dentro desse projeto. Desde o mestrado me auxiliando com muito ensinamento (não só geológico, mas também corrigindo todas as *doppias* do meu italiano), amizade e principalmente paciência. Obrigado Jerri! Você foi indispensável para fazer que esses anos fossem mais fáceis, leves e com menos saudades. Sem esquecer os chás, cafés, almoços para dar mais luz nas manhãs e tarde do inverno Bolonhês e as companhias nas viagens pelo mundo, que com você sempre ficam mais divertidas.

Agradeço aos grandes amigos que fiz dentro do CECO na UFRGS e no grupo I.G.R.G. da UNIBO. Os momentos com vocês ficaram guardados para mim com muito carinho, a amizade de vocês fez com que qualquer trabalho de campo fosse momentos não somente de trabalho, mas também de diversão. Mesmo debaixo de

muito sol e de muito frio, tendo que atravessar águas e arriscar a vida com picadas de cobras venenosas ou de nuvens de *zanzare*, junto de vocês sempre foram momentos de muita alegria e amizades. Sem as nossas descontrações, discussões e sem a ajuda de vocês esse doutorado não se concluiria. Obrigado aos amigos de Ravenna, Bologna e Porto Alegre, independente se estejam, em Bologna, Ravenna, Torino, Genova, Forlì, Imola, Rio de Janeiro, São Paulo, Santa Catarina, Porto Alegre ou qualquer outro lugar do mundo, serei eternamente grato por vocês terem feito e continuarem fazendo parte da minha vida, me ajudado em muitos momentos importantes. As cervejas, *birre*, churrasco, *grigliate*, viagens, dias e noites ficarão para sempre guardadas na minha memória com momentos de felicidade que vocês propiciaram. Obrigado/Grazie!

Agradeço a todos os amigos de longa data que de Jundiá alguns foram para o mundo e outros por ali ficaram e aos amigos que fiz pelo mundo e que ajudaram a deixar todo o processo mais fácil através da parceria, sempre me apoiando e se disponibilizando a ajudarem em todos os momentos da minha vida. Sendo também parceiros de viagens, conversas ou de shows do Rolling Stones e outros. Obrigado!

Um agradecimento especial a todos que me ajudaram nessa aventura de viagens principalmente quando estava à procura de um quarto e nunca me deixaram na mão, sempre me dizendo que poderia ficar tranquilo porque sabia que podia contar com vocês. É nessa hora que se aprende a dar valor às grandes amizades, vocês foram fundamentais nesse período e serei sempre grato e a disposição de vocês! Obrigado!

Nesses quatro anos tenho que agradecer a vida por ter me dado amizades em todas as casas que eu passei. Em todas as casas os *ex-flatmate*, passaram a ser grandes amigos. Obrigado pela parceria não somente pela parceria em dividir casa com vocês, mas também por dividir momentos especiais. Obrigado/Grazie!

As cidades de Porto Alegre e Bologna que me deram tudo o que eu precisava durante esses quatro anos. A Fondazione Flaminia por financiar este projeto. A dottoressa Daniela Masini dell'Area Ricerca e Trasferimento Tecnologico dell'Alma Mater Studiorum – Settore Dottorato da UNIBO pela paciência e auxílio para a conclusão deste doutorado. A secretaria e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS por possibilitar esse acordo e por todo o apoio durante o doutorado. Obrigado/Grazie!

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta etapa na minha vida. Gratidão!

RESUMO

Esta Tese, realizada em cotutela entre os programas de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil) e de Ciências para o Ambiente da *Università di Bologna* (Itália), foi desenvolvida no Litoral Norte do Rio Grande do Sul (RS-Brasil) e na zona costeira do município de Ravenna na região da Emilia-Romagna (ER-Itália). Foram executadas análises com base na integração de tecnologias de forma inédita, (veículo aéreo não tripulado – VANT e *ground penetrating radar* – GPR) e na proposição de novos métodos de trabalho com um custo-benefício que permite a sua aplicação seja por grupos de pesquisa, órgãos governamentais ou companhias privadas em zonas costeiras; especificamente, naquelas caracterizadas por sistemas de tipo barreira-laguna. O estudo foi empreendido em duas diferentes escalas temporais a fim de analisar a evolução recente e a situação atual, devido a fatores naturais e antrópicos que atuam sobre os sistemas costeiros: (i) análise de longo prazo para estudar e entender a evolução costeira de ambos os sistemas barreira-laguna no Holoceno, devido à anomalias climáticas que foram responsáveis pela morfologia atual, das áreas de estudo, como os períodos glaciais na área do RS e outras de ordem menor como a Pequena Idade do Gelo na ER.; (ii) análise em escala temporal de curto prazo para compreender o comportamento e o estado atual das zonas costeiras de interesse através da comparação e do monitoramento sazonal do comportamento do sistema costeiro em uma faixa de costa com segmentos com características natural e antrópica contíguos. Como resultados se obteve um modelo da evolução costeira e uma comparação sazonal do comportamento do sistema praia/duna em Ravenna; e a comparação entre uma área natural adjacente a uma antropizada na área de Capão Novo (RS). Os resultados e interpretações foram integrados, e junto com dados e informações de conhecimento prévio, foram analisados com o objetivo de compreender o comportamento dos sistemas costeiros na sua forma mais complexa. A aplicação das novas tecnologias e do método proposto por esta Tese, contribuem não somente para a pesquisa acadêmica das zonas costeiras, mas também servem como alternativa para gestores locais desenvolverem planos de manejo e de monitoramento de baixo custo, o que pode tornar as decisões dentro das iniciativas de Gestão Integrada das Zonas Costeiras mais eficazes e objetivas a curto e longo prazo, prevenindo perdas de cunho social, econômico e ambiental. Ademais, também é uma proposta que pode ser aplicada e/ou adaptada para o estudo de sistemas costeiros similares.

RIASSUNTO

Questa Tesi, fatta in co-tutela tra i programmi di dottorato in Geoscienze dell'UFRGS (Brasile) e di Scienze per l'Ambiente dell'UNIBO (Italia), è stata svolta nel settore nord della costa del Rio Grande do Sul (RS-Brasile) e nella zona costiera del comune di Ravenna nella Regione Emilia-Romagna (ER-Italia). Sono state fatte analisi integrando nuove tecnologie (aeromobile a pilotaggio remoto – APR e *ground penetrating radar* – GPR) e proponendo nuove metodologie di lavoro, con un buon rapporto costi-benefici, il quale permette che siano applicate sia da gruppi di ricerca, enti pubblici o compagnie private, nelle zone costiere, specificatamente, in zone costiere caratterizzate dai sistemi del tipo barriera-laguna. Gli studi sono stati svolti in due scale temporali diverse, con gli obiettivi di analizzare l'evoluzione recente e la situazione attuale, dovute ai fattori naturali e antropici che agiscono sui sistemi costieri: (i) analisi sul lungo periodo per studiare e capire l'evoluzione costiera di entrambi i sistemi barriera-laguna nell'Olocene, dovuta alle anomalie climatiche che sono state responsabili per la morfologia attuale delle aree in studio, come i periodi glaciale nel RS o altre di ordini minori come la Piccola Età del Ghiaccio nell'ER.; (ii) analisi in scala temporale di corto periodo per capire il comportamento e lo stato attuale delle zone costiere studiate, tramite il confronto tra una zona costiera naturale e antropica adiacenti e il monitoraggio stagionale del comportamento del sistema costiero. I risultati ottenuti sono stati un modello della evoluzione costiera e una comparazione stagionale del comportamento del sistema duna/spiaggia di Ravenna e il paragone tra una area naturale adiacente a una antropizzata nella zona di Capão Novo (RS). I risultati delle analisi fatti per entrambe le scale temporali in studio, sono stati integrati e insieme ai dati e informazioni delle conoscenze previe, sono stati analizzati con l'obiettivo di comprendere il comportamento dei sistemi costieri nella loro forma più complessa. L'applicazione delle nuove tecnologie e dei metodi proposti per questa Tesi hanno contribuito non solo alle ricerche delle zone costiere in ambito accademico, essendo anche una alternativa per i gestori locali sviluppare piani gestionale e di monitoraggio con basso costo, il quale può consentire che le decisioni all'interno della Gestione Integrata delle Zone Costiere, di corto e lungo periodo siano più efficaci e obiettivi, prevenendo perdite di carattere sociali, economiche e ambientali. Esso inoltre, rappresenta anche un esempio di studio che può essere applicato e/o adattati agli studi in altri sistemi costieri similari.

ABSTRACT

This Thesis, realised in co-tutorship among the doctorates programs in Geoscience in in the UFRGS (Brazil) and in Science for the Environmental in the UNIBO (Italy), was done in the north sector of the Rio Grande do Sul (RS-Brazil) and in the Ravenna municipality coastal zone in the Emilia-Romagna region (ER-Italy). Analyses were carried out using integrating new technologies (unmanned aerial vehicle – UAV and ground penetrating radar – GPR) and proposing new work methodologies with a benefit-cost ratio that allows them to be used by the research group, governmental agencies or private companies, and to be applied in studies in the coastal zones, particularly in the barrier-lagoon coastal systems type. The studies were done investigating two different temporal scales, in order to analyse the recent evolution and the actual state, due the natural and anthropic factors that act above the coastal systems: (i) a long period analyse was carried out to study and understand the coastal evolution during the Holocene in each barrier-lagoon system, due to climatic anomalies that are responsible for the actual morphology in both areas, as the glacial period for the RS or other with an minor order as the Little Ice Age in the ER; (ii) a short period analyse was done to investigate the behaviour and the actual state of coastal zones under study, comparing a natural coastal zone with an adjacent anthropic coastal zone, and monitoring seasonally the behaviour of the coastal system. The results obtained were the coastal evolution model and a seasonal comparison in the beach/dune system in the Ravenna zone; and the comparison between a natural adjacent at an anthropogenic zone at Capão Novo (RS). The results from the analyses, done for each temporal scale under study were integrated with the data and the information from the previous work were analysed with the aim to investigate the behaviour of the coastal systems in their most complex form. The application of the new technologies and the methodology proposed by this Thesis had a contribute not only for the research in the academics field, but may also be applied as an alternative by the local authorities to develop the management plan and monitoring programs with low cost, which allow make the decision inside the Integrated Coastal Zone Management, in both the long and short period, with more effectivity and objectivity. Furthermore, is propose that may be applied and/or adapted for the studies in similar coastal system.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1: Perfil transversal da PCRS obtido a partir da correlação cronoestratigráfica mostrando os quatros depósitos das barreiras e lagunas (Tomazelli & Villwock, 2000).....9
- Figura 2: Mapa geológico da PCRS (modificado de Tomazelli & Villwock, 1996).....11
- Figura 3: Comparação da área de estudo. A) Imagem atual a partir do Google Earth mostrando o balneário de Capão Novo; B) foto aérea de 1948 mostrando o campo de dunas com as dunas barcanas migrando sobre os campos de dunas transgressivos vegetados.....15
- Figura 4: Mapa geológico da Planície Padana em escala 1:250.000, evidenciando a planície costeira de Ravenna (Regione Emilia-Romagna, 1999; modificado de Stefani & Vincenzi, 2005).....17
- Figura 5: Esquema estratigráfico dos depósitos plio-quadernários da bacia Padana (modificado de Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998).....19
- Figura 6: Variações na concentração de C^{14} nos últimos 1000 anos devido a atividade solar; em destaque, no retângulo vermelho, as variações durante a PIG (modificado de Svensmarck, 2000).....21
- Figura 7: Interação entre o homem e o ambiente no sistema costeiro. A) as dunas frontais se movendo sobre os calçadões no Litoral Norte do RS; B) modificações feitas pelo homem no sistema costeiro de Ravenna.....24
- Figura 8: Definição das escalas espaciais e temporais utilizadas nos estudos dos sistemas costeiros. Nos quadros em vermelho, as escalas tratadas neste trabalho (modificado de Cowell & Thom, 1994).....25
- Figura 9: Dois sistemas de dunas frontais adjacentes, com distância de 1 km: A) Dunas frontais sobre pressão devido a urbanização; B) dunas frontais preservadas e sem a pressão de elementos antrópicos.....26
- Figura 10: Urbanização no litoral norte do RS. A) Foto aérea de 1974 com a presença do campo de dunas; B) urbanização sobre a mesma zona após 30 anos, com a extinção do campo de dunas (modificado de Tomazelli *et al.*, 2008).....27
- Figura 11: Sistema GPR utilizada para adquirir os dados em subsuperfície na planície costeira de Ravenna.....30
-

Figura 12: O DJI Phantom 2 com um GNSS eTrex®30-Garmin fixado ao VANT para obter um georreferenciamento mais preciso.....32

Figura 13: Fotografias aéreas adquiridas a partir do DJI Phantom 2. A) Fotos aéreas antes da correção; B) fotos aéreas após a correção.....33

CAPÍTULO 2

Fig. 1. a) Holocene Sea Level Curve for the North Adriatic (modified from Lambeck et al., 2011). b) Climate variations in Europe in the past 5 ky BP (modified from Betti and Morelli, 1998). c) Changes in ¹⁴C concentration in the past 1 ky BP due to solar activity (modified from Svensmark, 2000).....41

Fig. 2. Study area showing the Pinewoods (Pineta), the location of the drainage pumping station, and the GPR survey location in the Ravenna coastal plain.....43

Fig. 3. An across profile from DTM 2014 showing the topographic differences that allow identification and digitization of the beach ridges47

Fig. 4. A) The DSM 2005 reclassified with the beach ridges above the sand soil and above the mud soil. B) The DTM 2014 reclassified with the beach ridges above the sand soil and above the mud soil, plus the beach ridges identified and digitized from the DTM data.....52

Fig. 5. A) The soil association from Regione Emilia-Romagna with the 14 soil associations. B) The reclassification of the soil association with the three classes proposed in this work.....54

Fig. 6. A sample of the GPR profile done in Pineta Ramazzotti showing two radar facies identified as backshore/foreshore (radar facies A) and upper shoreface (radar facies B).....55

Fig. 7. A sample of the GPR profile done in the agriculture fields between Lido Adriano and Lido di Dante, showing the signal attenuation without depositional geometry. This radar facies was interpreted as a lagoon environment.....56

Fig. 8. A sample of the GPR profile done in Pineta di San Vitale, the radar facies A shows the progradation in the ocean direction56

Fig. 9. Photos of the soil, which was mapped as beach ridges in the geological chart. A) The agglomerates of mud and clay in the agricultural field that were mapped as beach ridge in the geological chart not corresponding with the beach ridge pedogenesis. B) A sand soil in an agriculture field corresponding to what was mapped as beach ridges in the geological chart.....58

Fig. 10. The three soil association classes overlapped on the reclassified DSM from 2005.....	59
Fig. 11. Historical charts from 1690, 1713, 1757, and 1868. The colored arrows indicate the presence of water bodies, pinewoods, and channels built by man in the last four centuries.....	60
Fig. 12. A) The geological coastal model without man-made changes, with two sand barriers, the Old Barrier and the Actual Barrier, that are separated by a lagoon environment. B) The proposed coastal model with the geological surface elements and only with the beach ridges that are above the sand barriers, and the beach ridges digitized from the DTM 2014.....	62

CAPÍTULO 3

Figure 1: Study area and UAV surveys in a) Casal Borsetti, with two surveys—one in north of the town and the other in the south; b) Marina Romea, with one study north of Lamone river mouth and the other on the south; c) Porto Corsini; d) Marina di Ravenna; and e) Pineta Ramazzotti.....	81
Figure 2: Bulldozer dunes; anthropogenic dunes built using a bulldozer on the Ravenna coast; a) bulldozer reworking the sand to prepare the beach for the summer season; b) bulldozer increasing the beach's width for the summer season; c) behind a bulldozer dune in Marina di Ravenna during the winter season; d) above the bulldozer dune to protect the <i>bagni</i>	82
Figure 3: The potential of UAV surveys for coastal monitoring; a) and b) a natural foredune with vegetation from the 2014 UAV survey and the man-made changes to the foredune observable in the 2015 UAV survey; c) and d) the vegetation difference between the 2014 and 2015 UAV surveys; c) after the 2014 summer season, there exists a higher vegetation density on the foredune; d) after 2015 winter season, less vegetation is seen on the foredune; e), f) and g) a detailed scale dune monitoring, blowout detail on the DSM obtained from UAV survey (e and f); g) high resolution data on deposition and erosion on blowout, obtained using surface difference tool.....	86
Figure 4: Individualized elements on the beach; a) imagery from the 2014 UAV survey; b) imagery from the 2015 UAV survey; c) surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys.....	87
Figure 5: Example of profiles extracted from the 2014 and 2015 UAV surveys. This method was used to extract and calculate the profiles along each segment.....	87

Figure 6: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the north of the Casal Borsetti settlement.....	88
Figure 7: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the south of the Casal Borsetti settlement.....	89
Figure 8: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the north of the Marina Romea settlement	89
Figure 9: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the south of the Marina Romea settlement	90
Figure 10: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the Porto Corsini settlement.....	90
Figure 11: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the Marina di Ravenna settlement	91
Figure 12: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at Pineta Ramazzotti.....	92
Figure 13: A) zoom and profile at the damage zone of the Pineta Ramazzotti segment, where profile a-a' was extracted; B) Zoom and profile at the south of the Pineta Ramazzotti segment, where profile a-a' was extracted.....	92
Figure 14: Profiles extracted from the 2014 and 2015 UAV surveys overlapped with WFL; profiles a-a' and b-b' at the Casal Borsetti North segment; profiles c-c' and d-d' at the Casal Borsetti South segment; profiles e-e' and f-f' at the Marina Romea North segment; g-g' and h-h' at the Marina Romea South segment.....	93
Figure 15: Profiles extracted from the 2014 and 2015 UAV surveys overlapped with WFL; profiles i-i' and j-j' at the Porto Corsini segment; profiles k-k' and l-l' at the Marina di Ravenna segment; profiles m-m' and n-n' at the Pineta Ramazzotti segment.....	94

CAPÍTULO 4

Figure 1: Study area in North Littoral of RS. The red polygon is the UAV survey area.....	103
Figure 2: Results from the UAV survey: A) the orthophoto overlapping the World Imagery from ArcGIS Online data; B) the orthophoto overlapping the aerial photo from 1948; C) DSM in the natural area; D) orthophoto draped on the DSM in the natural area; E) DSM in the anthropogenic area; F) orthophoto draped on the DSM in the anthropogenic area.....	105

CAPÍTULO 5

- Figura 1: Acima, modelo estratigráfico com a reconstrução evolutiva da barreira de Curumim (modificado de Dillenburg & Barboza, 2014); abaixo perfil GPR com as radar facies identificadas e os refletores indicando a progradação no sentido no oceano (modificado de Barboza et al., 2011).....110
- Figura 2: Acima, foto aérea de 1948 mostrando o campo de dunas sem antropização na área de Capão Novo; abaixo, foto atual a partir do Google Earth mostrando a antropização da zona.....112
- Figura 3: (A) Ortofoto em alta resolução, obtida através do levantamento feito com VANT, na área não urbanizada adjacente a Capão Novo; (B) ortofoto em alta resolução obtida na parte urbanizada de Capão Novo.....114
- Figura 4: (A) MDS em alta resolução obtido através do levantamento feito com VANT na área não urbanizada adjacente a Capão Novo; (B) MDS em alta resolução obtido na parte urbanizada de Capão Novo, em destaque os *blowouts*.....115
- Figura 5: Modelo geológico de superfície construído para representar a geologia superficial na área costeira de Ravenna, com os cordões identificados e a paleomorfologia da área, sem a intervenção humana no território.....118
- Figura 6: Comparação sazonal mostrando as modificações devido as ações do homem e fatores naturais no período de setembro de 2014 e abril de 2015. (a) Detalhe do levantamento utilizando VANT feito em 2014; (b) detalhe do levantamento com VANT feito em 2015; (c) detalhe da diferença de superfície entre 2014 e 2015.....120
- Figura 7: Modelo geológico utilizado para auxiliar nas ações ligadas a GIZC local, mostrando a presença dos balneários sobre a barreira arenosa atual.....121
- Figura 8: Erosão costeira no Farol da Conceição no trecho transgressivo do Litoral Médio do RS. Foto de 1988 com o velho farol e a casa logo atrás; foto de 1997 com o velho farol destruído; foto de 1999 com a casa que se encontrava atrás do velho farol destruída (modificado da Toldo Jr. *et al.*, 2006).....124
- Figura 9: Problemas de erosão costeira na região do balneário do Hermenegildo (Santa Vitória do Palmar) no Litoral Sul do RS.....125
- Figura 10: Recuperação das dunas frontais no litoral norte do RS: A) início da recuperação das dunas frontais; B) acúmulo de sedimentos pelo transporte eólico; C) canalização dos sangradouros para evitar a erosão das dunas, D) recuperação das dunas sob a canalização (A e B modificado de Portz, 2012; C e D modificado de Tabajara & Weschenfelder, 2011).....126
-

Figura 11: Detalhe da presença dos balneários sobre a barreira arenosa atual. A) Trecho norte da zona costeira de Ravenna; B) trecho sul da zona costeira de Ravenna.....128

Figura 12: A e B) Exemplos de obras costeiras na costa de Ravenna com molhes paralelos e transversais a costa; C e D) danos causados às estruturas fixas presentes na praia, causados por tempestades de inverno na costa de Ravenna.....129

LISTA DE TABELA

CAPÍTULO 2

Table 1

Proposed soil association, divided into Sand Soil and Mud Soil. The table shows the horizons' depth and the percentage of sand, silt, and clay obtained from a representative soil profile.....49

SUMÁRIO

ESTRUTURA DA TESE	1
CAPÍTULO 1	3
1–INTRODUÇÃO.....	4
1.1 –Estado da Arte.....	6
1.1.1 –Sistemas barreira-laguna.....	6
1.1.2 –O sistema barreira-laguna da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (Brasil).....	9
1.1.3 –O sistema barreira-laguna da Planície Costeira do Pó (Itália).....	16
1.2 –Objetivos.....	23
1.3 –Premissa e Hipótese.....	25
1.4 –Métodos.....	29
CAPÍTULO 2 –SURFACE AND SUBSURFACE DATA INTEGRATION, USING NEW DATA TO REBUILD THE SURFACE GEOLOGICAL MODEL, FROM THE LITTLE ICE AGE TO THE PRESENT, IN THE RAVENNA COASTAL PLAIN, NORTHWEST ADRIATIC SEA (EMILIA-ROMAGNA, ITALY)	35
Abstract.....	37
Highlights.....	38
1 –Introduction.....	39
2 –Previous work.....	42
3 –Study area.....	43
4 –Material and methods.....	45
4.1 –Surface data.....	46
4.2 –Subsurface data – GPR.....	50
5 –Results.....	50
6 –Discussion.....	56
6.1 –Surface data.....	56
6.2 –Subsurface data.....	60
6.3 –Data integration.....	61
7 –Conclusion.....	64
Acknowledgements.....	65
REFERENCES.....	65
CAPÍTULO 3 –SEASONAL DUNE AND BEACH MONITORING USING PHOTOGRAMMETRY FROM UAV SURVEYS IN RAVENNA COAST (EMILIA- ROMAGNA, ITALY)	77

ABSTRACT.....	79
1 –INTRODUCTION.....	80
2 –STUDY AREA.....	80
3 –MATERIAL AND METHODS.....	83
3.1 –UAVs surveys.....	83
3.2 –Surface changes.....	83
3.3 –Meteo-Marine Data.....	84
4 –RESULTS AND DISCUSSION.....	84
4.1 –Casal Borsetti North.....	88
4.2 –Casal Borsetti South.....	88
4.3 –Marina Romea North.....	89
4.4 –Marina Romea South.....	89
4.5 –Porto Corsini.....	90
4.6 –Marina di Ravenna.....	91
4.7 –Pineta Ramazzotti.....	91
5 –Conclusion.....	95
Acknowledgments.....	95
References.....	95
CAPÍTULO 4 –NATURAL AND ANTHROPOGENIC COASTAL SYSTEM COMPARISON USING DSM FROM A LOW COST UAV SURVEY (CAPÃO NOVO, RS/BRAZIL)	99
ABSTRACT.....	101
INTRODUCTION.....	102
Background.....	102
METHODS.....	103
RESULTS AND DISCUSSION.....	104
CONCLUSIONS.....	105
ACKNOWLEDGMENTS.....	106
LITERATURE CITED.....	106
CAPÍTULO 5.....	108
5 –CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
5.1 –Integração das escalas.....	109
5.1.1 –Integração dos dados de Capão Novo.....	109
5.1.2 –Integração dos dados de Ravenna.....	116
5.2 –Escalas integradas na GIZC.....	122
5.2.1 –Capão Novo.....	123

5.2.2 – <i>Planície costeira de Ravenna</i>	126
5.3 –Conclusão.....	130
REFERÊNCIAS CAPÍTULO 1 E 5	135
ANEXOS	154
ANEXO 1.....	155
ANEXO 2.....	159

ESTRUTURA DA TESE

Esta tese de doutorado foi estruturada no formato de artigos, como requerido pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Os artigos foram elaborados durante o período do doutorado e submetidos para uma revista científica indexada.

Capítulo 1 – Apresenta uma introdução sobre esta Tese, o estado da arte, os objetivos, as premissas, as hipóteses e os métodos. Os capítulos 2, 3, 4 e 5 contêm os artigos e apresentam os principais resultados obtidos neste trabalho. Como os artigos foram integrados neste volume apresentando a mesma estrutura com a qual foram enviados aos jornais científicos, o texto apresentará algumas redundâncias.

Capítulo 2 – Expõe a reconstrução do modelo evolutivo costeiro na Planície Costeira de Ravenna (Itália). Esse artigo é intitulado “***Surface and subsurface data integration, using new data to rebuild the surface geological model, from the Little Ice Age to the present, in the Ravenna coastal plain, northwest Adriatic Sea (Emilia-Romagna, Italy)***” e foi submetido para a revista *CATENA* (ISSN - 0341-8162) em fevereiro de 2016. Esse artigo apresenta a integração dos trabalhos feitos na Planície Costeira de Ravenna com os dados de subsuperfície obtidos com GPR. Esses dados foram adquiridos em 2D com alta resolução, seguindo os métodos e aplicações já utilizados na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, para reconstruir e entender a evolução costeira local.

Capítulo 3 – Apresenta o monitoramento sazonal das dunas utilizando dados de alta resolução provenientes de levantamentos aerofotogramétricos com um veículo aéreo não tripulado (VANT). O artigo é intitulado: “***Seasonal dune and beach monitoring using photogrammetry from UAV surveys in Ravenna coast (Emilia-Romagna, Italy)***” e foi submetido para a revista *Geomorphology* (ISSN - 0169-555X) em dezembro de 2015. Esse trabalho permitiu estudar o impacto da urbanização no sistema praia/duna e comparar as dinâmicas dos sistemas costeiros naturais e antropizados.

Capítulo 4 – Apresenta o artigo submetido para o *International Coastal Symposium, 2016* em Sidney (Austrália) e publicado no *Journal of Coastal Research* (ISSN - 0749-0208) com o título: “***Natural and anthropic adjacent coastal system compare using DSM from low cost UAV survey (Capão Novo, RS/Brazil)***”.

Nesse trabalho é proposto um novo método para adquirir um Modelo Digital de Superfície e ortofotos de alta resolução utilizando um VANT de baixo custo.

Capítulo 5 – Contém as considerações finais deste trabalho, integrando os resultados obtidos e apresentados no capítulo anteriores.

As referências citadas nos capítulos 1 e 5 se encontram no final do texto, já as referências citadas nos artigos são apresentadas ao final de cada um dos mesmos.

Capítulo 1

1 –INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são objeto de pesquisa em muitas partes do mundo desde quando o homem notou a complexidade desse sistema (Carter, 1988), o qual inclui todas as geosferas, formando um ambiente altamente dinâmico (Davidson-Arnott, 2010). As pesquisas sobre sistemas costeiros iniciaram há algumas décadas atrás, com interesse científico principalmente por parte de geomorfólogos, geólogos e biólogos.

Quando as zonas costeiras deixaram de ser um limite entre o oceano e o terreno, na metade do século XX, o homem começou a explorar os recursos das mesmas, aumentando a pressão sobre elas a um nível global (Tagliani *et al.*, 2003). Assim, os estudos sobre as zonas costeiras passaram a ser inseridos também em outras disciplinas, visando o entendimento da interação entre o homem e a natureza.

Atualmente, o homem explora as zonas costeiras, seja para obter recursos naturais, como areia das dunas para ser aplicada na indústria da construção ou em *placers* de praias (Roy *et al.*, 1992), seja para a construção de portos comerciais, ou ainda para a recreação através da construção de casas para veraneio, estabelecimentos comerciais e instalações vizinhas às praias e dunas. Esse uso intenso e a antropização das zonas costeiras, ou seja, as transformações feitas pelo homem no ambiente costeiro, causam muitas mudanças no sistema, refletindo principalmente na dinâmica do mesmo.

Sistemas deposicionais do tipo barreira-laguna com costas arenosas, os quais se encontram principalmente em áreas costeiras onde o aporte de sedimentos é abundante e a topografia local é suave (Dillenburg & Hesp, 2009), possuem uma dinâmica ativa, com uma rápida resposta às mudanças ocorridas nas variáveis que os controlam (Davis, 1984; Hayes, 1979), sejam essas mudanças causadas por eventos com escala temporal-espacial curta ou grande. Além disso, esses sistemas podem mudar rapidamente em um breve período de tempo, devido a uma tempestade, por exemplo, e se recuperar em um período mais longo (Short, 1999).

A antropização das zonas costeiras aumenta as variáveis que podem causar essas mudanças na dinâmica do sistema barreira-laguna, como a construção de molhes ou diques para a proteção da costa, os quais afetam a distribuição de sedimentos. Essa ocupação antrópica, na maioria dos casos, começou sem um plano territorial (Esteves *et al.*, 2003) ou conhecimento sobre o comportamento do

ambiente, o que, combinado com a dinâmica do sistema costeiro, aumenta a vulnerabilidade dos municípios localizados nas zonas costeiras, representando também uma perda econômica para os municípios. Devido a isso, as pesquisas científicas foram direcionadas para entender a interação entre os fatores naturais e antrópicos que agem sobre a dinâmica do sistema costeiro. As mesmas passaram a ser de alto interesse também para autoridades locais, tomadores de decisões e gestores, por aumentar o conhecimento sobre as zonas costeiras e ajudando-os nas suas ações, reduzindo assim os danos e a vulnerabilidades das mesmas.

Muitas organizações internacionais definiram diretrizes para serem aplicadas pelas autoridades locais visando a Gestão Integrada das Zonas Costeiras (GIZC) (GESAMP, 1996), como a *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) (Pernetta & Elder, 1993), World Bank, (World Bank, 1996), UNESCO (UNESCO, 2006), UNEP (Coccosis, 1997). Alguns países também passaram a financiar pesquisas no âmbito costeiro, como a União Europeia (EU WG-ID, 2004; European Parliament, 2002) e o Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA), visando a elaboração de diretrizes nacionais para a GIZC (Brasil, 1988; Projeto Orla, 2002) e projetos para caracterizar o estado da arte (MMA, 2006) e aplicar as diretrizes na melhor forma possível.

Por isso, é fundamental tratar o estudo das zonas costeiras com uma abordagem multidisciplinar, afim de entender como os fatores naturais e antrópicos agem sobre o comportamento local dos ambientes costeiros, analisando os eventos em diferentes escalas espaciais-temporais. Através dessa integração de conhecimentos, é possível ter as melhores respostas da aplicação das diretrizes para a GIZC, diminuindo a vulnerabilidade das instalações costeiras, as perdas econômicas e sociais, e aumentando a resiliência do ambiente costeiro.

Este trabalho faz parte do projeto RIGED-RA (Recuperação e Gestão das Dunas do município de Ravenna), o qual propõe uma nova metodologia para estudar o sistema costeiro de Ravenna, integrando os trabalhos científicos e as autoridades e as partes interessadas locais (*stakeholders*) locais, melhorando assim a comunicação entre a comunidade científica e os tomadores de decisões, como requerido pelas organizações internacionais (UNEP, 2015).

Além do mais, esta Tese foi realizada em cotutela entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Universidade de Bologna (UNIBO), juntando

dois grupos de pesquisa, IGEO-UFRGS (Instituto de Geociências) e IGRG-UNIBO (*Integrated Geoscience Research Group*), com experiências internacionais, e promovendo um intercâmbio de conhecimento nas pesquisas sobre os sistemas costeiros, mais especificamente no campo da Geologia Marinha e da Gestão Integrada das Zonas Costeiras.

Dentro do projeto RIGED e nesta Tese, foram usadas novas tecnologias, com um bom custo-benefício para serem aplicadas em estudos científicos sobre as zonas costeiras e na GIZC por grupos de pesquisa, órgãos governamentais e companhias privadas. Isso permite integrar a base de dados já existente e conhecimentos sobre a área a ser estudada e também monitorar os ambientes costeiros.

O intercâmbio de conhecimentos foi a motivação maior para realização deste trabalho, já que, por exemplo, a União Europeia considera as atividades com cooperação internacional como prioridade total no Sétimo Programa Quadro para a Pesquisa (FP7), com fundos de 8.1 bilhões de euros para as pesquisas ambientais (EU, 2015). O intercâmbio permite aumentar os conhecimentos sobre esse sistema complexo, para assim mitigar os impactos devido a fatores naturais e antrópicos nas zonas costeiras, beneficiando ambos os países parceiros.

1.1 –Estado da arte

1.1.1 –Sistemas barreira-laguna

Para tratar sobre os sistemas deposicionais do tipo barreira-laguna, é necessário definir a nomenclatura utilizada nesta Tese. Em muitos trabalhos sobre os sistemas barreira-laguna esses são tratados com nomenclaturas diferentes, gerando incertezas e aumentando a dificuldade para ampliar os conhecimentos sobre esse sistema e conseqüentemente a aplicação da GIZC local.

Para evitar confusões, foi definido, em consenso pela comunidade científica que se ocupa de estudos nas zonas costeiras, que as barreiras costeiras são uma estrutura paralela a linha de costa, formada por areias, cascalhos, conchas e pequenas quantidades de matéria orgânica acumulados devido a ação das marés, ondas e vento; as mesmas possuem uma parte subaquosa chamada de *shoreface* (face litorânea) e uma parte subaérea, que pode ter de dezenas de metros até alguns quilômetros e pode ser permanentemente ou parcialmente exposta acima do nível do mar durante as marés altas (Dillenburg & Hesp, 2009).

Assim sendo, esta tese entende os sistemas deposicionais do tipo barreira-laguna como sendo três subsistemas deposicionais geneticamente relacionados. De acordo com Villwock & Tomazelli (2006) são estes: o subsistema de barreira (i), que é formado basicamente pelas barreiras costeiras, ou seja, as praias e os campos de dunas adjacentes, os quais representam literalmente uma barreira física entre o mar e o continente. O subsistema lagunar (ii), o qual se encontra na retaguarda da barreira (*backbarrier*) e corresponde a região com uma topografia mais baixa entre a barreira costeira e os terrenos mais antigos, que podem corresponder aos subsistemas de barreiras mais antigos e que se encontram interiorizados. Esse subsistema pode ser caracterizado pela presença de diferentes tipos de ambientes deposicionais, com a presença ou não de corpos lagunares como, por exemplo, lagunas, lagos costeiros, pântanos, canais e deltas intralagunares. E finalmente, o subsistema dos canais de ligação (*inlets*) (iii), onde ocorre a ligação entre o subsistema lagunar e o mar.

A nomenclatura barreira-laguna será utilizada para os sistemas deposicionais das duas áreas objeto de estudo deste trabalho, a Planície Costeira de Ravenna e a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, as quais serão descritas com mais detalhes ao decorrer do texto.

Outros termos que serão usados e precisam ser definidos, quando mencionados em estudos científicos nas áreas costeiras, são os termos transgressão e regressão. Esses termos foram utilizados de acordo com Curray (1964) e estão ligados ao movimento da linha de costa. O termo transgressão está associado ao movimento da linha de costa em direção ao continente e o termo regressão ao movimento da linha de praia em direção do oceano. A regressão pode ocorrer por dois fatores: devido ao declínio do nível relativo do mar (NRM) e, nesse caso, é chamada de regressão forçada; ou também pode ser controlada pelo aporte de sedimentos, sendo então chamada de regressão normal (Posamentier *et al.*, 1992). Durante a regressão, é possível ter uma barreira regressiva (Dillenburg *et al.*, 2004; FitzGerald *et al.*, 2007; Roy *et al.*, 1994) formando uma planície de cordões litorâneos (*strandplains*), onde podem existir cordões de praias, cordões de dunas frontais (*foredune ridges*), *cheniers* ou campos de dunas transgressivos, todas essas são feições morfológicas que definem a gênese dessas planícies (Hesp *et al.*, 2005).

Já os termos progradação, agradação e retrogradação se referem a arquitetura deposicional na bacia sedimentar e são o resultado do equilíbrio entre a criação de

espaço de acomodação versus o aporte sedimentário (Van Wagoner *et al.*, 1990). De acordo com Van Wagoner *et al.*, (1990), a progradação ocorre quando o aporte sedimentar é maior que a criação de espaço de acomodação e o sistema se move em direção ao oceano; a retrogradação acontece quando a criação de espaço de acomodação é maior que o aporte de sedimentos, fazendo com que o sistema se mova em direção ao continente; já quando o aporte de sedimentos está em equilíbrio com a criação de espaço de acomodação, acontece a agradação. Existe também outro uso do termo progradação que, de acordo com Galloway & Hobday (1983), significa a movimentação devido ao aporte sedimentar, sem considerar uma direção específica.

Outros termos que serão utilizados neste trabalho e precisam de uma definição são: i) suscetibilidade, que, de acordo com a UNDP (2004), é a avaliação do sistema em ser afetado por um evento danoso, onde as condições físicas do ambiente são as principais influências, independentemente da influência do homem; ii) vulnerabilidade, de acordo com a UNDP (2004), é a exposição do sistema a danos causados por eventos naturais combinados com danos ligados aos homens e suas atividades; a vulnerabilidade é também dependente da suscetibilidade do sistema (Bonetti *et al.*, 2015; Muller & Bonetti, 2014); iii) resiliência, de acordo com o IPCC (2012), é “a habilidade do sistema e das partes que o compõe em antecipar, absorver, acomodar, ou recuperar-se dos efeitos causados por um evento danoso, em tempo hábil e eficiente, incluindo a garantia que haja a preservação, restauração, ou a melhoria das suas estruturas e condições básicas e essenciais”.

Definidos os termos, é necessário definir o estado da arte dos sistemas barreira-laguna, em estudo nesta Tese. A definição do estado da arte das áreas foi realizada pesquisando trabalhos prévios e presentes em bibliografia, os quais tratam: da evolução recente do sistema; do estado atual de cada área com os principais fatores (naturais e antrópicos) que agem sobre as áreas de estudo; e dos principais métodos de gestão e monitoramento, identificando as diretrizes mais utilizadas para definir a gestão costeira local em ambas as áreas.

Integrando esses conhecimentos e incorporando-os aos trabalhos já realizados com novas tecnologias e com um raciocínio geológico, é possível aumentar o conhecimento sobre esses ambientes. A identificação dos principais problemas permite a este estudo propor melhores métodos, baseados em estudos científicos,

para serem aplicados na GIZC e no planejamento territorial de longo e curto prazo dos sistemas barreira-laguna em estudo e em outros com características similares.

1.1.2 –O sistema barreira-laguna da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (Brasil)

A ocupação nas zonas costeiras do RS e os estudos sobre a PCRS, que é a parte emersa da Bacia de Pelotas, começaram após a metade de século XX. Os primeiros trabalhos realizados para caracterizar a PCRS foram feitos usando o método de correlação litoestratigráfica (Carraro *et al.*, 1974; Delaney, 1965), quando o primeiro mapa geológico da PCRS foi proposto por Delaney (1965). A partir da metade dos anos 80, passou a ser usada uma outra metodologia para os estudos sobre a geologia da PCRS, baseada na correlação cronoestratigráfica (Tomazelli & Villwock, 2005).

A metodologia da cronoestratigrafia permitiu correlacionar e assembling os sistemas deposicionais, baseando-se no reconhecimento de fácies (Figura 1). A mudança metodológica permitiu elaborar e reconstruir com mais consistência a evolução costeira local, representando com uma melhor resolução a distribuição espacial dos depósitos sedimentares na PCRS (Barboza *et al.*, 2009; Tomazelli & Villwock, 2005).

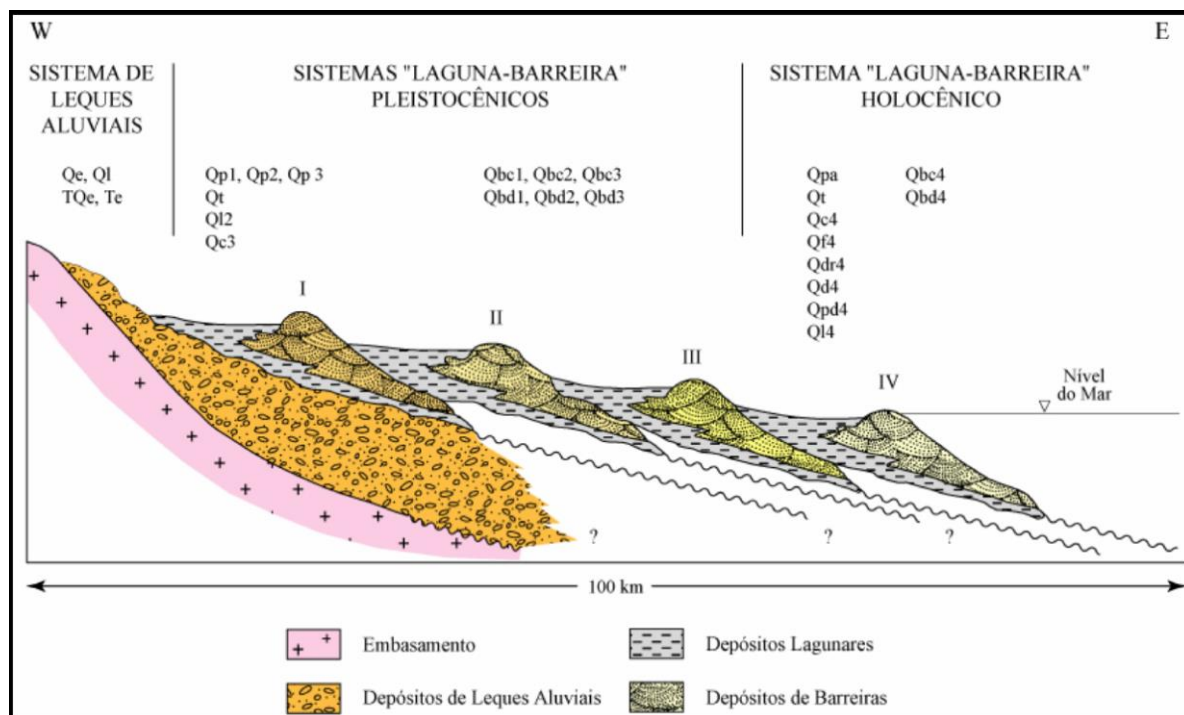


Figura 1: Perfil transversal da PCRS obtido a partir da correlação cronoestratigráfica mostrando os quatro depósitos das barreiras e lagunas (Tomazelli & Villwock, 2000).

Utilizando a associação de fácies a partir da cronosestratigrafia, foi possível estudar a planície costeira com maiores detalhes, permitindo identificar e caracterizar quatro diferentes sistemas barreira-laguna na PCRS (Villwock, 1984; Villwock & Tomazelli, 1995; Villwock *et al.*, 1986). Esses sistemas barreira-laguna se formaram durante o Quaternário e atualmente a geomorfologia está preservada na PCRS. Os autores nominaram os quatro sistemas como Barreira I, II, III e IV, sendo: Barreira I, o sistema mais antigo, que se formou durante o Pleistoceno e Barreira IV, o sistema o mais atual, formado no Holoceno (Villwock & Tomazelli, 1995).

Esses sistemas barreira-laguna representam os quatro ciclos regressivos-transgressivos controlados pela glacioeustasia e a morfologia preservada no terreno marca a máxima transgressão do sistema para cada ciclo (Villwock & Tomazelli, 1995) (Figura 2). As idades das Barreiras I, II, III e IV propostas por Villwock & Tomazelli (1995) foram correlacionadas respectivamente com os picos 11, 9, 5 e 1 da curva dos estágios isotópicos do oxigênio de Shackleton & Opdyke (1973) e Imbrie *et al.* (1984) e correspondem às idades 400, 325, 125 e 7 ka.

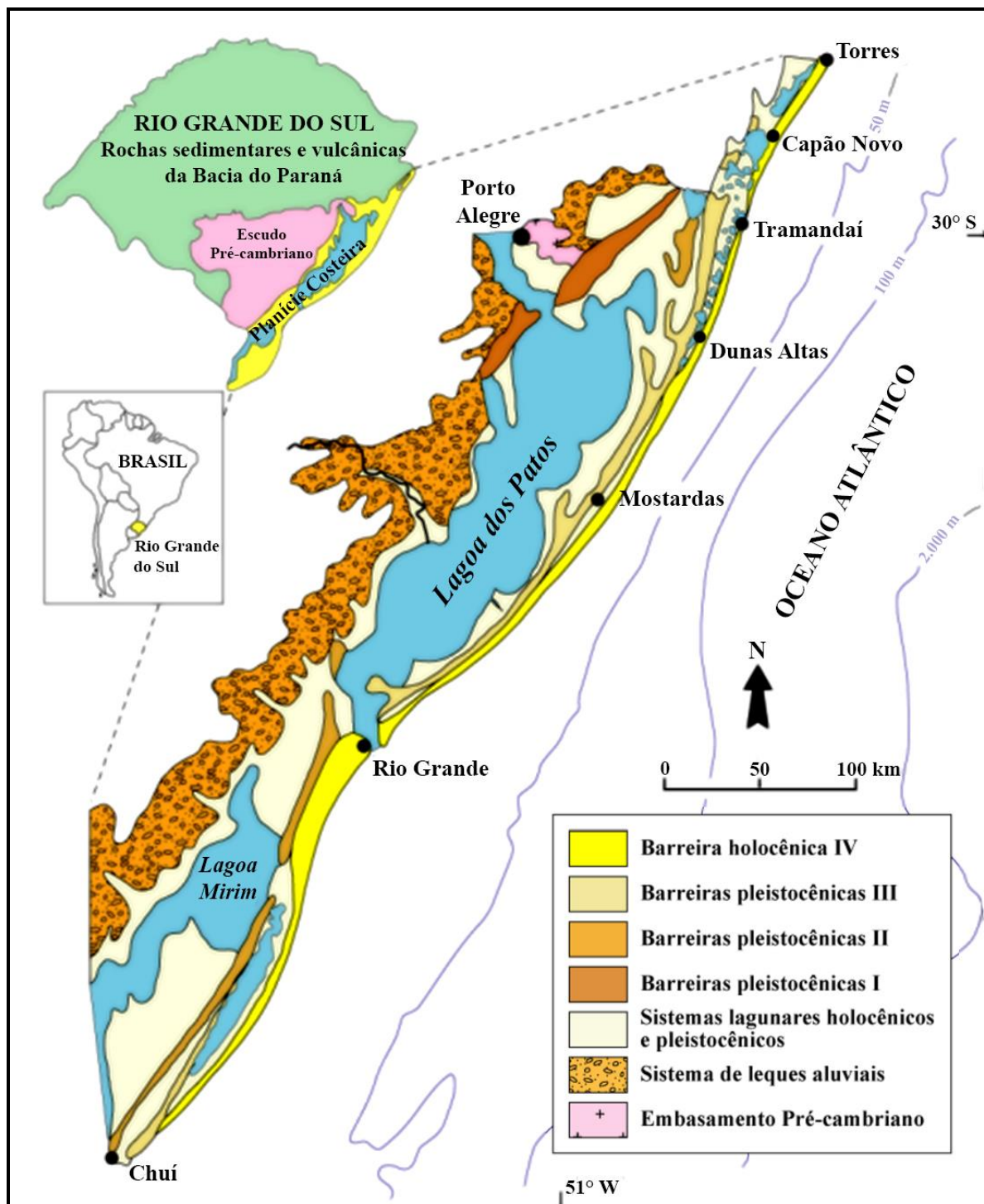


Figura 2: Mapa geológico da PCRS (modificado de Tomazelli & Villwock, 1996).

Para corroborar as correlações propostas, foram feitas datações de C^{14} e datações com Luminescência Ótica Estimada (LOE). No entanto, recentemente foram encontrados e datados dentes fósseis na Barreira II, sugerindo que a mesma corresponde ao pico 7 na curva do oxigênio isotópico (Lopes *et al.*, 2009, 2011). A partir dessas novas datações, trabalhos recentes (Rosa, 2012) sugerem que a Barreira II teria uma idade em torno de 200 ka e, portanto, a idade da Barreira I

também seria mais recente do que a sugerida por Villwock & Tomazelli (1995), podendo ter sido formada a aproximadamente 325 ka.

Os estudos sobre a PCRS se renovaram em 2007, quando começou-se a utilizar o GPR (*Ground Penetrating Radar*) para estudar os ambientes costeiros em subsuperfície (Barboza, 1999; Tomazelli *et al.*, 2008a), integrando os conhecimentos adquiridos com os trabalhos já realizados.

Diferentemente de outros métodos comumente utilizados para estudos geológicos como, por exemplo, a penetrometria ou a estratigrafia a partir de furos de sondagem, que consiste em obter uma visão em 1D dos depósitos, o GPR é um método que permite estudar os depósitos em subsuperfície através de uma visualização contínua em 2D dos mesmos, baseando-se na estratigrafia dos depósitos costeiros e na sua geometria deposicional (Barboza *et al.*, 2009, 2011).

O GPR aumentou a qualidade e a resolução dos registros nos depósitos sedimentares e foi aplicado principalmente nos estudos dos depósitos holocênicos devido aos melhores resultados obtidos (Rosa, 2012). Com a utilização do GPR, muito trabalhos para complementar o modelo costeiro já existente foram desenvolvidos ao longo da PCRS. Pode-se citar os trabalhos de Barboza, 1999; Barboza *et al.*, 2009, 2010, 2011, 2013; Caron *et al.*, 2011; Dillenburg & Barboza, 2014; Dillenburg *et al.*, 2009, 2011, 2014; Silva *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008, e algumas teses de doutorado: Rosa, 2012 e Caron, 2014. Também já foram realizados estudos sobre a evolução costeira com os conceitos da estratigrafia de seqüências em uma abordagem hierárquica (Rosa, 2010, 2012; Rosa *et al.*, 2011a, 2011b).

Estudando a subsuperfície em 2D de modo contínuo foi possível também caracterizar as gêneses das fácies nos depósitos sedimentares, identificando a *shoreface* (face praial) inferior e superior, o *backshore/foreshore* (pós-praia/antepraia) e as *foredune ridges* (Barboza *et al.*, 2011, 2013; Hesp *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2010).

Esse tipo de dado em subsuperfície permitiu descrever o comportamento da linha de costa desde o Holoceno até o presente, diferenciando as zonas transgressivas localizadas nas projeções da PCRS e as regressivas localizadas nos embaiamentos (Barboza *et al.*, 2011; Dillenburg *et al.*, 2009).

A mudança na abordagem metodológica e a integração dos dados nos estudos dos ambientes costeiros na PCRS propiciaram uma importante contribuição para a comunidade científica que trabalha na Bacia de Pelotas, possibilitando expandir os conhecimentos para campos multidisciplinares como as ciências biológicas e a oceanografia. Atualmente, os dados provenientes do GPR são fundamentais para uma efetiva aplicação da GIZC e para auxiliar na construção de um plano de desenvolvimento territorial de longo prazo (Rosa *et al.*, 2011a).

O período em que se iniciaram os principais trabalhos geológicos ao longo da PCRS (Villwock, 1984; Villwock *et al.*, 1986) corresponde também ao período em que se iniciou a ocupação no litoral do RS. Os 620 km costeiros do RS (Figura 2) foram divididos em três setores em 1988 (FEPAM, 2015): Litoral Norte (setor norte, desde Torres até Dunas Altas, Figura 2); Litoral Médio (setor central de Dunas Altas até São José do Norte, ao norte do *inlet* da Laguna dos Patos); Litoral Sul (setor sul desde o *inlet* da Laguna dos Patos até o Chuí). Atualmente, o setor do Litoral Norte é o mais urbanizado (Esteves *et al.*, 2003; Strohaecker, 2007; Strohaecker & Toldo, 2011; Tomazelli *et al.*, 2008b).

Durante os anos 80, começou uma intensa urbanização no setor norte da costa do RS (Strohaecker, 2007), seguindo os três principais vetores de urbanização verificados nos litorais brasileiros: i) urbanização, ii) industrialização e iii) exploração de atividades turísticas (Moraes, 1999). Em muitos casos, esses novos balneários, no setor norte da costa do RS, foram construídos sobre campos de dunas. Atualmente, no Litoral Norte do RS, existem apenas dois campos de dunas, que se encontram sob forte pressão, principalmente devido à expansão urbana (Tomazelli *et al.*, 2008b).

Os balneários presentes no Litoral Norte do RS são frequentados principalmente durante o verão, quando a população nas áreas costeiras aumenta consideravelmente. Juntamente com essa urbanização, que ocorreu de forma desordenada sem um planejamento apropriado (Esteves *et al.*, 2003), sobretudo no setor norte, ocorreram outros fatores que contribuíram para aumentar a pressão sobre o sistema costeiro, principalmente através da construção de calçadões, casas e estruturas sobre as dunas.

A consequência dessa urbanização sem planejamento prévio no início da ocupação do setor norte, reflete, atualmente, em uma maior vulnerabilidade dos

balneários e no aumento da suscetibilidade do ambiente costeiro. Para mitigar o problema e reduzir as perdas futuras dos pontos de vista econômico, social e ambiental, os municípios costeiros do Litoral Norte do RS necessitam de um plano de gestão para ser aplicado a curto e longo prazo, juntamente com a aplicação da GIZC seguindo diretrizes internacionais (por exemplo, AGENDA 21), nacionais (por exemplo, Projeto Orla) e regionais (por exemplo, o Programa Regional de Gerenciamento Costeiro) (Gruber *et al.*, 2003; Nicolodi *et al.*, 2002; Portz, 2012). Atualmente, diversos municípios costeiros no Litoral Norte já comissionaram o desenvolvimento de planos diretores e/ou planos de gerenciamento com as diretrizes para sustentar a aplicação localizada da GIZC (Gruber, 2005; Gruber *et al.*, 2008).

Outros elementos importantes presentes na costa do RS são os canais de drenagem (*washouts*) entre as dunas frontais e a praia, chamados de sangradouros, os quais escoam o fluxo de água das dunas para o mar, causando erosão sobre as dunas e praias. Em muitos casos, os sangradouros são modificados pelo homem, intensificando o processo erosivo e diminuindo assim a resiliência do ambiente costeiro (Tabajara & Weschenfelder, 2011). Esses canais de drenagem representam um elemento de alto perigo em toda a costa do RS, necessitando de um plano de manejo específico para a diminuição dos danos que podem gerar (Figueiredo & Calliari, 2005).

Para os estudos feitos na PCRS, esta Tese se concentrou no balneário de Capão Novo (Figura 2) no setor norte da costa do RS. A localidade apresenta uma área com todos os elementos antrópicos citados acima, e, adjacente ao balneário, há uma área com elementos naturais e pouca antropização, a qual serviu para comparação. Esse balneário se estabeleceu sobre uma área onde, anteriormente, existia um campo de dunas não vegetado (Figura 3 B), hoje extinto, com a presença de dunas barcanas que migravam em direção ao continente, sendo alimentado principalmente pelos sedimentos transportados pelo vento nordeste. As dunas barcanas se moviam sobre depósitos eólicos, formados por fases de dunas transgressivas e paralelos a linha de costa, na forma de lençóis de areia transgressivos (*transgressive dune fields*), os quais foram cobertos pela vegetação, como é possível observar na Figura 3, (Hesp *et al.*, 2005, 2007).

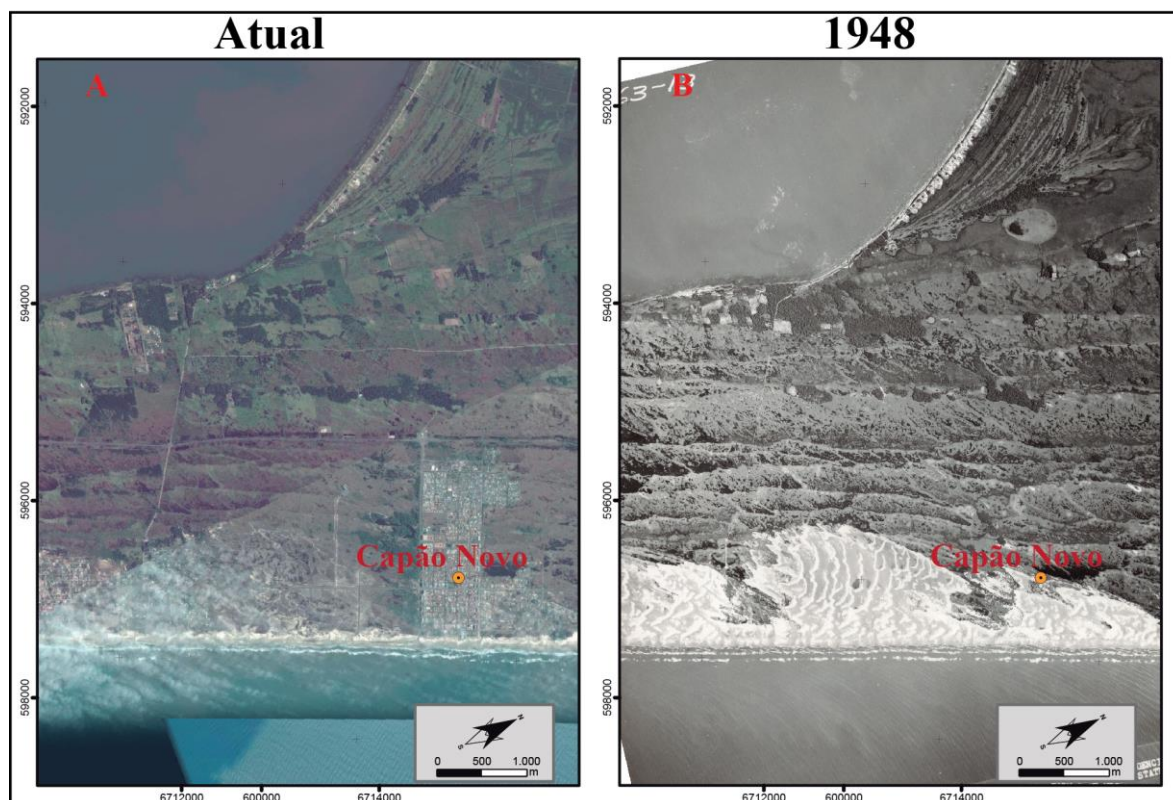


Figura 3: Comparação da área de estudo. A) Imagem atual a partir do Google Earth mostrando o balneário de Capão Novo; B) foto aérea de 1948 mostrando o campo de dunas com as dunas barcanas migrando sobre os campos de dunas transgressivos vegetados.

Capão Novo se encontra em um setor regressivo da PCRS (Dillenburg & Barboza, 2014; Dillenburg *et al.*, 2009) e apresenta uma taxa de aporte sedimentar positiva. Porém, a ocupação humana na área é um importante fator que aumenta a vulnerabilidade do sistema, principalmente por causa dos calçadões e casas construídas sobre as dunas (Esteves *et al.*, 2003).

As características da costa na PCRS e que se verificam em Capão Novo são: praias classificadas como dissipativas e intermediárias, com cerca de 60 m de largura; regime de micro marés; costa dominada por ondas, onde o aporte de sedimentos é controlado pela deriva litorânea no sentido nordeste; sedimentos das praias dominados por quartzo, com tamanho de areia muito fina a média (Dillenburg & Barboza, 2014; Gruber *et al.*, 2006).

As características do balneário de Capão Novo, citadas acima, levaram a escolha deste balneário como objeto de estudo desta Tese. Na área de estudo foi possível analisar o comportamento do ambiente costeiro devido aos fatores naturais e antrópicos que atuam no local. Os estudos feitos contribuíram também para complementar o banco de dados da área, além de servirem como subsídio para

programas locais de monitoramento e de gestão das zonas costeiras. Ao decorrer desta Tese, as características da área de estudo serão discutidas com mais detalhes.

1.1.3 – O sistema barreira-laguna na Planície Costeira do Pó (Itália)

A Planície Costeira do Pó ou Planície Padana, onde se encontra a zona costeira de Ravenna (Figura 4), é a outra área de estudo desta Tese. Diferentemente da PCRS no Brasil, essa área apresenta importantes elementos territoriais que foram criados pelo homem nos séculos passados. Porém, do ponto de vista do sistema costeiro em si, essas duas áreas possuem muitas similaridades que se diferenciam principalmente pela escala espacial, sendo a PCRS maior que a Planície Padana.

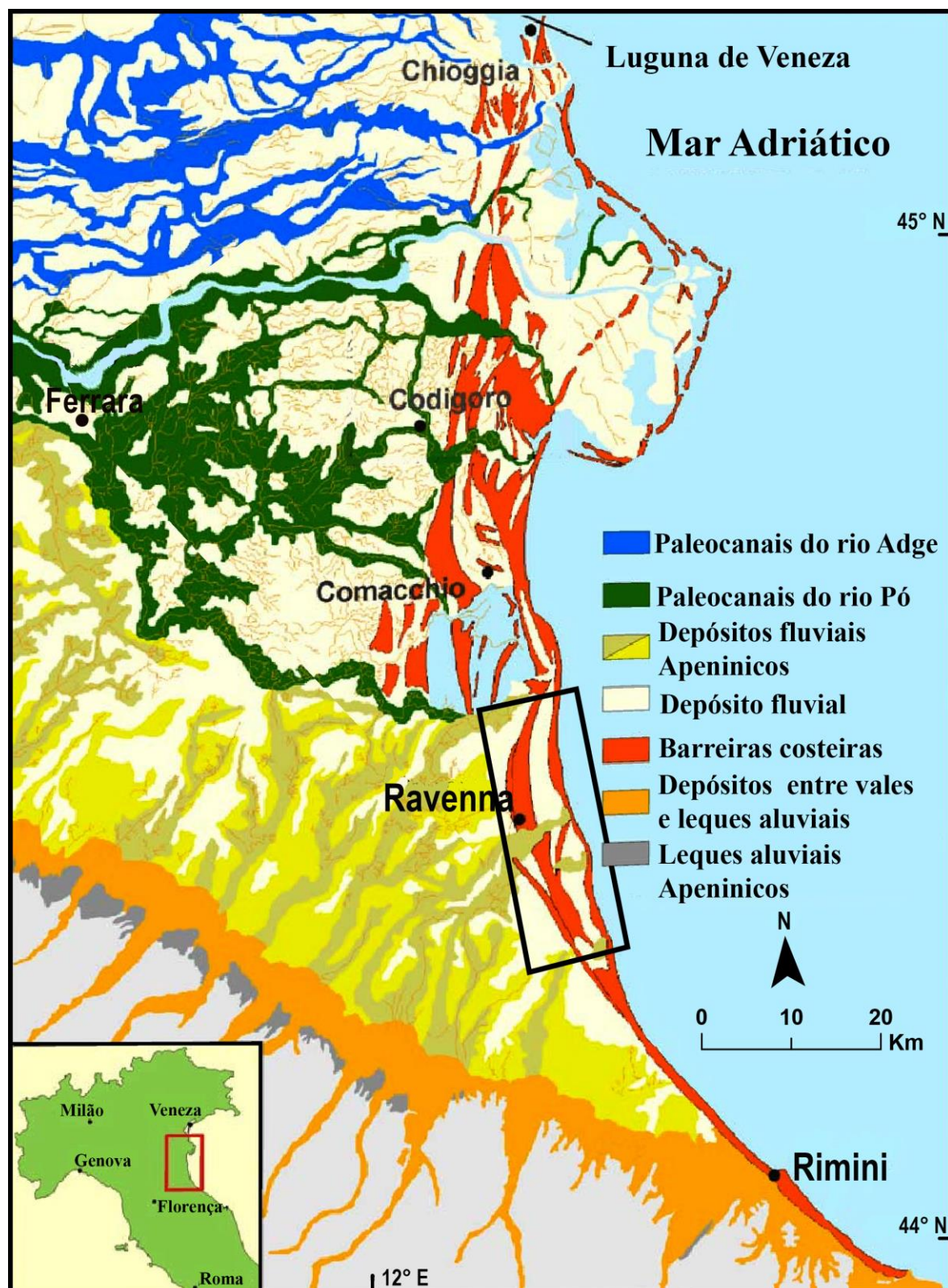


Figura 4: Mapa geológico da Planície Padana em escala 1:250.000, evidenciando a planície costeira de Ravenna (Regione Emilia-Romagna, 1999; modificado de Stefani & Vincenzi, 2005).

Os primeiros trabalhos em escala de bacia foram patrocinados sobretudo pela AGIP (Azienda Generale Italiana Petroli), servindo para pesquisar as potenciais

reservas de óleo e gás. Os mesmos tiveram como objetivo caracterizar as estruturas da bacia nos anos 80, utilizando dados provenientes da sísmica de reflexão, os quais permitiram identificar a espessura dos depósitos quaternários, que vão de 0 a 1000 – 1500 m de profundidade (AQUATER, 1978; Amorosi, 1999; Cibin & Severi, 2005; Dalla *et al.*, 1992; Ori, 1993; Pieri & Groppi, 1981).

Os estudos sobre a evolução costeira e as definições geológicas da Planície do Pó começaram com uma caracterização sintética dos depósitos continentais quaternários em termos de terraço, terraço holocênico e terraços pleistocênicos tardio e recente, onde foram observadas diferenciações litológicas simples entre areia e argila (Lipparini, 1969).

Os primeiros trabalhos utilizando a estratigrafia de sequências como abordagem foram propostos por Ricci Lucchi *et al.* (1982), o qual reconhece uma sucessão com dois depósitos sedimentares durante o Quaternário (Figura 5): i) *Qm* depósitos marinhos; e ii) *Qc* depósitos continentais. Além do mais, foi identificada uma tendência evolutiva regressiva durante o Quaternário, onde os depósitos marinhos tornaram-se menos profundos até chegarem nos depósitos continentais.

Unidade Estratigráfica		Seqüência Depositional	ANOS (milhões de anos)	Escala Chronoestratigráfica (milhões de anos)	UNIDADE HIDROESTRATIGRÁFICA			
					Grupo Aquífero	Complexo Aquífero	Sistema Aquífero	
Super sistema Emiliano-Romagnolo	Sistema Emiliano-Romagnolo Superior	Qc	~0.12	Holoceno Pleistoceno Superior	A	A1		
						A2		
						A3		
						A4		
Sistema Emiliano-Romagnolo Inferior	Qc	Qc ₁	~0.35-0.45	Médio Pleistoceno	B	B1		
						B2		
						B3		
						B4		
Areias de Imola	Qm	Qm _{3''}	~0.65	Pleistoceno Inferior	C	C1		
		Qm _{3'}				C2		
Grupo Santerno	Qm	Qm ₂	~0.8				C3	
		Qm ₁	~1.0				C4	
		P2	~2.2			Plioceno Inferior-Superior	C5	
			~3.3-3.6	Plioceno Inferior				
			~3.9	Mioceno				
					BASE DO AQUITARDO			

— Superfície de Descontinuidade principal
— Superfície de Descontinuidade Inferior

Figura 5: Esquema estratigráfico dos depósitos plio-quadernários da bacia Padana (modificado de Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998).

Depois de Ricci Lucchi *et al.* (1982), outros trabalhos foram desenvolvidos utilizando essa sucessão e reconhecendo limites menores dentro do Qm e Qc, aumentando os detalhes da seqüência deposicional na Planície do Pó e incluindo as unidades hidroestratigráficas (Amorosi & Farina, 1995; Amorosi *et al.*, 1998a, 1998b; Di Dio *et al.*, 1997; Marabini *et al.*, 1987, 1995; Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998). Esses estudos promoveram uma estrutura regional (Figura 4) para as pesquisas geológicas, incluindo os trabalhos desenvolvidos nas zonas costeiras (Stefani & Vincenzi, 2005).

Os estudos nas zonas costeiras da Planície do Pó começaram com uma abordagem geomorfológica (Bondesan, 1985; Castiglioni, 1999; Castiglioni *et al.*, 1990; Ciabatti, 1966; Nelson, 1970; Veggi & Roncuzzi, 1973; Veggiani, 1974), visando principalmente entender as modificações feitas pelo homem no território, sendo esses elementos importantes que influenciaram a evolução costeira local.

Em trabalhos anteriores realizados na área, também foram identificados cordões litorâneos a partir da fotointerpretação. Em outros trabalhos, o objetivo foi reconstruir a evolução da rede de drenagem através da cartografia histórica, que permite demonstrar a morfologia do território e as mudanças feitas sobre o mesmo, possibilitando uma avaliação qualitativa sobre as transformações no território (Gabbianelli *et al.*, 2000).

Os trabalhos com dados de subsuperfície começaram a partir da análise de furos de sondagem rasos, de 6 a 30 m de profundidade (Bondesan *et al.*, 1995; Brunetti *et al.*, 1998; Colantoni *et al.*, 1990; Rizzini, 1974; Veggianni, 1973). Esses trabalhos permitiram estudar os depósitos holocênicos, identificando o ciclo transgressivo-regressivo.

Atualmente, os estudos na zona costeira são baseados principalmente nos dados penetrométricos combinados com datações de C^{14} e com datações a partir da associação de moluscos, para construir um modelo de subsuperfície da Planície do Pó em alta resolução (Amorosi & Marchi, 1999; Amorosi *et al.*, 2003; Scarponi & Angeletti, 2007; Wittmer *et al.*, 2014). Os mesmos serão apresentados em maiores detalhes ao longo desta Tese, com foco nos trabalhos sobre a subsuperfície da planície costeira de Ravenna.

Diferente dos estudos feitos na PCRS, que utilizam o método do GPR, os métodos utilizados na planície do Pó são em 1D. Isso impossibilita a visualização da geometria deposicional, que seria corroborada com os dados a partir dos furos de sondagem e da penetrometria.

Os primeiros trabalhos realizados, integrados com os trabalhos recentes, permitem construir um rico data-base para formar os principais mapas geológicos da Planície do Pó, os quais envolvem a planície costeira de Ravenna (Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, 1999, 2005; Castiglioni *et al.*, 1999). Os mesmos também permitem elaborar um importante data-base em web GIS para auxiliar os estudos e trabalhos geológicos da superfície e da subsuperfície envolvendo a Planície do Pó (Regione Emilia-Romagna, 2015).

Além disso, diversas anomalias climáticas modificaram o clima na Europa; a Pequena Idade do Gelo (PIG) (Figura 6) foi a última anomalia climática significativa (Brázdil *et al.*, 2005). A PIG durou de cerca de 1500 até aproximadamente 1850, influenciando as taxas de progradação durante o Holoceno e agindo sobre a

evolução geológica e geomorfológica da costa norte adriática (Carbognin & Tosi, 2002; Marabini & Veggiani, 1992; Simeoni & Cobau, 2009). A PIG foi um fator determinante que condicionou a atual morfologia da costa de Ravenna, criando um sistema praias jovem, formado nos últimos cinco séculos.

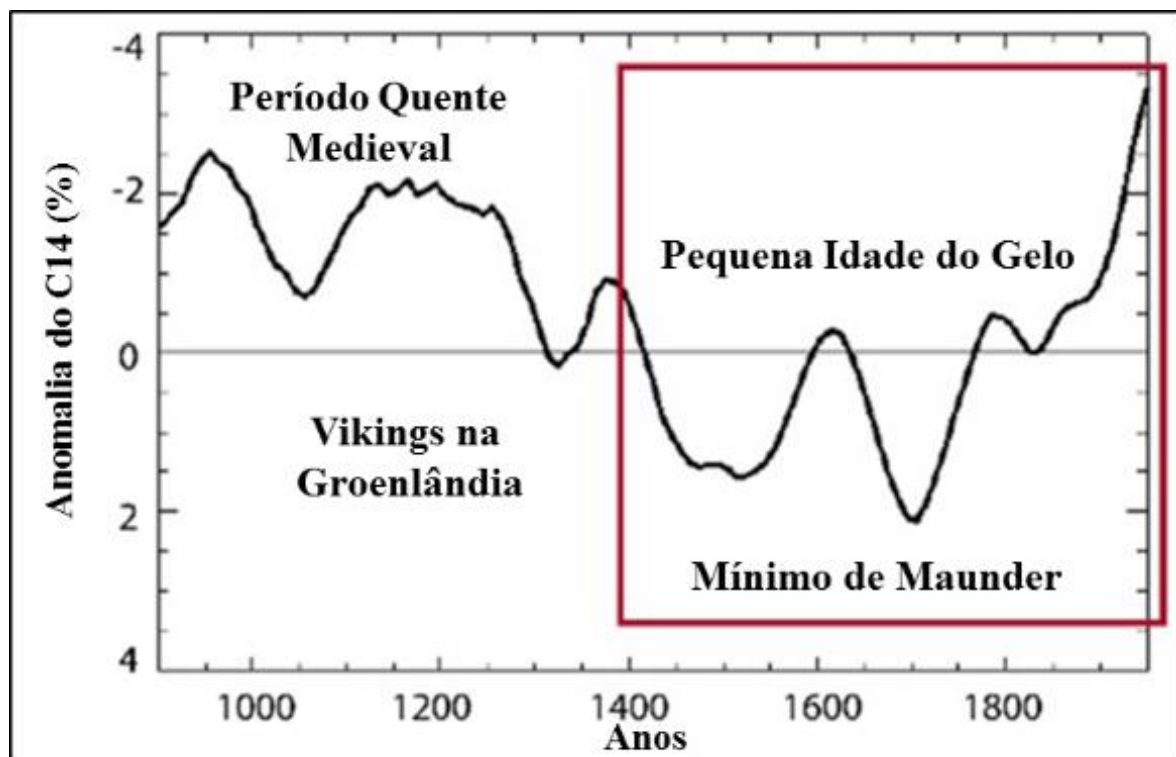


Figura 6: Variações na concentração de C^{14} nos últimos 1000 anos devido a atividade solar; em destaque, no retângulo vermelho, as variações durante a PIG (modificado de Svensmarck, 2000).

A planície costeira de Ravenna, assim como toda a planície do Pó, está sujeita a subsidência, por fatores naturais (compactação dos sedimentos plio-quadernários) e antrópicos (exploração de fluidos no subsolo, principalmente metano e água) (Bondesan, 1989; Brunetti *et al.*, 1998; Carminati & Martinelli, 2002; Teatini *et al.*, 2006). As taxas de subsidência (antrópica e natural) variam entre 10 e 12,5 mm/ano, de acordo com os levantamentos geodésicos feito pela ARPA (Agência Regional para a Proteção do Ambiente) (Taramelli *et al.*, 2014).

De acordo com Armaroli *et al.* (2012), a costa de Ravenna é caracterizada por praias arenosas, com baixa elevação sobre o nível médio do mar, e praias de baixo ângulo e dissipativas, com um regime de micro marés. A deriva litorânea é dominada pelas ondas provenientes do *offshore* e os sedimentos vão de areia fina a média (Gambolati *et al.*, 1998).

Em termos de gerenciamento, a planície costeira de Ravenna está sujeita a diversos fatores, naturais e antrópicos, sendo importante entender as suas influências para obter um adequado plano de manejo. Essa é uma importante condição que faz com que as autoridades locais invistam em estudos costeiros para auxiliar no seu gerenciamento.

Após a Segunda Guerra Mundial, as ações do homem sobre a costa se intensificaram; atualmente a costa de Ravenna tem um andamento erosivo, causado principalmente pela influência do homem (Gambolati *et al.*, 1998; Harley & Ciavola, 2013; Martinelli *et al.*, 2011). As intervenções nos rios que chegam na costa de Ravenna, através da construção de digas, também interferiram nas taxas do transporte de sedimentos, alterando o aporte sedimentar (Martinelli *et al.*, 2011) e afetando o engordamento natural das praias.

A forte urbanização é suportada principalmente pela expansão dos balneários, com casas para veraneio, estruturas fixas construídas sobre a praia e atividades turísticas (Cencini, 1998). Desde 1982 até 2006, mais de 50% das dunas frontais contínuas existentes na costa de Ravenna foram extintas; atualmente, essas dunas frontais ainda presentes na área se encontram fragmentadas (Antonellini *et al.*, 2008).

Desde o início de 1980 até o presente, foram tomadas diversas ações para contrastar a erosão costeira. Alguns dos principais métodos utilizados foram o engordamento de praias e a construção de molhes nos pontos críticos das zonas costeiras, sendo que, foram instalados, em 60 dos 130 km de extensão da costa regional, molhes emersos, submersos, paralelos e transversais à linha de costa (Perini *et al.*, 2008), mudando a dinâmica do sistema costeiro.

Devido à alta vulnerabilidade das estruturas e casas presentes na costa de Ravenna e da alta suscetibilidade local do sistema praias e das dunas, essa zona segue diversas diretrizes para aplicação da GIZC, propostas pela União Europeia e pela Região Emilia-Romagna e baseadas em pesquisas científicas. Por exemplo, podemos citar os programas de pesquisa financiados como: BEACHMED-e, COATANCE, MICORE e EUROSION (Regione Emilia-Romagna, 2011, 2011a). Além do mais, esses programas conduziram a novas pesquisas para entender o comportamento do ambiente e, em muitos casos, facilitaram a implementação de novas estratégias para o gerenciamento das zonas costeiras.

1.2 –Objetivos

Os objetivos desta Tese foram estudar e integrar os conhecimentos sobre o comportamento das zonas costeiras caracterizadas por um sistema do tipo barreira-laguna em diferentes escalas temporais utilizando novas geotecnologias. Considerou-se a evolução territorial no Holoceno e o estado atual dessas zonas costeiras, associados aos fatores naturais e antrópicos.

Apesar de cada sistema costeiro ter sua dinâmica controlada pelas variáveis locais, este trabalho foca em dois diferentes sistemas deposicionais barreira-laguna: um no Litoral Norte da PCRS no Brasil e outro na Planície costeira de Ravenna na Itália, promovendo um intercâmbio de conhecimento entre os pesquisadores e sobre a GIZC em cada zona costeira.

Esses dois sistemas barreira-laguna têm pontos em comum e incomuns, os quais serão descritos nesta Tese. Embora a escala espacial desses dois sistemas seja diferente, eles estão expostos a uma forte antropização e os eventos naturais podem causar graves danos no território. Por causa disso, essas localidades necessitam de um plano de manejo específico, visando diminuir a vulnerabilidade e elaborar as ações futuras, baseadas nas prováveis mudanças do sistema que podem ser previstas.

O objetivo específico desse trabalho foi adquirir um conhecimento claro sobre as descontinuidades temporais nos processos evolutivos, morfológicos, físico-geométricos e nos parâmetros ambientais que dirigem os sistemas costeiros em estudo. Isso foi feito estudando a dinâmica da evolução local no Holoceno e o comportamento das dunas frontais e praias perante as principais variáveis que agem sobre as áreas de estudo, a fim de aplicar os conhecimentos obtidos nos atuais programas de GIZC locais.

A causa da falta de conhecimento e de uma gestão inadequada dessas variáveis que controlam o sistema costeiro, o mesmo pode entrar em crise (Figura 7). Isso pode também causar danos nas atividades que exploram os recursos do sistema costeiro, aumentar a vulnerabilidade e suscetibilidade do sistema e causar perdas sociais, ambientais e econômicas imensuráveis.



Figura 7: Interação entre o homem e o ambiente no sistema costeiro. A) as dunas frontais se movendo sobre os calçadões no Litoral Norte do RS; B) modificações feitas pelo homem no sistema costeiro de Ravenna.

1.3 –Premissa e Hipótese

As premissas para elaborar a hipótese desta Tese se basearam no fato de que, para fazer uma GIZC eficiente, é necessário conhecer da melhor maneira as interações entre as variáveis que controlam o sistema costeiro, analisando as suas influências em diferentes escalas espaciais e temporais (Figura 8). Também, quando possível, é necessário integrar as escalas analisadas (Orford & Carter, 1995; Stive *et al.*, 2002).

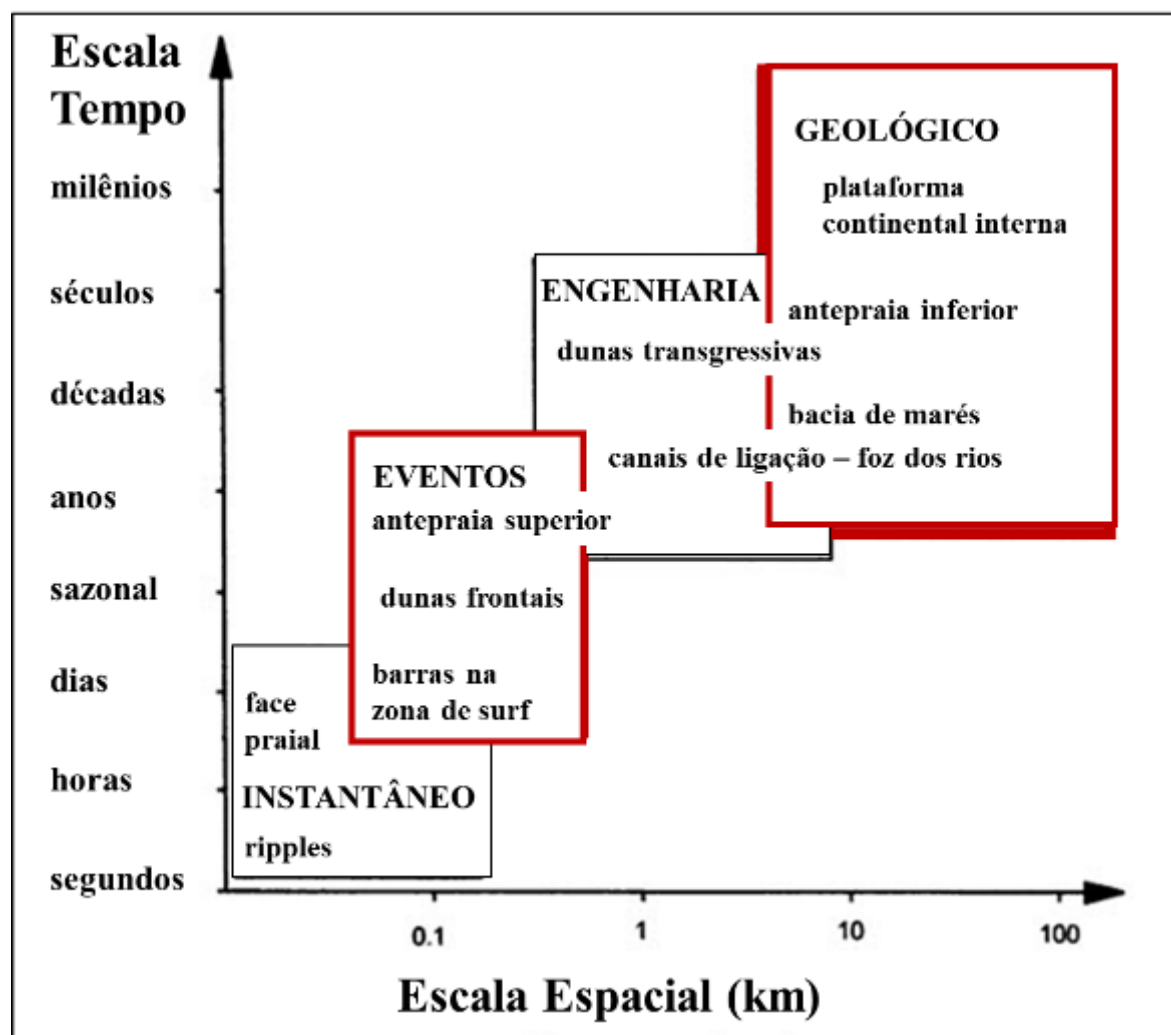


Figura 8: Definição das escalas espaciais e temporais utilizadas nos estudos dos sistemas costeiros. Nos quadros em vermelho, as escalas tratadas neste trabalho (modificado de Cowell & Thom, 1994).

Devido a antropização, a pressão sobre os sistemas costeiros se intensificou, como pode ser visto no exemplo da costa de Ravenna. Na Figura 9A é possível observar a pressão sobre o sistema praia/duna causada pelos elementos antrópicos; na Figura 9B, 1 km mais ao sul, onde não se verifica a presença de elementos antrópicos, as dunas frontais são contínuas e mais preservadas.



Figura 9: Dois sistemas de dunas frontais adjacentes, com distância de 1 km: A) Dunas frontais sobre pressão devido a urbanização; B) dunas frontais preservadas e sem a pressão de elementos antrópicos.

Essa situação, com pressões antrópicas sobre o sistema costeiro, pode ser observada em muitas zonas costeiras do mundo. Outro exemplo se encontra no litoral norte do RS (Figura 10), onde a urbanização foi responsável pela extinção dos campos de dunas, devido a ocupação territorial desordenada e ao bloqueio do

aporte de sedimentos a partir das praias para os campos de dunas (Tomazelli *et al.*, 2008). Uma das consequências desses altos impactos sobre o sistema praia/duna é a diminuição da resiliência do sistema e o aumento da vulnerabilidade nos balneários (Woodroffe, 2007).

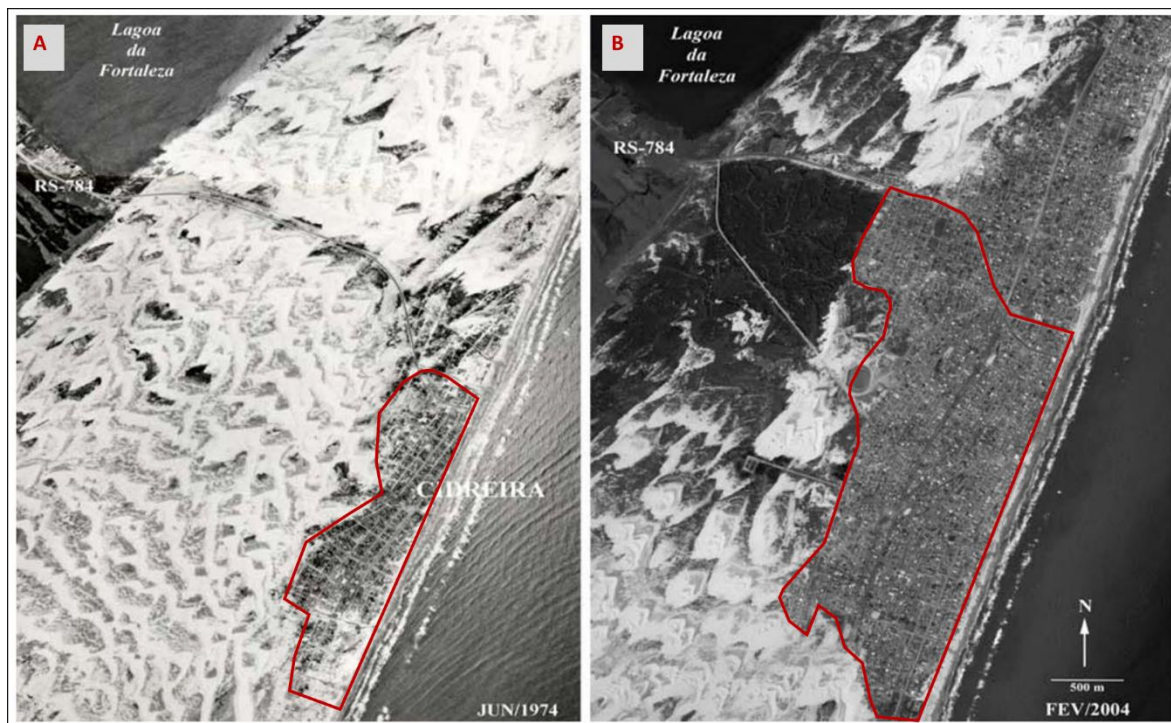


Figura 10: Urbanização no litoral norte do RS. A) Foto aérea de 1974 com a presença do campo de dunas; B) urbanização sobre a mesma zona após 30 anos, com a extinção do campo de dunas (modificado de Tomazelli *et al.*, 2008).

Para uma boa aplicação das ações de GIZC, é necessário pesquisar o sistema, conhecendo seu comportamento atual devido aos principais fatores que determinam a vulnerabilidade local, como as tempestades ou as construções feitas sobre o sistema praia/duna. Além disso, é também necessário conhecer o comportamento do sistema costeiro em um período maior através dos estudos da evolução costeira, para assim integrar os conhecimentos provenientes de duas escalas temporais diferentes, auxiliando os tomadores de decisão a seguir os melhores métodos para a aplicação da GIZC (Rosa *et al.*, 2011).

Assumindo que “o passado é a chave para entender o futuro” (Lyell, 1830), para entender a dinâmica atual do sistema costeiro e como foi determinada sua atual morfologia, é necessário estudar a evolução do mesmo.

A morfologia atual da plataforma interna é uma expressão da topografia antecedente, assim como também dos processos oceanográficos que agiram sobre

o fundo do mar durante a transgressão marinha pós-glacial. Essa afirmação é válida para plataformas autóctones que não recebem sedimentos modernos (Dillenburg *et al.*, 2000, 2009; Schwab *et al.*, 2000). Esse é o caso da planície costeira de Ravenna e do litoral norte do RS, os quais foram influenciados por anomalias climáticas de diferentes ordens, como os ciclos de glaciações, que determinaram a morfologia da PCRS, e a PIG, que teve uma forte influência na formação da morfologia atual da planície costeira de Ravenna.

Além do mais, quando o homem começou a utilizar as zonas costeiras como recurso, ele começou a influenciar, diretamente e indiretamente, no comportamento do sistema costeiro, impactando principalmente o equilíbrio sedimentar do sistema, o qual tem um papel determinante e complexo na evolução do sistema costeiro (Carter & Woodroffe, 1994). Por causa disso, conhecendo os processos ocorridos no Holoceno é possível integrá-los com os processos atuais, governados pela dinâmica natural e pela influência antrópica, permitindo aprender sobre o passado e prever o andamento futuro.

A partir das considerações feitas sobre a evolução costeira e o estado atual em ambas as zonas costeiras objeto de estudo, foi considerada a premissa de que é fundamental um plano de manejo específico para esses sistemas costeiros, com um alto conhecimento das variáveis que atuam sobre eles nas suas formas mais complexas. A partir dessas informações, foram elaboradas as seguintes hipóteses desta Tese:

“A antropização nas zonas costeiras em estudo neste trabalho modificou a morfologia e a dinâmica da costa, refletindo na sua resiliência, suscetibilidade e vulnerabilidade, se comparado com sistemas costeiros naturais”.

“Para uma gestão efetiva das zonas costeiras, a integração dos conhecimentos sobre a evolução recente do território com os conhecimentos do seu estado atual é um elemento fundamental na GIZC dos sistemas deposicionais do tipo barreira-laguna”.

Para testar essa hipótese, é necessário estudar o sistema costeiro com um elevado nível de detalhe, em diferentes escalas espaciais e temporais. Para tanto, foram utilizadas novas tecnologias para adquirir os dados que permitem estudar o comportamento dos sistemas costeiros em zonas naturais e antrópicas. Essa

hipótese foi testada na planície costeira de Ravenna e no setor norte do litoral do RS, estudando a evolução costeira no Holoceno e os eventos com escalas temporais anual e sazonal, como os processos erosivos das dunas frontais e as mudanças feitas pelo homem sobre as praias e dunas.

1.4 – Métodos

Para atingir os objetivos e testar a hipótese, neste trabalho, foram utilizados métodos científicos validados para serem aplicados em estudos nas zonas costeiras. Esses métodos também podem ser usados fora do âmbito acadêmico por gestores, órgãos governamentais, autoridades locais ou empresas privadas, visando aumentar a objetividade nas suas decisões. Faz-se assim um melhor uso dos recursos das zonas costeiras e exporta-se as pesquisas para outros campos e disciplinas fora da exclusividade do meio científico. Para isso, é fundamental que os métodos sejam eficazes e tenham um bom custo-benefício para serem usados também por empresas privadas ou órgãos governativos.

Seguindo essa proposta, os métodos empregados neste trabalho e que serão discutidos detalhadamente em cada artigo foram utilizados para criar um banco de dados com as informações adquiridas a partir dos trabalhos previamente realizados nas áreas de estudo e foram integrados com: i) fotografias aéreas históricas; ii) cartografia histórica (geodésica e pré-geodésica); iii) dados e informações provenientes do banco de dados do serviço geológico, sísmico e do solo da Região Emilia-Romagna, o qual permite fazer o download da carta do solo em escala 1:50.000 e os elementos geológicos e geomorfológicos do território em formato *shapefile* (Regione Emilia-Romagna, 2015); iv) imagens de satélite; v) levantamentos topográficos para a elaboração de modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais do terreno (MDT) a partir do LIDAR (gentilmente cedido por ENI-IT); vi) levantamento topográficos usando GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em modo RTK (*Real Time Kinematics*) para obter um dado topográfico acurado na sua componente horizontal e vertical.

A novidade neste trabalho, o qual contribuiu para o intercâmbio de conhecimento entre os dois grupos de pesquisa já citados, foi a aplicação de métodos geofísicos não invasivos através do GPR (Neal, 2004) na planície costeira de Ravenna, visando aumentar os conhecimentos sobre a subsuperfície da área e construir um modelo sobre a evolução costeira local. Esse método é baseado na

identificação das estruturas sedimentárias em subsuperfície e é muito utilizado nos estudos sobre a evolução costeira na PCRS (Barboza *et al.*, 2009, 2011; Rosa *et al.*, 2011) e em sistemas costeiros de outras regiões do mundo (Botha *et al.*, 2003; Bristow *et al.*, 2007; FitzGerald *et al.*, 2007; Johnston, *et al.*, 2007; Moller & Anthony, 2003). O GPR proporciona ótimos resultados, podendo ser útil para os trabalhos em âmbito científico ou fora dele, contribuindo para ampliar as pesquisas nos sistemas costeiros em que está sendo usado, tendo também um bom custo-benefício e uma fácil logística para o levantamento dos dados.

Neste trabalho, os levantamentos com o GPR foram feitos utilizando um coletor de dados da Radarteam Sweden AB, o COBRA PLUG-IN GPR (com uma Unidade de Controle e uma Antena SUBECHO modelo SE-70) (Figura 11). Utilizando uma antena transmissora e receptora com uma frequência central de 80 MHz na modalidade *Common Off-set*, para a localização dos perfis adquiridos, o sistema GPR possui um GNSS integrado.



Figura 11: Sistema GPR utilizada para adquirir os dados em subsuperfície na planície costeira de Ravenna.

Para o processamento dos dados foram usados dois softwares: RADAN™ e Prism2®. A interpretação dos dados se baseou nos métodos da sismoestratigrafia adaptados para os dados de GPR (Neal, 2004), a partir da identificação das terminações dos refletores que são: *onlap*, *downlap*, *toplap* e truncamentos, os

padrões dos refletores e a geometria (Mitchum Jr. *et al.*, 1977; Vail, 1987). As interpretações dos dados foram integradas com dados sobre a estratigrafia em subsuperfície proveniente da bibliografia e dos trabalhos já realizados na planície costeira de Ravenna.

Para a PCRS foi utilizado um novo instrumento e método que está sendo aplicado para o monitoramento do ambiente costeiro na planície costeira de Ravenna. O método se baseia na fotogrametria, com o levantamento das fotos aéreas feitas por VANTs (veículo aéreo não tripulado), os quais permitem elaborar MDS e ortofotos (Brown & Arbogast, 1999; Casella *et al.*, 2014; Gonçalves & Henriques, 2015; Mancini *et al.*, 2013). Esse método permite adquirir dados em alta resolução nos ambientes costeiros, sendo um método de baixo custo se comparado com outros métodos de levantamento, por exemplo, o LIDAR ou o Laser Scanner Terrestre, que são utilizados para adquirir um dado com a mesma qualidade dos adquiridos com os VANTs (Mancini *et al.*, 2013).

Na costa de Ravenna, foram feitos dois levantamentos (realizados pela SAL-Engineering), o primeiro foi realizado em setembro de 2014, quando terminou o período de verão, e o segundo no final do inverno em abril de 2015 (hemisfério norte) (SAL Engineering, 2015). Esses dois levantamentos permitiram fazer uma comparação das mudanças que ocorreram na praia emersa e nas dunas durante o inverno, avaliando os impactos devido às tempestades de inverno e às modificações feitas pelo homem nessa zona costeira.

Neste trabalho também foi elaborado um novo método para adquirir as fotografias aéreas usando um VANT comercial, DJI Phantom 2 (Figura 12). Esse é um método com um bom custo-benefício, seja para ser usado por grupos de pesquisa, órgãos governativos ou companhias privadas. Além do mais, os dados obtidos podem ser utilizados em diferentes campos de trabalho, como na engenharia, no planejamento e gerenciamento urbano, na biologia, geologia, arqueologia entre outras áreas do conhecimento, dependendo da necessidade de cada trabalho.



Figura 12: O DJI Phantom 2 com um GNSS eTrex[®]30-Garmin fixado ao VANT para obter um georreferenciamento mais preciso.

O DJI Phantom 2 utilizado é um quadricóptero com um estabilizador de câmera de 3 eixos; câmera em HD de 14 Megapixel, com FOV (campo de visão) de 140° f/2.8 focus at ∞ e pré-visualização em tempo real através de aparelhos com Android ou IOS. É necessário um smartphone integrado ao controle remoto do VANT para controlar a câmera e as configurações do VANT, além de auxiliar o operador a controlar a velocidade de aquisição, a cobertura do terreno das fotos e a altitude do voo.

Para a Geo-marca (*Geotagging*) das fotos aéreas, o VANT vem com um módulo GPS (*Global Position System*) integrado, onde a precisão horizontal e vertical são de ± 1 e ± 2.5 m respectivamente. Para melhorar a precisão na Geo-marca das fotos aéreas, foi acoplado um GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e Trex[®]30-Garmin com altímetro barométrico (Figura 12) calibrado com a topografia proveniente da carta topográfica local; já para fazer a Geo-marca, foi utilizado o software BaseCamp[™].

Devido ao FOV da câmera do DJI Phantom 2, que é do tipo olho de peixe, foi necessário fazer a correção da superfície das fotos, achatando-as (Figura 13) para fazer a reconstrução fotogramétrica. Essa correção foi feita usando o perfil de

calibração para o DJI Phantom 2 no software Agisoft Photoscan (Agisoft, 2013), e as fotos foram corrigidas usando ferramentas do software Adobe Photoshop CS5.



Figura 13: Fotografias aéreas adquiridas a partir do DJI Phantom 2. A) Fotos aéreas antes da correção; B) fotos aéreas após a correção.

Após a correção das fotos, foi utilizado o software Agisoft Photoscan para fazer a reconstrução fotogramétrica, baseando-se no método *Structure from Motion* (SfM) (Snavely *et al.*, 2007). Os resultados obtidos foram um MDS com células de 0,3 m e uma ortofoto com pixel de 0,05 m. Para aumentar a precisão do modelo, foram usados Pontos de Controle em Solo (GCP), os quais foram georreferenciados utilizando um aparelho GNSS da Trimble® para adquirir os pontos usando o sistema DGNS (Differential Global Navigation Satellite System).

A metodologia de levantamento usando um VANT de baixo custo descrita foi usada em Capão Novo, no Litoral Norte do RS, para elaborar o MDS e as ortofotos, permitindo comparar as zonas natural e antrópica adjacentes.

Seguindo a proposta de organizar o data-base com os trabalhos recentes e antigos nas áreas e para processar e operar os dados obtidos, foi usado um Sistema Informativo Geográfico (GIS). Os Softwares utilizados foram: Esri ArcGIS® 10.1, Blue Marble Geographics – Global Mapper™ 15 e Fledermaus-v7. Esses softwares permitem operar e analisar os conjuntos de dados informando a localização dos mesmos no espaço (Andrews *et al.*, 2002). Os dados foram operados com os seus sistemas de coordenadas apropriados; para os dados da área de estudo na Itália foi utilizado o DATUM UTM-ETRF 2000 e para os dados da área de estudo no Brasil foi utilizado o DATUM UTM-WGS84-22S. Assim, foi possível operar os conjuntos de dados com alta precisão para restituir os dados elaborados e interpretados com uma referência de localização no espaço. Os softwares GIS também foram utilizados

como instrumento para produzir o produto final, representados majoritariamente como mapas ilustrativos.

Capítulo 2

**SURFACE AND SUBSURFACE DATA INTEGRATION, USING NEW DATA TO
REBUILD THE SURFACE GEOLOGICAL MODEL, FROM THE LITTLE ICE AGE
TO THE PRESENT, IN THE RAVENNA COASTAL PLAIN, NORTHWEST
ADRIATIC SEA (EMILIA-ROMAGNA, ITALY)**



venerdi 05/02/2016 12:40

ees.catena.0.371bb7.9c949f6b@eesmail.elsevier.com em nome de Catena <catena-ee@elsevier.com>

Acknowledgement of receipt of your submitted article

Para frederico.scarelli@ufrgs.br; frederico.scarelli@studio.unibo.it; fredscarelli@gmail.com

Article Type: Research Paper.

Dear Dr. Scarelli,

Your submission entitled "Surface and subsurface data integration, using new data to rebuild the surface geological model, from the Little Ice Age to the present, in the Ravenna coastal plain, northwest Adriatic Sea (Emilia-Romagna, Italy)" has been received by Catena. This will soon be assigned to an editor. You will be able to check on the progress of your paper by logging on to <http://ees.elsevier.com/catena/> as Author.

CATENA

Contact us
Help ?



'My EES Hub' available for consolidated users ... [more](#)

[home](#) | [main menu](#) | [submit paper](#) | [guide for authors](#) | [register](#) | [change details](#) | [log out](#)

Username: frederico.scarelli@ufrgs.br
Switch To: Author | Go To: [My EES Hub](#)

Version: EES_2016.1

Submissions Being Processed for Author Frederico Maranzato Scarelli

Page: 1 of 1 (1 total submissions)

Display 10 results per page.

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status
View Submission Send E-mail		Surface and subsurface data integration, using new data to rebuild the surface geological model, from the Little Ice Age to the present, in the Ravenna coastal plain, northwest Adriatic Sea (Emilia-Romagna, Italy)	05 Feb 2016	05 Feb 2016	Submitted to Journal

Periódicos Qualis

Dados para Consulta

*Evento de Classificação:

Qualis 2014

Área de Avaliação

GEOCIÊNCIAS

ISSN:

Título:

CATENA

Classificação:

-- SELECIONE --

Periódicos

ISSN	Título	Área de Avaliação	Classificação
0341-8162	Catena (Cremlingen)	GEOCIÊNCIAS	B1

Surface and subsurface data integration, using new data to rebuild the surface geological model, from the Little Ice Age to the present, in the Ravenna coastal plain, northwest Adriatic Sea (Emilia-Romagna, Italy)

Frederico M. Scarelli^{1,2*}, Eduardo G. Barboza³, Luigi Cantelli¹, Giovanni Gabbianelli¹.

¹Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Sezione di Geologia, Via Zamboni 67, 40126, Bologna Italia

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Av. Bento Gonçalves 9500, 91509-900 Porto Alegre, RS, Brazil.

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Av. Bento Gonçalves 9500, 91509-900 Porto Alegre, RS, Brazil.

*Corresponding author: University of Bologna, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali, Via Zamboni 67, 40127 Bologna, Italy. E-mail address: frederico.scarelli@ufrgs.br (F. Scarelli).

ABSTRACT

New analyses of the geological surface in the Ravenna coastal plain provide an increase in the knowledge of this coastal system, updating the information about the geology in the area and rebuilding the coastal model without the man-made changes on the territory in the last four centuries, when the Little Ice Age had a large influence on the coastal dynamics. This natural factor, combining with the territory anthropization defined the actual coastal morphology, canceling most territorial indicators needed to create an accurate coastal evolution model, as the beach ridges morphology in the territory. Because of the lack of territorial indicators, it is not possible to use the morphology of the territory to construct a local coastal evolution model. Because of this, to rebuild the local coastal evolution model and to understand how the coastal evolution would be without human influence, this work proposes an integration of data using: actual data from the surface, such as the high-resolution digital surface model (DSM) and digital terrain model (DTM); the actual database from Emilia-Romagna Region Geological Survey, as the shapefile with the regional soil chart and with the geological elements present in the territory; the knowledge from previous work done in the area; and

the subsurface data from GPR, this is the first work using a GPR survey in the coastal plain of the northwest Adriatic. In addition, the work follows a successful case study done in the south Brazilian coastal plain, which integrated previous work done in the coastal plain with new methods such as GPR data acquisition. The GPR data allow corroboration of the interpretation of the coastal model constructed using the surface data. Finally, the surface geological model proposed in this work may aid the bases to: i) a new horizon for the local coastal geology scientific research; ii) a methodology to apply in other barrier-lagoon systems around the world to update knowledge about these systems; and iii) powerful information to support coastal managers and decision makers to construct a long-term master plan for effective Integrated Coastal Zone Management.

Highlights

- Multi-disciplinary approach to build a coastal evolution model to aid the new researches and the management in the coastal zone.
- Identification of the territory changes and the barrier-lagoon coastal system using different data source.
- Integrations of the surface and subsurface data to increase the resolution of the model
- Proposal of a new costal evolution model without man-made changes in the area to identify the real geomorphology of the coastal zone

Keywords: Coastal geology; Coast evolution; Barrier-lagoon; GPR; Soil association

1. Introduction

Coastal evolution researches are fundamental to improve our knowledge of the coastal territory and to understand the future evolution trend of coastal systems (Bonaldo and Di Silvio, 2013; Soons et al., 1997), knowing the behavior of the coastal territory due to the natural and anthropic pressure on this system (Zecchin et al., 2009). Considering the barrier-lagoon coastal system, according to the nomenclature proposed by Hesp and Short (1999), it is mainly based on their morphological settings. This system has a quick response due to: littoral dynamic changes, such as winter storms (Masselink and Van Heteren, 2014); changes in the fluvial sediments' discharge rate; coastal anthropization, such as coastal protection constructions (Armaroli et al., 2012; Corregiari et al., 2005); or relative sea level (RSL) changes, which are the primary controller in the barrier-lagoon system dynamics (Carter et al., 1989; Cowell and Thom, 1994; Dillenburg and Hesp, 2009; Duffy et al., 1989; Lorenzo-Trueba and Ashton, 2014; Stanley and Warne, 1994). Understanding the system response due to the cited factors, it is possible to decrease the vulnerability of the coastal system, mainly in the coastal zones under intense urbanization, which is verifiable in some coastal systems in the world. In addition, actually, the awareness of how barrier-lagoons evolve is an important topic to consider inside the Integrated Coastal Zone Management (ICZM) (Ceia et al., 2010; Oost et al., 2012), for territory management and to decrease coastal vulnerability (Davis, 1994) that is summed up in an economic advantage (Dezileau et al., 2011; Sebatier et al., 2012).

In most coastal environments that are characterized by a barrier-lagoon system, as in the US (FitzGerald et al., 1994; Hayes, 1994; Simms et al., 2006), Australia (Bird, 1965; Short and Hesp, 1984), Europe, in which the Po Plain is an example (Amorosi and Farina, 1995; Amorosi et al., 2005, 2008; Brunetti et al., 1998; Corregiari et al., 2005) or in the south Brazilian coast (Dillenburg et al., 2009; Sawakuchi et al., 2008; Tomazelli and Villwock, 1996, 2005). These coastal zones have been the subjects of research for decades, the main interest is to understand how the coastal dynamics are driven by the cycle of high- and low-frequency climate changes or by man-made changes, and how the climate changes guided the coastal evolution. Moreover, these researches are important for an efficacious economic resource exploration on barrier-lagoon systems in terms of minerals resources exploration and territory occupation (Roy et al., 1992).

Much work has been done to improve the knowledge integrating previous research with new tools to study coastal evolution, and in many cases the results obtained were used to assist ICZM programs (Rosa et al., 2011). An example is the Rio Grande do Sul coastal plain (PCRS) in southern Brazil, which is formed by four barrier-lagoon sedimentary deposits, which were shaped during the last four sea level highs in the Late Quaternary period (Dillenburg et al., 2009). The morphology of these four sedimentary deposits is preserved and may be observed on the territory. The Holocene barrier known as the Barrier IV (Villwock and Tomazelli, 1995) system is more studied and has been characterized to understand the actual coastal system behavior and to understand the process on the other older systems (Rosa et al., 2011) using a hierarchical method (Neil and Abreu, 2009). To study the PCRS, the Ground Penetrating Radar (GPR) method was used, which allows obtaining high-resolution data in the subsurface of the coastal deposits (Barboza et al., 2009, 2011, 2013, 2014; Biancini et al., 2014). The GPR data in PCRS were used in conjunction with stratigraphy correlation and dating from drill hole surveys to validate the coastal evolution model and to corroborate the GPR data interpretation (Barboza et al., 2009; Dillenburg and Barboza, 2014).

In the PCRS study case, this integration allowed identification of the Holocene coastal depositional system behavior with very high resolution (Barboza et al., 2011). Moreover, it was possible to recognize, through the reflectors' geometry from the GPR data, the type of coastal environment present in the subsurface, which is represented in the radar facies as beach ridges, backshore/foreshore, upper and lower shoreface (Barboza et al. 2014; Neal, 2004; Rosa, 2012). The scientific knowledge of Holocene coastal evolution may support territorial planning and management, and to identify the system trend on the Holocene time scale. In addition, it is possible to recognize the nature of the pressures on the system with more accuracy, aiding the local research groups and local authorities in the ICZM decision actions (Rosa et al., 2011; Zular et al., 2013).

Climate cycles on smaller scales than the Last Glacial Maximum (LGM) are unable to cause significant changes in coastal morphology, such as by the Little Ice Age (LIA), which occurred during the Holocene (Fig. 1). The LIA was a climatic anomaly during 1550 to 1850 (Barlow, 2001; Brázdil et al., 2005; Grove, 2001; Jones and Briffa, 2001; Svensmark, 2000) that changed the climatic conditions in Europe, influencing the geological and geomorphological evolution in the northern Adriatic coast

(Carbognin and Tosi, 2002; Marabini and Veggiani, 1992; Simeoni and Cobau, 2009) comprising the Ravenna coastal plain evolution.

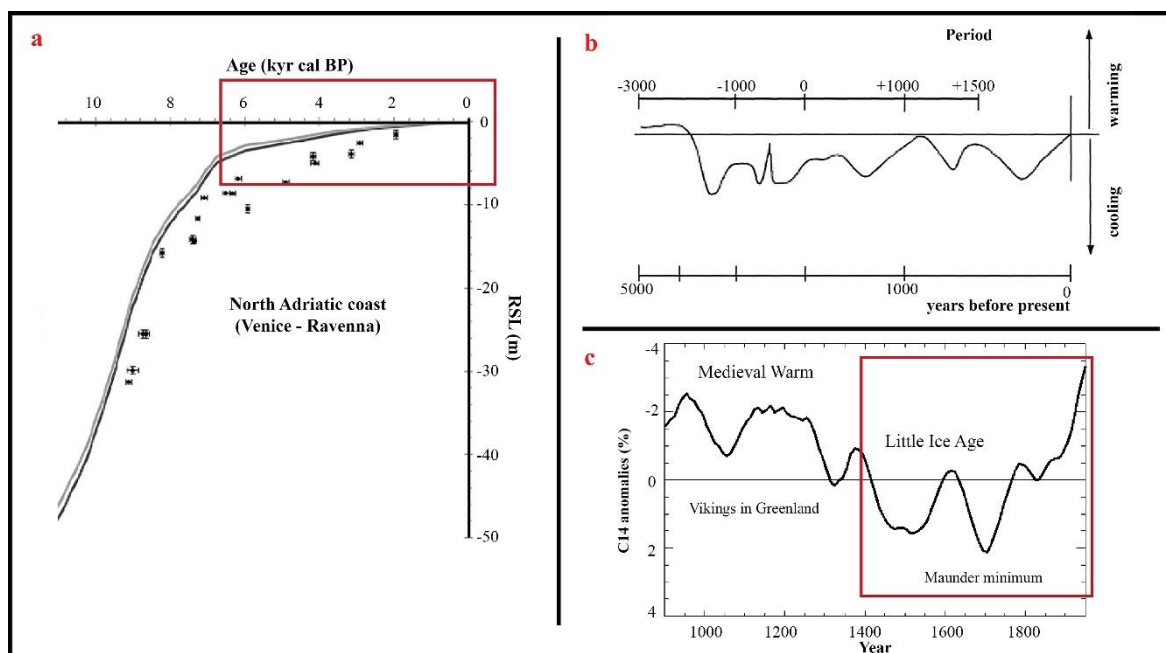


Fig. 1. a) Holocene Sea Level Curve for the North Adriatic (modified from Lambeck et al., 2011). b) Climate variations in Europe in the past 5 ky BP (modified from Betti and Morelli, 1998). c) Changes in ¹⁴C concentration in the past 1 ky BP due to solar activity (modified from Svensmark, 2000).

The purpose of this work is to increase knowledge about morphological changes in the Ravenna coastal plain during the LIA period to the present. It was performed by investigating the coastal plain surface using different data sources and the subsurface data using the GPR tool, as was done to study the Holocene evolution in the PCRS, integrating the results obtained with the data from previous work done in the Ravenna coastal plain.

The final aims of this paper are: i) integrate the past work on coastal evolution of the zone with new tools, to investigate the subsurface, increasing the knowledge of the recent coastal evolution in the Ravenna coastal plain, during the last four centuries; ii) investigate the interaction between the natural forces by short to medium time scale climatic changes with the anthropic influence on territory; iii) characterize the subsurface coastal environments, based on the geometry of sediment depositions identified through GPR data; iv) update and increase the local geological skills; v) integrate the territory elements with surface and subsurface geology to reconstruct a potential model

about the local coastal evolution without the man-made changes on the territory, providing a frame on the recent coastal evolution, to increase the knowledge about how the territory evolved, to show the importance of this knowledge for the ICZM work in all barrier-lagoon systems, to aid the decision makers with decreasing coastal vulnerability and lost economics.

2. Previous work

The Ravenna coastal plain has been well studied and documented in the literature, the Po Plain evolution has been studied and reconstructed in different temporal–spatial scales, providing an indispensable framework for this paper. The sedimentary evolution was identified with a regressive trend where two main cycles are present, marine (Qm) and continental (Qc) (Ricci Lucchi et al., 1982). Lower discontinuities were identified as inner Qm and Qc, which allowed recognition of the depositional sequence with inferior order as they are organized in different hierarchy orders (Amorosi and Farina 1995; Amorosi et al., 1998, 1998a, 2001; Farabegoli et al., 1997; Marabini et al., 1987).

In the Ravenna coastal plain, the first subsurface studies were done using drill hole data, which have allowed identification and building, with accurate data, the Holocene transgressive–regressive cycle and recognition of the coastal environments, characterizing the barrier-lagoon local system (Bondesan et al., 1995; Rizzini, 1974; Veggi and Roncuzzi, 1973; Veggiani, 1973). These works were complemented with recent works, through the drill hole data in the area, allowing increasing the resolution of coastal evolution, which were used to elaborate the Geological Chart in the Ravenna coast on a scale of 1:50,000 and others' work (Amorosi et al., 1996, 1999, 1999a, 2005).

The first works on the Ravenna coastal plain were mainly to investigate the geomorphology in the zone, starting in 1960 until the present (Amorosi, 1999), and to correlate the climatic changes with the regional coastal evolution (Stefani and Vincenzi, 2005). These papers characterized the geomorphological evolution due to natural forces and man-made changes, and due to the interaction between them, which were intense after World War II (WW II) (Bondesan, 1985; Castiglioni et al., 1990; Ciabatti, 1966, 1990; Colantoni et al., 1990; Nelson, 1970; Veggi and Roncuzzi, 1973; Veggiani, 1974). All of these works were done using data in one dimension, and represent an important database for local workers to understand the local barrier-lagoon system behavior.

3. Study area

The study area is in the Ravenna coastal plain (Fig. 2) located in the Po Plain, northwest of the Adriatic Sea in a passive margin and in an epicontinental basin (Ridente and Trincardi, 2005). The north part of the Adriatic Sea extends about 300 km, has a continental shelf with low gradient of about 0.002° (Storms et al., 2008), and is very shallow (<50 m) (Bever et al., 2009). The actual coastal system is characterized by sand beaches, with average 70 m width and low slope, about 0.03° . The dunes' height, when they are present, is between 1.5 m and 3 m and the entire territory in the study area has a low elevation above RSL; the mean maximum topographic height is about 1.5 m above the RSL (Armaroli et al., 2012).

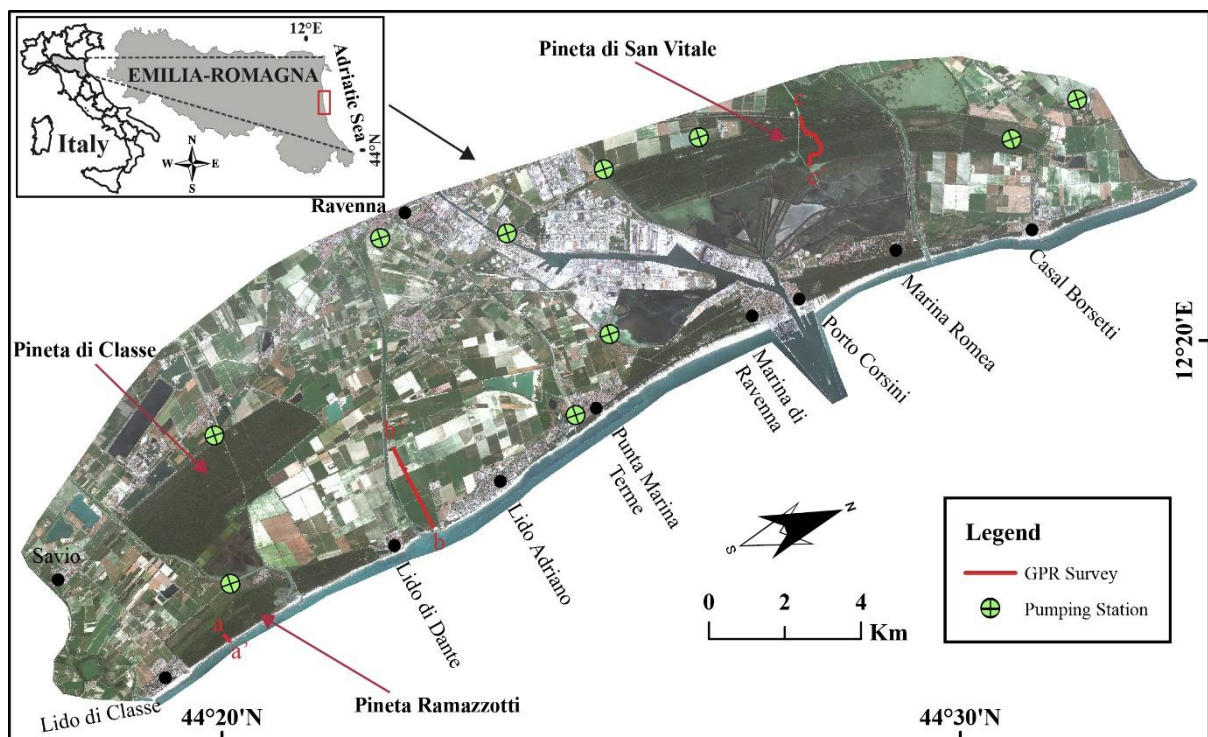


Fig. 2. Study area showing the Pinewoods (*Pineta*), the location of the drainage pumping station, and the GPR survey location in the Ravenna coastal plain.

According to Amorosi et al. (1999, 2008) at the end of the LGM, 18 ky BP, the continental shelf emerged, with Alps and Apennines rivers that formed the Po river drainage basin; during the Transgression System Tract (TST) from 14.5 to 5.5 ky BP the continental shelf was submerged. When the High Stand Tract (HST) started 5.5 ky BP, the shoreline was about 20 km inland from the present location. In the last 6 ky, when the sea level rise rate started to decrease (Fig. 1a) (Betti and Morelli,

1998; Lambeck et al., 2011), the normal regression began, with river mouths and beach ridges (beach ridges definition used according to Otvos (2000)) having had a significant progradation, creating the actual deposition structure of the Po Plain.

During the Holocene, the LIA was responsible for changing the deposition trend (Brázdil et al., 2005) conditioning the actual Ravenna coast morphology, through an increase of Apennines river solid transport where their deltas have had a high progradation rate, tens of meters per year (Grove, 2001). Because of climatic improvement at the beginning of the 19th century (Fig. 1b) the coastal dynamics were changed and the river deltas began to erode, going from river-dominated deltas to wave-dominated deltas *sensus* Galloway (1975) (Corregiari et al., 2005a). The existing local morphology is the result of a delicate balance between natural coastal dynamics and anthropic changes in the last few centuries; also, the man-made changes were fundamental to drive the coastal evolution in this area (Stefani and Vincenzi, 2005).

The Ravenna coastal plain and the whole Po Plain are subject to subsidence due to natural factors, by the Plio-Quaternary sediment compaction and due to anthropic factors by subsoil fluids exploration (Bondesan, 1989; Brunetti et al., 1998; Carminati and Martinelli, 2002; Gambolatti et al., 1999; Teatini et al., 2006). Today, the subsidence rate (anthropogenic plus natural) in the study zone is about 10 to 12.5 mm/y according to the ARPA (Regional Environment Protect Agency) Geodetic leveling survey, with an 18.5 mm/y rate peak in Lido di Dante coastal town (Taramelli et al., 2014).

Together with high progradation on the zone in the 19th century, man-made changes on territory for their own use began. The main changes were lagoon and swamp reclamations for agricultural exploitation with drainage channels being built; for harbors and sighting towers to be built (Cencini, 1998; Piastra, 2011); and adjusting and driving the river flow since Roman times (Petrini et al., 2014). To maintain the land reclamation in the Ravenna coastal zone, a complex drainage system is present that is linked with channels and a pumping station system (Fig. 2), where are present 10 pumping stations maintain the territory reclamation (Mollema et al., 2013). The human interventions during several centuries have eliminated the real morphology above the territory (Cencini, 1998), making it difficult to characterize the old natural morphology. Even so, sets of foredune ridges covered by man-made pine groves are present in some parts of the territory in the Pineta zone. Today, the coastline is

mainly characterized by sandbanks and littoral bars, in many case connected with littoral spits growth, which create a barrier-lagoon system that was reclaimed, reducing the lagoon area extension (Bondesan, 1990).

After WW II, human action in the Ravenna coastal plain was intensified. These actions were responsible for increasing the exploration of potential coastal economics, resulting in high urbanization on the entire territory (Martinelli et al., 2011). Actually, the Ravenna coastal plain has an erosional trend (Bondesan et al., 1989; Gambolati et al., 1998; Harley and Ciavola, 2013; Martinelli et al., 2011). Because of this local erosion trend, the local authorities built groins and breakwaters along the coast to contain this erosional trend, changing the coastal system dynamics (Armaroli et al., 2012). Moreover, human interventions on the rivers that reach the Ravenna coast, through dam construction, have interfered with the rivers' rates of sediment transport, affecting the natural coast erosion–deposition equilibrium (Antonellini et al., 2008; Martinelli et al. 2011; Piastra, 2011).

Actually, the coastal sediments' transport in the zone is dominated by waves generated in the open sea; the prevalent wave direction is from the NE, being responsible for the littoral drift dominance from south to north (Gambolati et al., 1998). However, in the north part of the study area, the littoral drift is from north to south, creating a “zero point” that coincides with Ravenna's port (Gambolati et al., 1998; Preti et al., 2009). The tidal regime is microtidal, where the neap mean range is about 30–40 cm and the spring mean range is about 80–90 cm (Armaroli et al., 2012); the currents generated by the tide are insignificant for the littoral drift (Gambolati et al., 1998).

4. Material and methods

To investigate the recent coastal evolution in the Ravenna coastal plain, different source data on the Geographic Information System (GIS) environment were integrated to increase the knowledge about the zone from the 16th century to the present day. In the GIS environment, it has been possible to integrate the different data sources and represent the results and the satellite imagery WordView-2 2011 was used as the base image. Combining the surface data obtained in this work with the subsurface data from GPR has allowed an increase in the knowledge and obtaining of a valid coastal evolution model for the study area.

4.1. Surface data

The surface analyses were done using different data sources. The historical cartography from 1690, 1713, 1757, and 1868 provide important territorial information about the geomorphology history and the man-made changes on the territory, on a century time scale. The historical data were used to gain a valid qualitative representation of the local coastal and morphology evolution (Bishop et al., 2012; Piastra, 2011).

In addition, a high-resolution digital surface model (DSM) from 2005 and a digital terrain model (DTM) from 2014 in .ascii format (generously provide by ENI-It) georeferenced using the DATUM UTM Zone 33N (ETRF00) were used as well as all data elaborated in the GIS environment, the vertical values were referred to the mean sea level. These data were obtained from a LIDAR survey with 1 m × 1 m cell size, which were used for the morphology investigation. The DSM from 2005 was reclassified in ESRI-ArcGIS® software in four altimetry classes to associate with the other data used in this work. The four classes were: i) terrain **Under RSL**, using the values below 0 m; ii) **RSL** terrain level from 0 to 0.5 m; iii) **Above RSL**, from 0.5 to 7 m; iv) the altimetry **Above 7 m**. The DTM from 2014 allows identification of the crest and cave morphology to map the beach ridges, where pinewoods exist above the beach ridges. In these data, the Pinewoods have been filtered to show the terrain. To aid the digitization of the beach ridges identified in the DTM data, seven topographic classes were defined to give a better visualization of the beach ridges on the DTM data. This definition was done in the GIS environment, and these classes have been chosen from the topographic profile following the methodology in Fig. 3 to identify the crest and caves that characterize the beach ridges. The values above 1.4 m represent the beach ridge crests and the values below 1.4 m between the crest represent the cave. The high resolution of the DTM data allows use of the decimal centimeter to represent the classes. After that, the beach ridges have been digitized in ArcGIS® and were called **DTM Beach Ridges**.

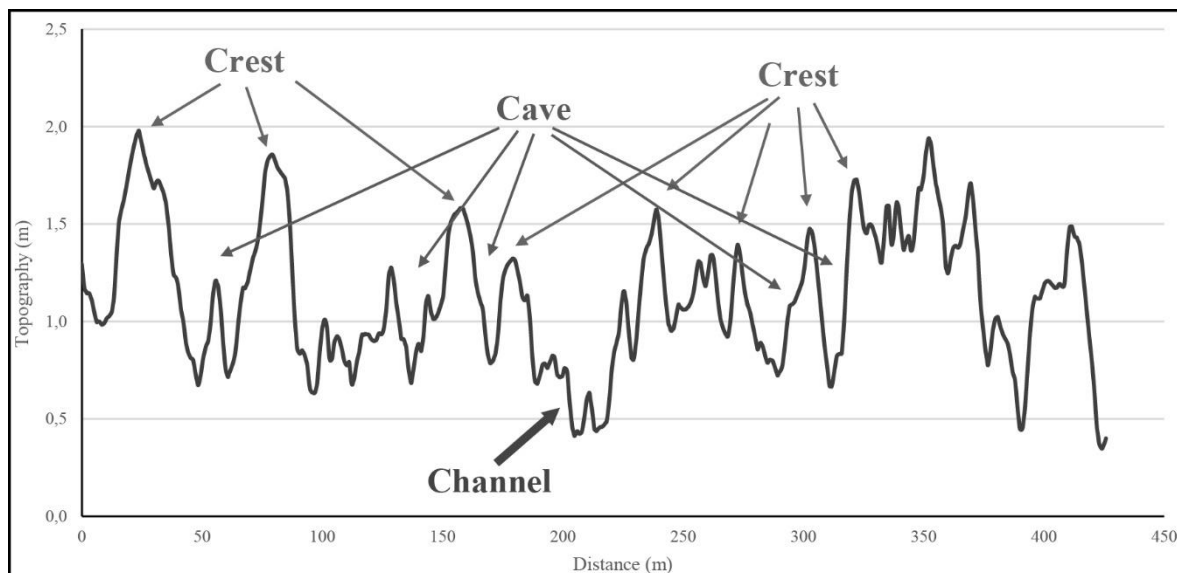


Fig. 3. An across profile from DTM 2014 showing the topographic differences that allow identification and digitization of the beach ridges.

The surface shapefiles of the geology elements from the 1:50,000 geological chart, soil units chart at 1:50,000, and soil-type catalogue were downloaded from the Emilia-Romagna Region WEBGIS Portal (I suoli dell'Emilia-Romagna, 2015; Regione Emilia-Romagna, 2015). The elements from the shapefile were overlapped between them and between DSM and DTM, to confirm the territorial information.

A new soil association was done using the soil-type catalogue, using all soil associations present in the Ravenna coastal plain. This association was done in the GIS environment to facilitate the visualization of the presence of the sand soil and mud soil in the Ravenna coastal plain, and to aid the territory interpretation. In this work, the soil association done by the Emilia-Romagna Region has been reclassified into three new soil association classes based on the sand, mud, and clay concentration (Table 1). The three classes proposed are: i) **Sand Soil**, where sand soils, named by Geology, seismic, and Emilia-Romagna Survey as Cerba fine sand (CER1); Cerba fine sand with superficial organic horizon (CER3); Cerba loam sandy with high contents of carbonate (CER4); San Vitale fine sand (SAV1); San Vitale loam sandy with high contents of carbonate (SAV3); and Pirottolo fine loam sandy (PIR1) were present; ii) **Mud Soil**, with Galisano loam clayey silt (GLS2); Galisano clayey silt to silt and sandy substrate, in coastal plain (GLS3), Marcabò loam silt (MCB1), Savio loam silt (SVO1), Roncole Verdi loam clayey silt (RNV1), Sant'Omobono loam silt (SMB1),

Villalta loam sand very fine (VIL1), soils composed mainly by mud and clay on the upper horizon; and iii) **Mud and Sand Soil**, where in the soil association done by Emilia-Romagna Region soils with sand and mud (the supplementary material presents a representative soil-type profile for each soil type cited above to show the pedogenesis) are present.

This new association allows comparison of the pedogenesis with the morphological elements present on the charts to corroborate the coastal model proposed without the man-made changes. Table 1 shows the percentage of sand, silt, and clay extract from a representative soil profile for each soil type in Emilia-Romagna obtained from Geology, seismic, and soil Emilia-Romagna Survey data catalogue (I suoli dell'Emilia-Romagna, 2015).

Table 1

Proposed soil association, divided into Sand Soil and Mud Soil. The table shows the horizons' depth and the percentage of sand, silt, and clay obtained from a representative soil profile.

Soil association	Soil Acronym	Depth - cm (from - to)		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
S A N D S O I L	CER 1	0	60	96	3	1
		60	80	98	2	0
		80	110	99	1	0
		110	120	99	1	0
	CER 3	0	3	93	5.5	1.5
		5	10	91.3	6.9	1.8
		15	30	94.5	4.8	.7
		40	80	98.2	1.3	.5
		90	115	99.5	.3	.2
	CER 4	0	40	76.6	12.6	10.8
		40	50	79	13.5	7.5
		50	80	82	9	9
		80	110	88.4	7.1	4.5
	SAV 1	3	17	91	6	3
		17	60	95	5	0
		60	100	95	5	0
	SAV 3	10	35	97.8	1.2	1
		40	70	97.5	.7	1.8
		90	120	98	.3	1.7
		130	160	97	2.2	.8
PIR 1	0	20	81	9	10	
	20	60	93	1	6	
	60	70	94	1	5	
M U D S O I L	GLS 2	0	50	2	60.2	37.8
		50	90	.5	55.5	44
		90	140	1.3	58.7	40
		140	160	4.6	75.4	20
	GLS 3	10	40	3.3	49.9	46.8
		70	100	1	45.2	53.8
	MCB 1	0	50	20	52	28
		50	70	17	54	29
		70	90	7	62	31
		90	110	6	68	26
		110	140	9	70	21
	SVO 1	10	35	17.5	61.5	21
		55	65	22.2	64.1	13.7
		75	85	86	8	6
		110	130	93	5.5	1.5
		140	145	11.7	73.5	14.8
	RNV 1	0	65	14	49	37
		65	85	14	39	47
		85	100	12	45	43
		100	130	16	55	29
	SMB 1	0	50	6	72	22
		50	75	3	71	26
		75	105	5	73	22
		105	150	7	79	14
	VIL 1	0	50	58.3	28.9	12.8
		50	80	60.5	27.8	11.7
		80	120	89.3	7.5	3.2
		120	150	12.5	71	16.5

To validate and confirm the correspondence between bibliography data integration and the results from data elaboration about the beach ridges, a field visit was undertaken. The field trip allowed obtaining real information about the territory, investigating the morphology that is present in the Pineta zone, and the pedogenesis of the terrain to compare with the obtained data. This information allows linking the beach ridges/foredune ridges with the zone where it is present in the sand soil and the lagoon environment with the zone where it is present as mud soil. This was done to investigate the morphology that is present in the Pineta zone and based on the pedogenesis of the terrain.

4.2. Subsurface data–GPR

The GPR data were acquired along profiles (Fig. 2) using a COBRA PLUG-IN GPR (with UNIT, Control Unit, and SUBECHO Antenna model SE-70) data acquisition by Radarteam Sweden AB, using a transmitter and receiver antennae with 80 MHz center frequency in Common Off-set arrangement; and a COBRA Wi-Fi two channel (250–500 MHz) produced by Radarteam Sweden AB. To locate the profiles, the GPR had an integrated Global Navigation Satellite System (GNSS). The dielectric constant for sand (6), that represents a velocity of 0.15 m/ns (Daniels et al., 1995) as was validated by lithological data obtained from existing drill holes on the Ravenna coastal plain. The GPR data obtained were elaborated using two software programs, RADAN™ 7 and Prism® 2.6. The interpretation of the data was based on the seismostratigraphic method adapted for GPR data (Neal, 2004), identifying the radar facies and the termination pattern of reflectors and geometry (Mitchum Jr. et al., 1977; Vail, 1987).

5. Results

The results from the surface data are represented mainly using illustrated maps, which allow overlap of different data sources and elaborate the geological surface model without man-made changes in the Ravenna coastal plain. The reclassified DSM (Fig. 4A) shows the low topographic in the zone and the beach ridges digitized from the geological chart. The zones inside the class Under RSL and RSL actually are occupied mainly by agricultural fields, the class Above 7 m is due to the presence of the pinewood zone, river embankments, and constructions in the coastal towns. The geological elements were overlapped showing the paleobeach ridges. Using the classification in this

work that subdivides the beach ridges from the geological chart and were called Sand beach ridges (the beach ridges identified above the sand soil) and Mud beach ridges (the beach ridges identified above the mud soils), also their localization was correlated with the DSM classes. The DTM (Fig. 4B) allows identification of the beach ridges that are not mapped in the geological chart due to the nonappearance of territorial elements in the DTM data, such as settlements, pinewoods, and constructions. These beach ridges have been digitized to complement the information about the surface geological elements in the Ravenna Coastal Zone.

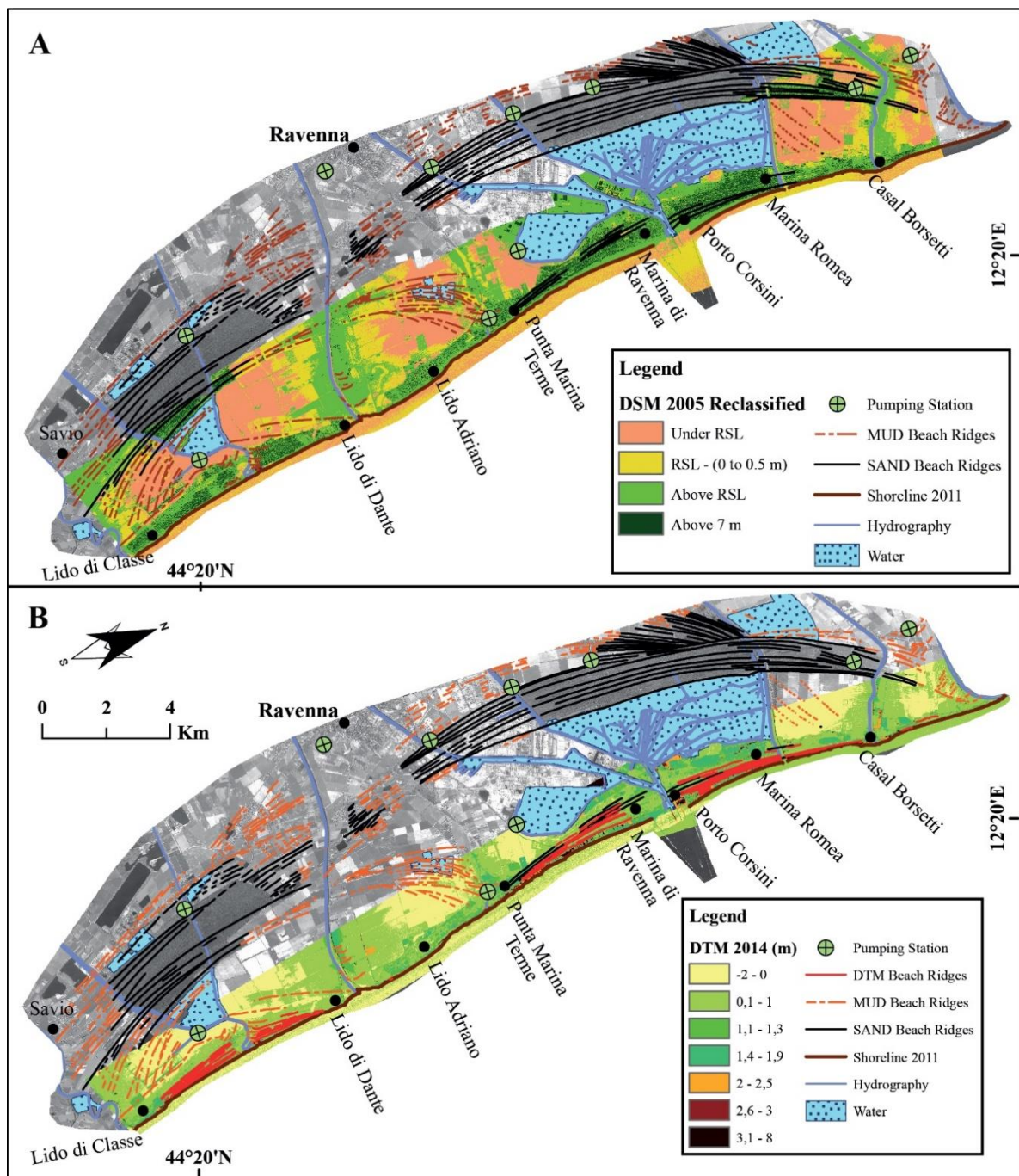


Fig. 4. A) The DSM 2005 reclassified with the beach ridges above the sand soil and above the mud soil. B) The DTM 2014 reclassified with the beach ridges above the sand soil and above the mud soil, plus the beach ridges identified and digitized from the DTM data.

The new soil association proposal that was derived from the Emilia-Romagna Region soil chart (Fig. 5A) and where 14 soil associations and 13 different soil types are present. In Table 1, the two classes subdivided in sand soil and mud soil are presented; this classification has been done based on the percentage of the content of sand, mud, and clay in each soil type. The 14 soil associations were

grouped in a class with sand soil (CER1, CER3, CER4, SAV1, SAV3, and PIR1) called Sand Soil; and in a class with mud and clay soil (GLS2, GLS3, MCB1, RNV1, SMB1, SVO1, and VIL1) called Mud Soil, the waterbodies are represented as CA. This allows subdivision in the three cited classes in the Methods section and they are represented in Fig. 5B. A class that is called Mud and Sand Soil has been created to incorporate a soil association that contains the present SVO1, MCB1, and CER1 soil types.

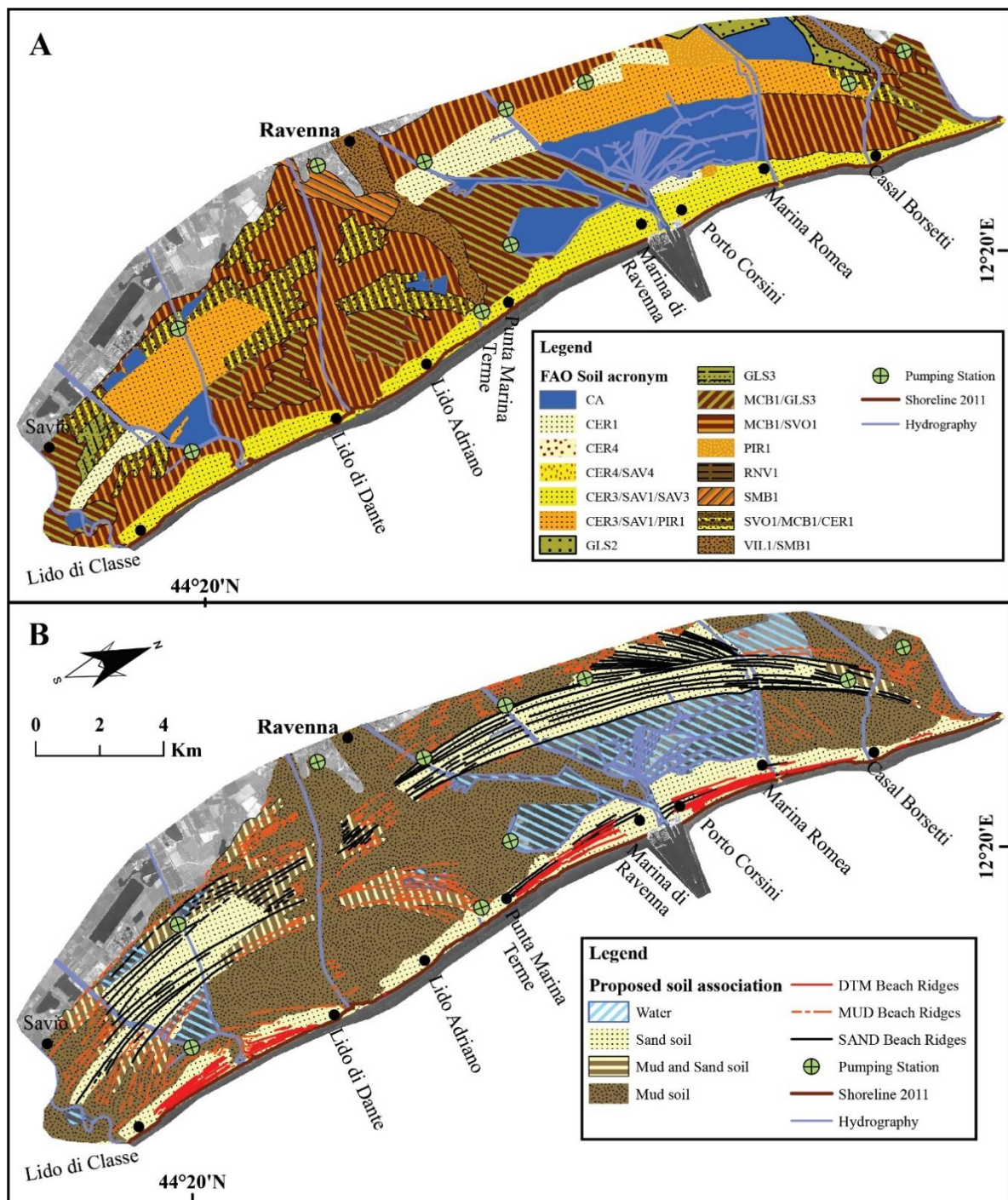


Fig. 5. A) The soil association from Regione Emilia-Romagna with the 14 soil associations. B) The reclassification of the soil association with the three classes proposed in this work.

For the subsurface, analysis was done using a GPR profile (Fig. 2) across the Ravenna coastal plain, to find the depositional geometry and to corroborate with the surface model proposed in this work. This is the first attempt to acquire the two-dimensional subsurface data in the study area. The profiles are concentrated in the Pineta Ramazzotti (profile a–a'), Pineta di San Vitale (profile c–c'), and in the agricultural fields between Lido di Dante and Lido Adriano (profile b–b'). The results are

represented in the radargram obtained during the survey. For the Pineta Ramazzotti, the profile acquisition was done using the COBRA Wi-Fi 2 channel (250–500 MHz) with a close acquisition window to investigate the low deep deposition (max. 6 m). This radargram allows identification of two radar facies that are interesting for this work (Fig. 6): the radar facies A that represents the backshore/foreshore facies from 0 to –2.5 m, where the depositional geometry are continuous and with low-angle reflectors; the radar facies B the upper shoreface facies, from –2.5 to –5 m, where it is possible to see a depositional geometry with subparallel, low-angle, continuous, and undulate reflectors (Barboza et al., 2011; Dillenburg et al., 2011; Rosa, 2012). The arrows in Fig. 6 show the progradation in the ocean direction, which represents a coastline regression. This profile has been done where the Sand Soil association is present.

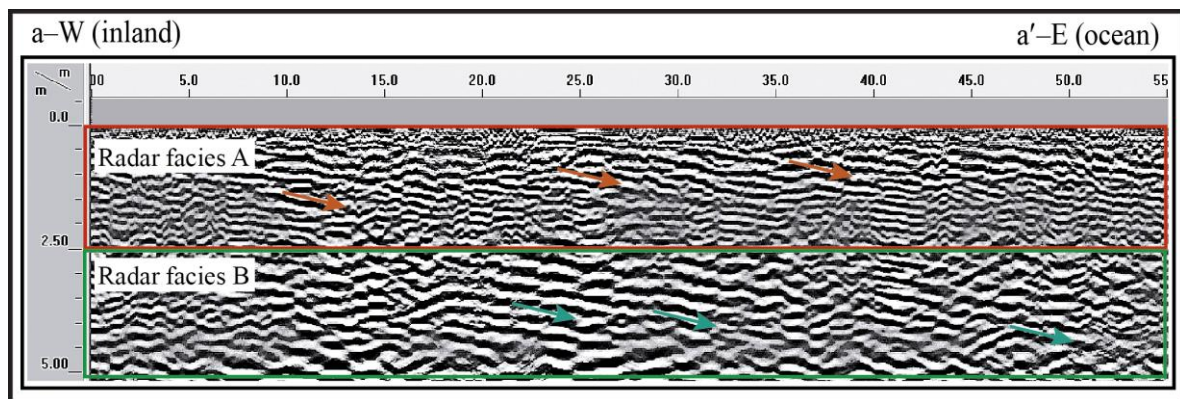


Fig. 6. A sample of the GPR profile done in Pineta Ramazzotti showing two radar facies identified as backshore/foreshore (radar facies A) and upper shoreface (radar facies B).

The profiles b–b' and c–c' were done using the COBRA PLUG-IN GPR with 124 MHz central frequency to gain more signal penetration. The radargram sample for the profile b–b' (Fig. 7), acquired in the agricultural fields, where the Mud Soil association is present, does not show depositional geometry, and the surface signal is dissipated. The GPR signal is attenuated, and this attenuation is due to the mud, clay, or silt present in the terrain, which are impermeable to the GPR signal (Neal, 2004; Rosa, 2012). This radar facies is typical of the lagoon depositional environment (Rosa, 2012).

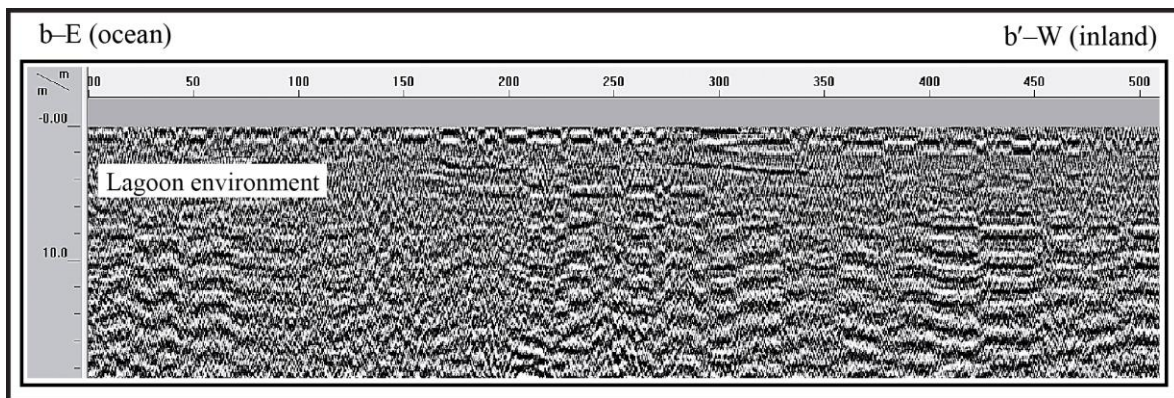


Fig. 7. A sample of the GPR profile done in the agriculture fields between Lido Adriano and Lido di Dante, showing the signal attenuation without depositional geometry. This radar facies was interpreted as a lagoon environment.

The profile c–c' was done in the Pineta di San Vitale (Fig. 8) where the Sand Soil association is present and the beach ridges are mapped from the geological chart. This profile has in the shallow subsurface a radar facies (A), from 0 m to –4 m that represents the backshore/foreshore with continuous and subparallel reflectors, which represent a backshore/foreshore facies, with a progradation in the ocean direction.

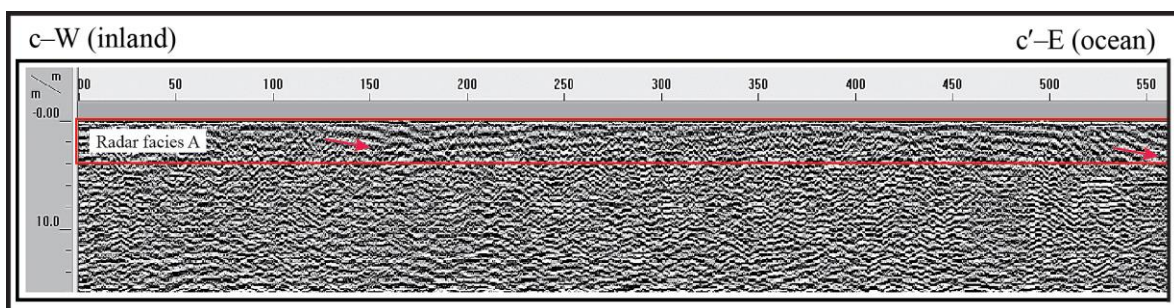


Fig. 8. A sample of the GPR profile done in Pineta di San Vitale, the radar facies A shows the progradation in the ocean direction.

6. Discussion

6.1. Surface data

The results from the DSM 2005 (Fig. 4A) show the importance of maintenance due mainly to the drainage pumping system in this territory (Mollema et al., 2013). Without this maintenance, the

Ravenna coastal plain zone probably would be flooded. These data show the high susceptibility and vulnerability of the territory, because the major part of the zone is below the RSL.

To investigate the geological elements, the DSM data were overlapped to allow identification of the morphological divergence between the data from DSM and the data from the geological chart. The presence of beach ridges (in the legend as MUD Beach Ridges) in the zones classified as Under RSL, and where reclamations have been done, which were identified using the photo interpretation to construct the geological chart (Amorosi, 1999; Cibirin and Severi, 2005). The presence of beach ridges below the RSL may be explained by the local subsidence, but in the north part, between Marina Romea and Casal Borsetti, the zone was reclaimed between the years 1912–1935 and 1961–1965 (PRG, 2003) and actually, the soil association is similar to the soil association existing behind Lido di Dante and Lido Adriano. Before the reclamation, the north zone was flooded; due to the similarity of the soil associations, it is possible to consider the genesis of the zone between Marina Romea and Casal Borsetti to be similar to the zone behind Lido Adriano and Lido di Dante, where the Mud Soil class is present. Moreover, the succession of beach ridges that may be observed in the geological chart may be interpreted as a prograding strand plain and this is not true.

Near the actual coastal zone, beach ridges are present and easily identified on the field or using aerial photos; they have not been altered by human activity and they were not mapped on the geological chart. The beach ridges morphology near the shoreline are present in the terrain and they are below the pinewoods forest. These beach ridges are similar to the beach ridges identified in the Pineta di San Vitale and Pineta di Classe that were represented as SAND beach ridges in the maps (Fig. 4A, 4B, and 5B). The DTM 2014, which filtered the pinewoods to build the DTM 2014 allow identification and mapping of these beach ridges near the coast (Fig. 4B), increasing the detail of the morphological elements mapped in the Ravenna coastal plain.

The field visits along the Po and Ravenna coastal plain aided building these hypotheses. Observing the soil pedogenesis, in the zone behind the Pineta Ramazzotti, the soil is greatly altered by agriculture but is constituted mainly by agglomerates of mud and clay (Fig. 9A). They are different if compared with other beach ridges also mapped in the geological chart inside an agricultural zone, which does not

have a beach ridge morphology preserved, but the pedogenesis of this reworked soil is mainly constituted by sand, confirming the presence of the beach ridges (Fig. 9B).

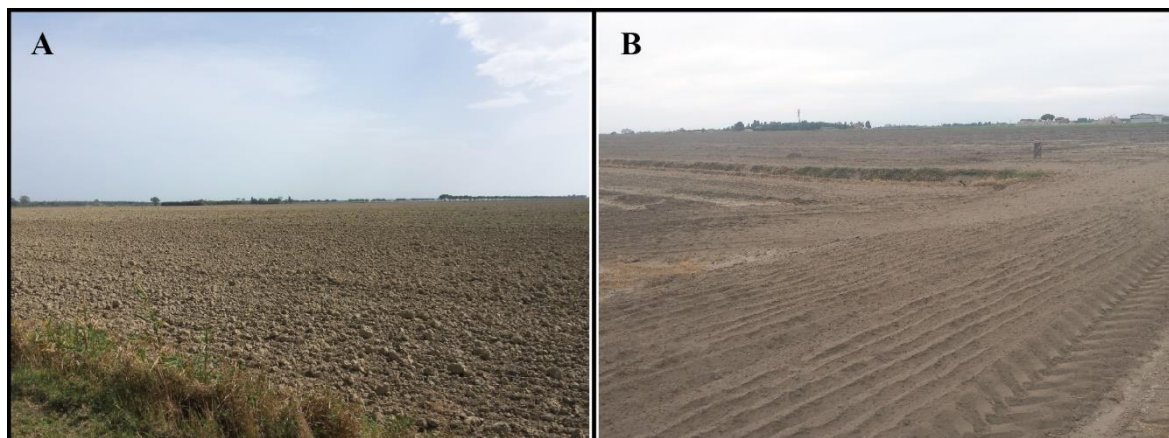


Fig. 9. Photos of the soil, which was mapped as beach ridges in the geological chart. A) The agglomerates of mud and clay in the agricultural field that were mapped as beach ridge in the geological chart not corresponding with the beach ridge pedogenesis. B) A sand soil in an agriculture field corresponding to what was mapped as beach ridges in the geological chart.

Because of these field observations, the classification of the soil chart in sand and mud classes (Fig. 5B) was done to associate with the geological elements from the geological charts. This association allows linking the pedogenesis of the territory with the beach ridges, corroborating the purpose in this work, which does not consider the beach ridges that are present in the zone where the Mud Soil or Mud and Sand Soil classes are present. Where the class Mud and Sand Soil is present, it was considered a spit, which may be the exit of a beach system but without the beach ridges because this is not clear on the territory. The soil association done in this work was associated with the DSM 2005, overlapping the data (Fig. 10). This data combination shows the Mud Soil corresponding with the classes Under RSL and RSL level; the Sand soil near the coast corresponds with the terrains where the topography is Above RSL.

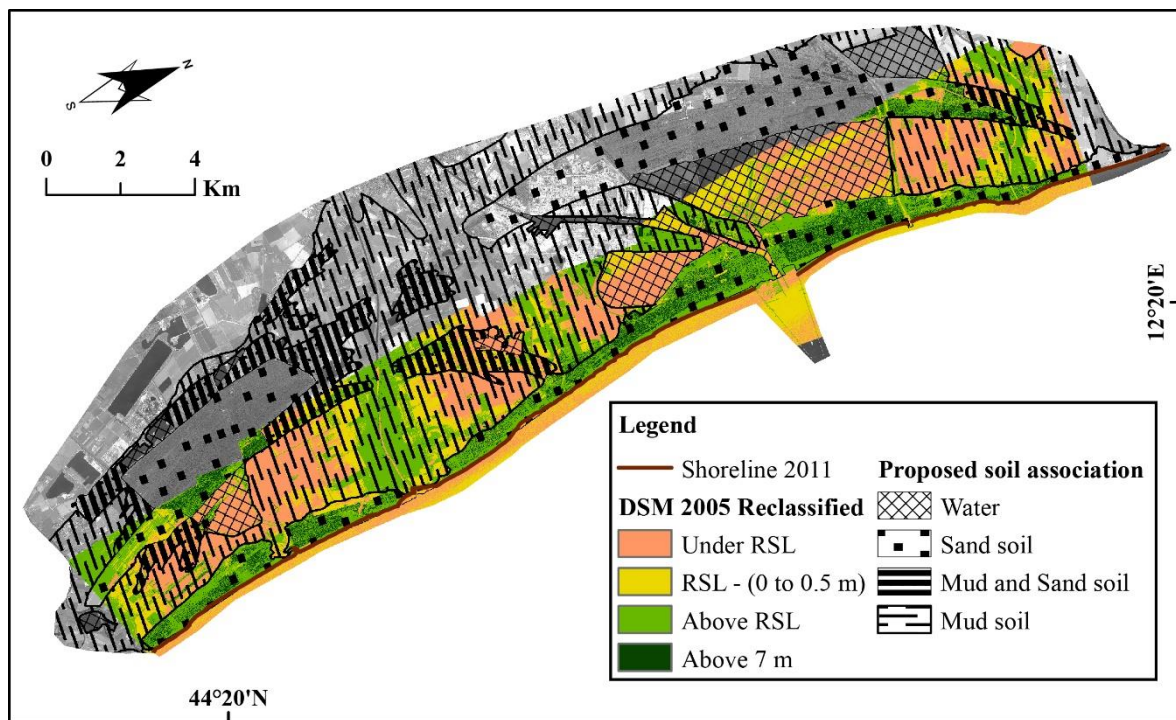


Fig. 10. The three soil association classes overlapped on the reclassified DSM from 2005.

In addition, historical charts were used to corroborate the conclusions about LIA changes in the study area. The charts show the river delta's dominance and the shoreline behavior during the 17th and 18th centuries, passing to a wave-dominance delta according to Galloway (1975) (Fig. 11). The historical charts indicate that this zone is not a progradating strand plain, and a water body's presence behind the coastline may be observed. Moreover, the historical charts show the man-made changes on the territory with the pinewoods and the lagoons that were reclaimed.

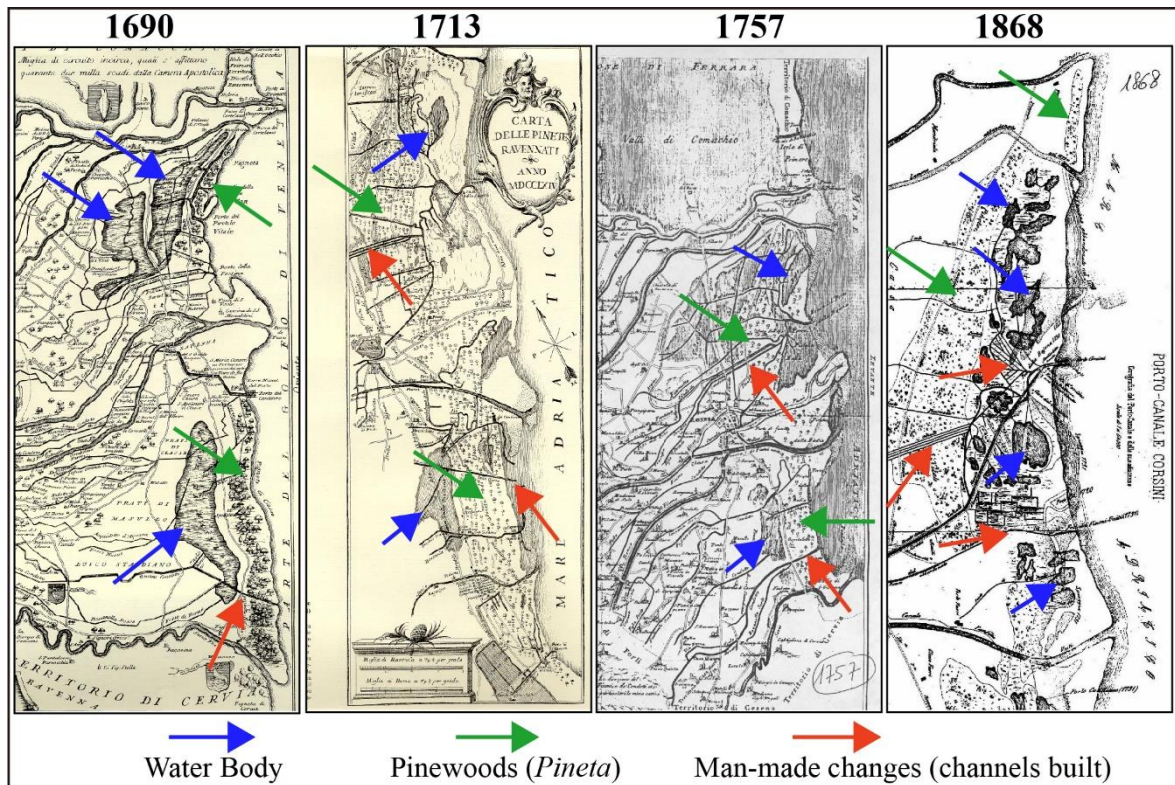


Fig. 11. Historical charts from 1690, 1713, 1757, and 1868. The colored arrows indicate the presence of water bodies, pinewoods, and channels built by man in the last four centuries.

6.2. Subsurface data

The result from the GPR profiles shown in the Results section gives an important basis to build the recent coastal evolution model in the Ravenna plain, and to understand how the territory was without the man-made changes. The profiles done in Pineta Ramazzotti (a–a') and Pineta di San Vitale (c–c') correspond with the sand soils association. These two profiles (Fig. 6 and 8) have the backshore/foreshore radar facies, and in the profile it is possible to identify the upper shoreface radar facies that represent a system progradation in the ocean direction. This progradation indicates a normal regression, if correlated with the RSL, which actually is rising. The system progradation is responsible for the beach ridges formation near the shoreline (the Sand beach ridges mapped from the geological chart and the DTM beach ridges mapped from DTM 2014).

The results obtained in the profile b–b' (Fig. 7), which was done where the mud soils are present (Fig. 9) was interpreted as a lagoon or swamp environment. The GPR response and the data obtained are the data expected for this zone, and in the coastal environments, this GPR response may be

correlated with the zones where a mud and clay deposition are present that is the typical deposition of lagoon environments (Rosa, 2012).

In the Pineta di San Vitale (profile c–c'), the geometry of the reflectors in the radar facies (A) (Fig. 8), indicates a coastal barrier depositional system with low energy. The GPR data of the Pineta di San Vitale indicate the presence of another coastal barrier depositional system in the Ravenna coastal plain.

Combining these GPR profiles, it is possible to corroborate the hypothesis about the local coastal evolution model using the surface data in the Ravenna coastal plain. The subsurface data show a progradating barrier, where the Pineta Ramazzotti and the coastal towns are located; a reclaimed lagoon environment where the agricultural fields in the Ravenna coastal plain are present; and an older progradating barrier that is located in the Pineta di Classe and Pineta di San Vitale, characterizing this coastal plain as a typical barrier-lagoon system.

6.3. Data integration

Integrating the results and interpretation of the surface data obtained in this work with the subsurface data from GPR, it was possible construct a surface coastal model for the Ravenna coastal plain without the man-made changes above the territory (Fig. 12A and B). This model demonstrates that the Ravenna coastal plain depositional system is characterized by a barrier-lagoon system with a lagoon environment between two sand barriers. In addition, the inland sand barrier was called the Old Barrier; the sand barrier near the shoreline, where the coastal towns are present was called the Actual Barrier.

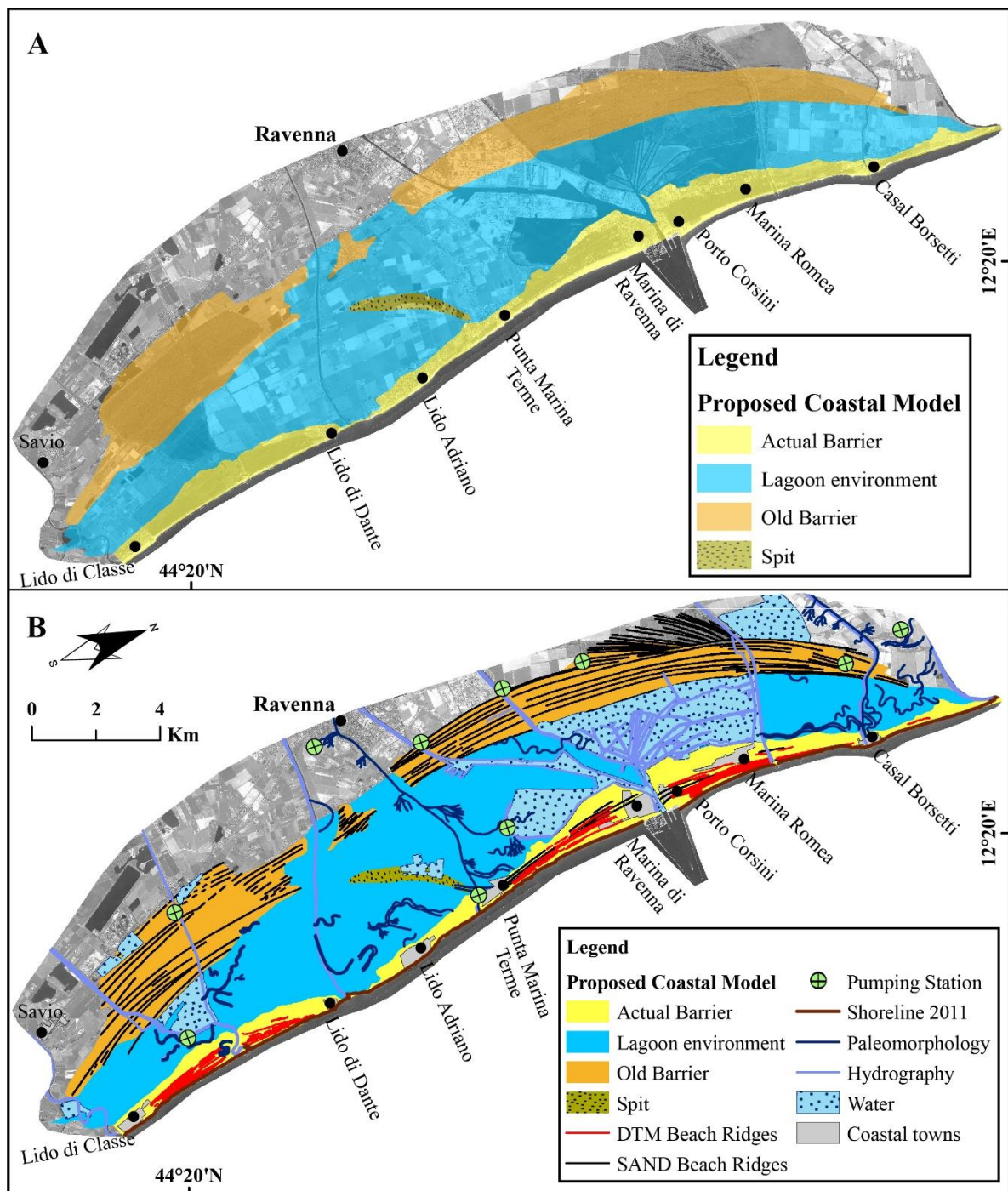


Fig. 12. A) The geological coastal model without man-made changes, with two sand barriers, the Old Barrier and the Actual Barrier, that are separated by a lagoon environment. B) The proposed coastal model with the geological surface elements and only with the beach ridges that are above the sand barriers, and the beach ridges digitized from the DTM 2014.

The Actual Barrier is a sand barrier that was formed when the depositional system came to be wave dominated, after the LIA. The delta's erosion closed the lagoon environment, which was contemporarily modified by man. Moreover, the sediments reworked by the waves were responsible

for creating the beach ridges mapped from DTM 2014. This deduction may be corroborated with the GPR profile in Pineta Ramazzotti (Fig. 6), where the high gentle deposition angle, in the backshore/foreshore indicate a low energy for sedimentation, which is due to the wave action. The soil association proposed shows that this actual barrier is in the Sand Soil class, in accordance with the genesis of the beach ridges.

The Lagoon Environment between the sand barriers was formed during the LIA. Actually, this zone emerged due to terrain reclamations (PRG, 2003) that were drained by the drainage system and is occupied by agricultural fields. The DSM 2005 shows that the main area in this zone is below the RSL, the zone above the RSL are the rivers that are elevated to create a gradient for the water flow and to protect the territory against flooding. The soil association in the zone shows that a soil composed mainly by silt and clay is present. The mud and clay agglomerates observed in the field show the local pedogenesis, corroborating this result. The response of the GPR and the radargram in the shallow subsurface is characteristic of lagoon environments. Inside the lagoon environment, which has a Mud and Sand soil association that was interpreted as a spit, may be formed due to a dynamic system change linked with the sediment supply. Because of the extensive man-made changes above the entire zone, it is very difficult to construct the territory elements on a large scale.

The Old Barrier is a sand barrier, and represents the inland lagoon environment margin. The Old Barrier was formed before the LIA. The beach ridges mapped in the zone correspond with the real situation; also combining the mapped beach ridges with the soil association, where the Sand Soil is present, may correlate the beach ridges with the pedogenesis. Moreover, in Pineta di Classe and Pineta di San Vitale the beach ridges' morphology is preserved below the pinewoods. The two inlets present in the Old Barrier, between Pineta di Classe and Pineta di San Vitale may be explained by the actual hydrology and by the paleomorphology elements from the geological chart 1:50,000. The two inlets were formed by the Ronco and Montone rivers. Actually, these two rivers have a confluence in a river called Fiumi Uniti that arrives between Lido di Dante and Lido Adriano. In this case also, the subsurface data may corroborate the interpretation, due to the presence of the two radar facies that represent the backshore/foreshore depositional system.

The integration of the data used in this work allows review of the geological surface data from the Emilia-Romagna geological chart, and updates the data relative to the beach ridges mapped and to construct the surface coastal evolution model presented in Fig. 12A and 12B.

7. Conclusion

Integration of the surface and subsurface data, obtained using different sources and new technologies increases the knowledge and updates the territorial information about the Ravenna coastal plain. Moreover, this work was the first work that used two-dimensional data, from GPR, to investigate the emerged portion of the Ravenna coastal plain. In this work, the subsurface data contribute to increasing the scientific bases to support the surface geology model without man-made changes proposed for this coastal zone. The GPR data were used following the successful application of this method in other barrier-lagoon systems in the world, such as the PCRS studies. The method contributes to developing more work following this methodology, which is an actual and validated method used by several research groups across the world. In the Emilia-Romagna Region, the applicability of this method may be very interesting due to the high expertise on the geology of this coastal plain and these data may be integrated with the previous work done in the emerged and submerged portions of the northwest Adriatic basin. In addition, this paper may contribute to advancing the two-dimensional subsurface investigation in other barrier-lagoon system studies around the world, updating the knowledge on these systems and contributing to new research in the coastal geology field.

To conclude, the surface data have been used to build the geology surface model proposed in this work, showing the territory modifications after the climatic changes by the LIA, and the extensive man-made changes done in the Ravenna coastal plain. The coastal model gives the basis to do a high-resolution construction of the recent coastal evolution in the Ravenna coastal plain. Moreover, the model is important to aid the local authorities in defining the guidelines for future ICZM applications, indicating the susceptibility and vulnerability, based on the genesis of the area and aiding to plan future territorial occupation. This geology model shows that all coastal towns were built above the Actual Barrier, which is a new barrier formed in the last four centuries, being a more vulnerable environment than other barrier-lagoon systems. In the future, there is a need to integrate more data

about the subsurface, to reconstruct a high-resolution stratigraphy model with the beach ridges dating, using accurate methods such as optically stimulated luminescence (OSL). This will provide a complete model about the Ravenna coastal evolution and will help to improve even more coastal evolution studies in the northwest Adriatic.

Acknowledgements

This research was funded by Fondazione Flaminia (Ravenna, Italy) via the RIGED-Ra project. The work was performed inside the Joint Laboratory on Coastal Evolution between UFRGS and UNIBO. We would like to thank the anonymous reviewers.

REFERENCES

- Amorosi, A., 1999. Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia a scale 1:50.000, F.223-Ravenna, pp. 144 (*in Italian*).
- Amorosi, A., Farina, M., 1995. Large-scale architecture of a thrust-related alluvial complex from subsurface data: the Quaternary succession of the Po Basin in the Bologna area (northern Italy). *Giornale di Geologia*, 57/1-2, pp. 3-16.
- Amorosi, A., Farina, M., Severi, P., Preti, D., Caporale, L., Di Dio, G., 1996. Genetically related alluvial deposits across active fault zones: an example of alluvial fan-terrace correlation from the upper Quaternary of the southern Po Basin, Italy. *Sedimentary Geology*, 102, pp. 275-295.
- Amorosi, A., Barbieri, M., Castorina, F., Colalongo, M.L., Pasini, G., Vaiani, S.C., 1998. Sedimentology, micropalaentology, and strontium-isotope dating of a lower-middle Pleistocene marine succession ("Argille Azzurre") in the Romagna Apennines, northern Italy. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 117, pp. 789-806.
- Amorosi, A., Caporale, L., Cibirin, U., Colalongo, M.L., Pasini, G., Ricci Lucchi F., Severi, P., Vaiani, S.C., 1998a. The Pleistocene littoral deposits (Imola Sands) of the northern Apennines foothills. *Giornale di Geologia*, 60, pp. 83-118.
- Amorosi, A., Colalongo, M.L., Pasini, G., Preti, D., 1999. Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy). *Sedimentology*, 46, pp. 99-121.
-

-
- Amorosi, A., Marchi, N., 1999a. High-resolution sequence stratigraphy from piezocone test: an example from the Late Quaternary deposits of the SE Po Plain. *Sedimentary Geology*, 128, pp. 69-83.
- Amorosi, A., Forlani, F., Fuso, F., Severi, P., 2001. Cyclic patterns of facies and pollen associations from late Quaternary deposits in the subsurface of Bologna. *Geo. Acta* 1, pp. 83-94.
- Amorosi, A., Centineo, M.C., Colalongo, M.L., Fiorini, F., 2005. Millennial-scale depositional cycles from the Holocene of the Po Plain, Italy. *Marine Geology* 222-223, pp. 7-18.
- Amorosi, A., Fontana, A., Antonioli, F., Primon, S., Bondesan, A., 2008. Post-LGM sedimentation and Holocene shoreline evolution in the NW Adriatic coastal area. *GeoActa*, Volume 7, pp. 41-67.
- Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Bishop K., Caruso L., A Minchio., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G., 2008. Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy. *Hydrogeology Journal* 16, pp. 1541-1556.
- Armaroli, C., Ciavola, P., Perini, L., Calabrese, L., Lorito, S., Valentini, A., Masina, M., 2012. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology* 143-144, pp. 34-51.
- Barboza, E.G., Dillenburg, S.R., Rosa, M.L.C.C, Tomazelli, L.J. and Hesp, P.A., 2009. Ground-penetrating radar profiles of two Holocene regressive barriers in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 579-583.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J. and Ayup-Zouain, R.N., 2011. Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) - a new approach with GPR data. *Journal of Coastal Research*, SI 64, pp. 646-650.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R and Tomazelli, L.J., 2013. Preservation potential of foredunes in the stratigraphic record. *Journal of Coastal Research*, SI 65, pp.1265-1270.
-

-
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R., Biancini da Silva, A. and Tomazelli, L.J., 2014. Stratigraphic analysis applied on the recognition of the interface between marine and fluvial depositional systems. *Journal of Coastal Research*, SI 70, pp. 687-692.
- Barlow, K., 2001. The time period A.D. 1400-1980 in central Greenland ice cores in relation to the North Atlantic sector. *Climatic Change*, 48, pp. 101-119.
- Betti, I. and Morelli, M., 1998. Prediction of Mean Sea Level Rise in The Upper Adriatic Sea. In: G. Gambolati (ed.), CENAS. *Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*, pp. 35-55.
- Bever, A.J., Harris, C.K., Sherwood, C.R., Signell, R.P., 2009. Deposition and flux of sediment from the Po River, Italy: an idealized and wintertime numerical modeling study. *Marine Geology* 260 1-4, pp. 69-80.
- Biancini, A., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R., 2014. Meandering fluvial system influencing the evolution of a Holocene regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 70, pp. 205-210.
- Bird, E.C.F., 1965. The evolution of the sandy barrier formations on the East Gippsland coast. *Proc. Roy. Soc. Vict.* 79, pp. 75-88.
- Bishop, M.P., James, L.A., Shroder Jr., J.F., Walsh, S.J., 2012. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. *Geomorphology* 137, pp. 5-26.
- Bonaldo, D., Di Silvio, G., 2013. Historical evolution of a micro-tidal lagoon simulated by a 2-D schematic model. *Geomorphology* 201, pp. 380-396.
- Bondesan, M., 1985. Quadro schematico dell'evoluzione geomorfologica olocenica del territorio compreso fra Adria e Ravenna. In: *Atti della Tavola Rotonda Il Delta de Po*, 24 novembre, 1982, Bologna. *Accademia di Scienza dell'Istituto di Bologna*, pp. 21-36 (*in Italian*).
- Bondesan, M., 1989. Geomorphological Hazards in the Po Delta and Adjacents Areas. *Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. Supplemento II, pp. 25-33.
-

-
- Bondesan M., 1990. L'area deltizia padana: caratteri geografici e geomorfologici. In: Il Parco del Delta del Po. Studi ed immagini. Ferrara, Spazio Libri Editore, pp. 10-48 (*in Italian*).
- Bondesan, M., Favero, V., Viñals, M.J., 1995. New evidence on the evolution of the po-delta coastal plain during the Holocene. *Quaternary International*, 29-30, pp. 105.
- Brázdil R., Pfister C., Wanner H., Von Storch H., Luterbacher J., 2005. Historical Climatology in Europe – The State of the Art. *Climatic Change* 70, pp. 363-430.
- Brunetti, A., Denèfle, M., Fontugne, M., Hatté, C., Pirazzoli, P.A., 1998. Sea-level and subsidence data from a Late Holocene back-barrier lagoon (Valle Standiana, Ravenna, Italy). *Marine Geology* 150. pp 29-37.
- Carbognin, L. and Tosi, L., 2002. Interaction between climate changes, Eustacy and Land Subsidence in the North Adriatic Region, Italy. *Marine Ecology*, 23 Supplement 1, pp. 38-50.
- Carminati, E., Martinelli, G., 2002. Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation. *Engineering Geology* 66, pp. 241-255.
- Carter, R.W.G., Forbes, D.L., Jennings, S.C., Orford, J.D., Shaw, J., Taylor, R.B., 1989. Barrier and lagoon coast evolution under differing relative sea-level regimes: examples from Ireland and Nova Scotia. In: L.G. Ward, G.M. Ashley (Eds.), *Physical Processes and Sedimentology of Siliciclastic-dominated Lagoonal Systems*, *Marine Geology*, 88, pp. 221-242.
- Castiglioni, G.B., Bondesan, M., Elmi, C., 1990. Geomorphological mapping of the Po Plain (Italy), with an example in the area of Ravenna. *Z. Geomorp. N. F., Suppl.-Bd.* 80, pp. 35-44.
- Ceia, F.R., Patricio, J., Marques, J.C., Dias, J.A., 2010. Coastal vulnerability in barrier islands: The high risk areas of the Ria Formosa (Portugal) system. *Ocean & Coastal Management* 53, pp. 478-486.
- Cencini, C., 1998. Physical Processes and Human Activities in the Evolution of the Po Delta, Italy. *Journal of Coastal Research*, 14(3), pp. 774-793.
- Ciabatti, M., 1966. Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano. *Giornale di Geologia*, 34-2, pp. 381-410 (*in Italian*).
-

-
- Ciabatti, M., 1990. Geomorfologia ed evoluzione del Delta Padano. In: *Il Mondo della Natura in Emilia-Romagna: la Pianura e la Costa*. Federazione Casse Risparmio e Banche del Monte dell'Emilia-Romagna, Milano, pp. 57-76 (*in Italian*).
- Cibin, U., Severi, P., 2005. Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, F. 240-241, Forlì-Cervia, pp. 104 (*in Italian*).
- Colantoni, P., Preti, M., Villani, B., 1990. Sistema deposizionale e linea di riva olocenica sommersi in Adriatico e al largo di Ravenna. *Giornale di Geologia*, 52, pp. 1-18 (*in Italian*).
- Correggiari, A., Cattaneo, A., Trincardi, F., 2005. The modern Po Delta system: Lobe switching and asymmetric prodelta growth. *Marine Geology*, 222-223, pp. 49-74.
- Correggiari, A., Cattaneo, A., Trincardi, F., 2005a. Depositional patterns in the Late Holocene Po Delta System. *River Deltas-Concepts. Models and Exmples. SEPM Special Publication*, 83, pp. 365-392.
- Cowell, P.J., Thom, B.G., 1994. Morphodynamics of coastal evolution. In: Carter, R.W.G., Woodroffe, C.D. (Eds.), *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*, Cambridge University Press, pp. 33-86.
- Daniels, J.J., Roberts, R., Vendl, M., 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, 33, pp. 195-207.
- Davis, R.A. Jr., 1994. Barrier Island Systems. In: Davis, R.A. Jr. (Ed.) *Geology of Holocene Barrier Island Systems*. Springer-Verlag, pp. 1-47.
- Dezileau, L., Sabatier, P., Blanchemanche, P., Joly, B., Swingedouw, D., Cassou, C., Castaings, J., Martinez, P., Von Grafenstein, U., 2011. Intense storm activity during the Little Ice Age on the French Mediterranean coast. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 299, pp. 289-297.
- Dillenburg, S.R. and Hesp, P.A., 2009. Coastal Barriers – An Introduction. In: Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. (eds.). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*, pp. 1-10.
-

-
- Dillenburg, S.R., and Barboza, E.G., 2014. The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. Chapter In Geological Society London, SI, 388,1, pp. 333-352.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Clerot, L.C.P. and Ayup-Zouain, R.N., 2009. The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: Dillenburg, S.R. and Hesp, P.A. (eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil. Lecture Notes in Earth Sciences*, 107, pp. 53-91.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Hesp, P.A. and Rosa, M.L.C.C., 2011. Ground penetrating radar (GPR) and standard penetration test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64, pp. 651-655.
- Duffy, W., Belknap, D.F., Kelley, J.T., 1989. Morphology and stratigraphy of small barrier-lagoon systems in Maine. *Marine Geology* 88, pp. 243-262.
- Farabegoli, E., Onorevoli, G., Ruffino, C., Costantini, B., 1997. Struttura del sottosuolo quaternario continentale della Pianura Padana meridionale (Provincia di Ravenna – Italia) Università degli Studi di Bologna e Agip (*cartographic document, in Italian*).
- FitzGerald, D.M., Rosen, P.S., van Heteren, S., 1994. New England Barriers. In: Davis RA (ed) *Geology of Holocene barrier island systems*. Springer-Verlag, New York, pp. 305-394.
- Galloway, W.E., 1975. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In Broussard M. L., (ed.), *Deltas Models for Exploration*: Houston Geological Society, pp. 87-98.
- Gambolati, G., Giunta, G., Putti, M., Teatini, P., Tomasi, L., Betti, I., Morelli, M., Berlamont, J., De Backer, K., Decouttere, C., Monbaliu, J., Yu, C.S., Breker, I., Kristenser, E.D, Elfrink, B., Dante, A., Gonella, M., 1998. Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and Natural and Anthropogenic Land Subsidence. In: G. Gambolati (ed.), *CENAS. Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*, pp. 1-34.
-

-
- Gambolati, G., Teatini, P., Tomasi, L., 1999. Coastline regression of the Romagna region, Italy, due to natural and anthropogenic land subsidence and sea level rise. *Water Resources Research* vol. 35, no.1, pp. 163-184.
- Grove, A.T., 2001. The little ice Age and its Geomorphological consequences in Mediterranean Europe. *Climatic Change*, 48, pp. 121-136.
- Harley M.D., Ciavola P., 2013. Managing local coastal inundation risk using real-time forecasts and artificial dune placements. *Coastal Engineering* 77, pp. 77-90.
- Hayes, M.O., 1994. The Georgia Bight barrier system. In: Davis, R.A. Jr. (ed) *Geology of Holocene barrier island systems*. Springer-Verlag, New York, pp. 233-304.
- Hesp PA, and Short, A.D., 1999 Barrier morphodynamics. In: Short AD (ed) *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 307-333.
- I suoli dell'Emilia-Romagna, 2015. Carta dei Suoli al livello di dettaglio 1:50.000, Catalogo dei tipi di suolo. Website: http://geo.regione.emilia-romagna.it/cartpedo/catalogo_tipi_suolo.jsp, last access: 17/11/2015 (*in Italian*).
- Jones, P. D., Briffa, K. R., 2001. Preface: The Little Ice Age: local and global perspectives. *Climatic Change*, 48, pp. 5-8.
- Lambeck, K., Antonioli, F., Anzidei, M., Ferranti, L., Leoni, G., Scicchitano, G., Silenzi, S., 2011. Sea level change along the Italian coast during the Holocene and projections for the future. *Quaternary International* 232, pp. 250-257.
- Lorenzo-Trueba, J., Ashton, A.D., 2014. Rollover, drowning, and discontinuous retreat: distinct modes of barrier response to sea-level rise arising from a simple morphodynamic model. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119, pp. 779-80.
- Marabini, F. and Veggiani, A., 1992. Climatic Variations in the Coastal Zone – Comparasion between the Po River Delta (Adriatic Sea, Italy) and the Huanghe River Delta (Bohai Sea, China). *Chin. J. Oceanol. Limnol.* 11 (3), pp. 193-206.
-

-
- Marabini, S., Lenaz, R., Vai, G.B., 1987. Pleistocene superiore e Olocene del margine pedeappenninico Romagnolo: rapporto preliminare. *Rendiconti della Società Geologica Italiana*, 10, pp. 33-37 (*in Italian*).
- Martinelli, L., Zanuttigh, B., De Nigris, N., Preti, M., 2011. Sand bag barriers for coastal protection along the Emilia Romagna littoral, Northern Adriatic Sea, Italy. *Geotextiles and Geomembranes* 29, pp. 370-380.
- Masselink, G., Van Heteren, S., 2014. Response of wave-dominated and mixed-energy barriers to storms. *Marine Geology* 352, pp. 321-347.
- Mitchum Jr., R.M., Vail, P.R., Sangree, J.B., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphy interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: Payton, C.E. (ed.), *Seismic Stratigraphy — Applications to Hydrocarbon Exploration*. Tulsa, AAPG, 26, pp.117-133 (Memor # 26).
- Mollema, P.N., Antonellini, M., Dinelli, E., Gabbianelli, G., Greggio, N., Stuyfzand, P.J., 2013. Hydrochemical and physical processes influencing salinization and freshening in Mediterranean low-lying coastal environments. *Applied Geochemistry*, 34, pp. 207-221.
- Neal, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth Science Reviews*, 66, pp. 261-330.
- Neil, J. and Abreu, V.S., 2009. Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method. *Geology*, 37, pp. 779-782.
- Nelson, B.W., 1970. Hydrography, sediment dispersal and recent historical development of the Po river delta, Italy. In: *Deltaic Sedimentation, Modern and Ancient* (Ed. By J.P. Morgan), Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Miner., 15, pp. 152-184.
- Oost, A.P., Hoekstra, P., Wiersma, A., Flemming, B., Lammerts, E.J., Pejrup, M., Hofstede, J., van der Valk, B., Kiden, P., Bartholdy, J., van der Berg, M.W., Vos, P.C., de Vries, S., Wang, Z.B., 2012. Barrier island management: Lessons from the past and directions for the future. *Ocean & Coastal Management* 68, pp. 18-38.
-

-
- Otvos, E.G., 2000. Beach ridges — definitions and significance. *Geomorphology*, 32, pp. 83-108.
- Petrini, R., Pennisi, M., Vittori Antisari, L., Cidu, R., Vianello, G., Aviani, U., 2014. Geochemistry and stable isotope composition of surface waters from the Ravenna plain (Italy): implications for the management of water resources in agricultural lands. *Environmental Earth Sciences*, 71 (12), pp. 5099-5111.
- Piastra, S., 2011. Studying the evolution of the landscape in the Romagna coastal zone (northern Italy): the contribution of historical cartography. *ANNALES, Ser. hist. sociol.* 21, pp. 413-424.
- Preti, M., De Nigris, N., Morelli, M., Monti, M., Bonsignore, F., Aguzzi, M., 2009. Stato del litorale Emilia-Romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione. ARPA Emilia-Romagna, Bologna, pp. 267 (*in Italian*).
- PRG, 2003. Piano regolatore generale, Comune di Ravenna. CARTA STORICA DELL'USO DEL SUOLO: le bonifiche. C.0.1.a (*cartographic document, in Italian*).
- Regione Emilia-Romagna, 2015. Emilia-Romagna Ambiente, geologia, sismica e suoli. Website: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/webgis-banchedati>. Last update: 09/11/2015, last access: 11/11/2015 (*in Italian*).
- Ricci Lucchi, F., Colalongo, M.L., Cremonini, G., Gasperi, G., Iaccarino, S., Papani, G., Raffi, I., Rio, D., 1982. Evoluzione sedimentaria e paleogeografica del margine appenninico-padano. *Guide Geologiche Regionali Soc. Geol. Ital.*, pp. 17-46 (*in Italian*).
- Ridente, D., Trincardi, F., 2005. Pleistocene “muddy” forced-regression deposits on the Adriatic shelf: A comparison with prodelta deposits of the late Holocene highstand mud wedge. *Marine Geology* 222–223, pp. 213-233.
- Rizzini, A., 1974. Holocene sedimentary cycle and heavy mineral distribution, Romagna-Marche coastal plain, Italy. *Sedimentary Geology*, 11, pp 17-37.
- Rosa, M.L.C.C., 2012. Geomorfologia, Estratigrafia De Sequências E Potencial De Preservação Dos Sistemas Laguna-Barreira Do Quaternário Costeiro Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre. Tese de
-

Doutorado em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pp. 251.

<<<http://hdl.handle.net/10183/66367>>> (*PhD thesis, in potuguese*).

Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., and Ayup-Zouain, R.N., 2011. The Rio Grande do Sul (southern Brazil) shoreline behavior during the Quaternary: a cyclostratigraphic analysis. *Journal of Coastal Research*, SI 64, pp. 686-690.

Roy, P.S., Zhuang, W-Y., Birch, G.F., Cowell, P.J., 1992. Quaternary geology and placer mineral potential of the Foster-Tuncurry Shelf, southeast Australia. *Geol. Surv. Rep., Dep. Miner. Resour, NSW*, p. 164.

Sawakuchi, A.O., Kalchgruber, R., Giannini, P.C.F., Nascimento Jr., D.R., Guedes, C.C.F., Umisedo, N.K., 2008. The development of blowouts and foredunes in the Ilha Comprida barrier (Southeastern Brazil): the influence of Late Holocene climate changes on coastal sedimentation. *Quaternary Science Reviews* 27, pp. 2076-2090.

Sebatier, P., Dezileau, L., Colin, C., Briquieu, L., Bouchette, F., Martinez, P., Siani, G., Raynal, O., Von Grafenstein, U., 2012. 7000 years of paleostorm activity in the NW Mediterranean Sea in response to Holocene climate events. *Quaternary Research* 77, pp. 1-11.

Short, A.D. and Hesp, P.A., 1984. Beach and dune morphodynamics of the southeast coast of South Australia. *Univ Sydney, Coastal Studies Unit, Tech Rep. 84/1*, pp. 142.

Simeoni, U. and Corbau, C., 2009. A review of the Delta Po evolution (Italy) related to climatic changes and human impacts. *Geomorphology* 107, pp. 64-71.

Simms, A.R., Anderson, J.B. and Blum, M., 2006. Barrier-island aggradation via inlet migration: Mustang Island, Texas. *Sedimentary Geology* 187, pp. 105-125.

Soons, J.M., Shulmeister, J. and Holt, S., 1997. The Holocene evolution of a well nourished gravelly barrier and lagoon complex, Kaitorete "Spit", Canterbury, New Zealand. *Marine Geology* 138, pp. 69-90.

Stanley, D.J., Warne, A.G., 1994. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise. *Science*, 265, pp. 228-231.

-
- Stefani, M. and Vincenzi, S., 2005. The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system. *Marine Geology* 222-223, pp. 19-48.
- Storms, J.E.A., Weltje, G.J., Terra, G. J., Cattaneo, A., Trincardi, F., 2008. Coastal dynamics under conditions of rapid sea-level rise: Late Pleistocene to Early Holocene evolution of barrier-lagoon systems on the northern Adriatic shelf (Italy). *Quaternary Science Reviews* 27, pp. 1107-1123.
- Svensmark, H., 2000. Cosmic rays and Earth's climate. *Space Science Reviews*, 93, pp. 175-185.
- Taramelli, A., Valentini, E., Cornacchia, L., Mandrone, S., Monbaliu, J., Hoggart, S.P.G., Thompson, R.C., Zanuttigh, B., 2014. Modeling uncertainty in estuarine system by means of combined approach of optical and radar remote sensing. *Coastal Engineering* 87, pp. 77-96.
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Gonella, M., 2006. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. *Water Resources Research* vol. 42, pp 19.
- Tomazelli, L.J. and Villwock, J.A., 1996. Quaternary Geological Evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68(3), pp. 373-382.
- Tomazelli, L.J. and Villwock, J.A., 2005. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. *Gravel* 3, pp. 109-115 (*in Portuguese*).
- Vail, P.R., 1987. Seismic Stratigraphy Interpretation Using Sequence Stratigraphy. Part 1: Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure. In: Bally, A.W. (ed.). *Atlas of Seismic Stratigraphy*. Tulsa, AAPG, v. 1, pp. 1-9, (AAPG Studies in Geology # 27).
- Veggi, L., Roncuzzi, A., 1973. Sul problema delle più antiche foci padane e dell'evoluzione delle line costiere alto-adriatiche occidentali nell'Olocene. In: *Studi Idrogeologici dei Terreni Padani Inferiori II°*, pp. 7-20 (*in Italian*).
- Veggiani, A., 1973. Le trasformazioni dell'ambiente naturale del Ravennate negli ultimi millenni. *Studi Romagnoli*, 24, pp. 3-26 (*in Italian*).
-

Veggiani, A., 1974. Le variazioni idrografiche del basso corso del fiume Po negli ultimi 3000 anni.

Padusa, 1-2, Rovigo, pp. 39-60 (*in Italian*).

Villwock, J.A. and Tomazelli, L.J., 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas 8,

pp. 1-45 (*in Portuguese*).

Zecchin, M., Brancolini, G., Tosi, L., Rizzetto, F., Caffau, M., Braradelli, L., 2009. Anatomy of the

Holocene succession of the southern Venice lagoon revealed by very high-resolution seismic

data. *Continental Shelf Research* 29, pp. 1343-1359.

Zular, A., Sawakuchi, A.O., Guedes C.C.F., Mendes, V.R., Nascimento Jr., D.R., Giannini, P.C.F.,

Aguiar, V.A.P. and DeWittd, R., 2013. Late Holocene intensification of colds fronts in southern

Brazil as indicated by dune development and provenance changes in the São Francisco do Sul

coastal barrier. *Marine Geology* 335, pp. 64-77.

Capítulo 3

**SEASONAL DUNE AND BEACH MONITORING USING PHOTOGRAMMETRY
FROM UAV SURVEYS IN RAVENNA COAST (EMILIA-ROMAGNA, ITALY)**





giovedì 17/12/2015 15:33
 ees.geomor.0.360323.3d838b61@eesmail.elsevier.com em nome de Geomorphology <geomor@elsevier.com>
 Submission Confirmation

Para frederico.scarelli@ufrgs.br, frederico.scarelli@studio.unibo.it, fredscarelli@gmail.com

Research Paper

Dear Dr. Frederico Maranzato Scarelli,

Your submission entitled "SEASONAL DUNE AND BEACH MONITORING USING PHOTOGRAMMETRY FROM UAV SURVEYS IN RAVENNA COAST (EMILIA-ROMAGNA, ITALY)." has been received by Geomorphology

GEOMORPHOLOGY  [Contact us](#) [Help ?](#)  [Maintenance outage on 31 January 2016 ... more](#)
 Maintenance outages until February 2016 ... [more](#)
 'My EES Hub' available for consolidated users ... [more](#)

[home](#) | [main menu](#) | [submit paper](#) | [guide for authors](#) | [register](#) | [change details](#) | [log out](#) Username: frederico.scarelli@ufrgs.br
 Switch To: Author [▼](#) Go to: [My EES Hub](#) Version: [EES_2016.1](#)

Revisions Being Processed for Author Frederico Maranzato Scarelli

Page: 1 of 1 (1 total revisions being processed)

Display [10](#) results per page.

Action	Manuscript Number	Title	Date Submission Began	Status Date	Current Status
View Revision R1	GEOMOR-6216R1	SEASONAL DUNE AND BEACH MONITORING USING PHOTOGRAMMETRY FROM UAV SURVEYS IN RAVENNA COAST (EMILIA-ROMAGNA, ITALY).	Jan 25, 2016	Jan 28, 2016	With Editor

Page: 1 of 1 (1 total revisions being processed)

Display [10](#) results per page.

Periódicos Qualis

Dados para Consulta

*Evento de Classificação:

Qualis 2014 [▼](#)

Área de Avaliação

GEOCIÊNCIAS [▼](#) [+](#)

ISSN:

Título:

geomorphology

Periódicos

ISSN	Título	Área de Avaliação	Classificação
0169-555X	Geomorphology (Amsterdam)	GEOCIÊNCIAS	A2

SEASONAL DUNE AND BEACH MONITORING USING PHOTOGRAMMETRY FROM UAV SURVEYS IN RAVENNA COAST (EMILIA-ROMAGNA, ITALY).

Frederico M. Scarelli^{1,2*}, Luigi Cantelli¹, Flavia Sistilli¹, Stefano Fabbri¹, Eduardo G. Barboza³, Giovanni Gabbianelli¹.

¹*Bologna University, Department of Biological, Geological and Environmental Sciences, Environmental Science UOS, via Sant'Alberto 163, I-48123 Ravenna (IT).*

²*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Av. Bento Gonçalves 9500, 91509-900 Porto Alegre, RS, Brazil.*

³*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Av. Bento Gonçalves 9500, 91509-900 Porto Alegre, RS, Brazil.*

*Corresponding author: University of Bologna, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali, Via Zamboni 67, 40127 Bologna, Italy. E-mail address: frederico.scarelli@ufrgs.br (F. Scarelli).

ABSTRACT

Coastal monitoring is fundamental for studying the behavior of dunes and beaches due to natural and anthropogenic factors. Different tools have been used for these investigations, including LIDAR, satellite images, terrestrial laser scanning, and photogrammetry, allowing both qualitative and quantitative analyses. Particular tools are applied based on the interesting spatial and temporal scales of the coast being studied. In this paper, seasonal coastal change monitoring is conducted using high-accuracy and high-quality photogrammetry acquired via two unmanned aerial vehicle (UAV) surveys, in addition was added data on the strongest winter storm of the 2014-2015 season. The results of these two surveys are compared to identify the changes that occurred on beaches and dunes due to i) man-made changes, such as tourist facilities and winter storm defense construction; and ii) the winter storm, from dune erosion, looking at the magnitude of impact across all coastal zones under study. Moreover, this work shows the efficacy and applicability of photogrammetry from UAVs for coastal work, whether it is a useful technique for scientific studies and authorities to use due to its greater cost/benefit, and whether it contributes to the application of local Integrated Coastal Zone Management.

Keywords: ICZM; dune morphology; beach and dune changes; coastal environment monitoring.

1. INTRODUCTION

Beach and dune monitoring is very important in understanding morphological changes to coastal environments (Ruggiero et al., 2005; Richter et al., 2013), which are in a complex link with natural dynamics and anthropogenic factors (Psuty, 1988; Sherman and Bauer, 1993; Hesp, 2002; Carrasco et al., 2012). In addition, knowledge about morphological changes to the coastal environment has an important application in Integrated Coastal Zone Management (ICZM) (Andrews et al., 2002; Lambert and Zanuttigh, 2005; Davidson et al., 2006; Archetti and Zanuttigh, 2010; Taborda and Silva, 2012; Tătuț et al., 2013, Buono et al., 2015), in understanding the causes and driving the actions of stakeholders and decision-makers.

In the beach system, erosion and deposition are the natural responses of sediment dynamics and represent the coastal system's resilience (Woodroffe, 2007; Houser et al., 2015). Major anthropogenic changes occurred on beaches and dunes occur when men began to economically explore this environment by, for example, building harbors for commercial purposes or facilities and settlements adjacent to the coast for recreational and touristic purposes (Gormsen, 1997; Catto, 2002; Helsenfeld et al., 2008).

This coastal anthropization is reflected directly in the sediment dynamics, changing the system's resilience (Woodroffe, 2007). Furthermore, erosion and marine storms have become an economic issue, due mainly to structural damages and loss of land, both of which increase the system's vulnerability (Klein and Nicholls, 1999; Kindermann and Gormally, 2013), as the dunes are a natural source of protection against flooding and erosion (Dissanayake et al., 2014) and may hold back the saltwater intrusion as a point of freshwater table recharge (Saye et al., 2005; Antonellini et al., 2008).

This work uses of photogrammetry from unmanned aerial vehicle (UAV) surveys to monitor coastal zones with high resolution data (Mancini et al., 2013; Casella et al., 2014; Gonçalves and Henriques, 2015) during the 2014-2015 winter season. As such, this study determines the applicability of using this recent technology for coastal monitoring on a seasonal temporal scale to integrate the results with the data from works that study small and large scale (Sherman, 1995; Larson and Kraus, 1995). The study site is highly influenced by man-made changes due to economics interests as well as by natural factors such as winter storms and relative sea level changes.

Photogrammetry from UAVs allows the generation of a high resolution digital surface model (DSM) and ortho-rectified images to support the scientific monitoring of coastal morphology changes and understand the environment's behavior (Gares et al., 2006). It is a relatively low cost survey method for spatial and temporal monitoring compared to LIDAR survey and satellite images (Casella et al., 2014), which are methods that give high-resolution DSM and orthophoto respectively as the data obtained in this work. However, LIDAR surveys and satellite images are more expensive, thus decreasing the cost-benefit when using a spatial scale of hundreds of meters to kilometers and for a seasonal temporal scale, hampering the survey's repeatability (Gonçalves and Henriques, 2015). Repeatability is an indispensable element in effective environment monitoring, whether for scientific studies or ICZM programs (World Bank, 1993; UNEP, 1995; Klein et al., 1999; USAID, 2009).

The main aims of this paper are i) to test and expand the photogrammetry from UAV surveys for the monitoring of coastal environmental behavior in a seasonal scale; ii) to examine both natural and man-made forces on dune and beach morphology; iii) to identify the role of different factors to integrate with other coastal environmental knowledge, such as biology, economics and engineering; iv) to show the importance of maintaining the beach and dune system's natural resilience and decreasing the system's vulnerability; and v) to provide validated, high-resolution data to support ICZM decision-making.

2. STUDY AREA

The beach-dune system monitoring was conducted in the Ravenna Province Coastal area (Fig. 1) (Emilia-Romagna Region, Italy) on the NW Adriatic Sea, which has 50 km of sandy beaches and a

low gradient coast, and is under pressure from natural and anthropogenic factors (Bondesan et al., 1995; Gambolati et al., 1998; Perini et al., 2007; Vicinanza et al., 2009; Armaroli et al., 2013; Taramelli et al., 2014b). After World War II, a heavy anthropization began in the zone, with a tourism economy boom as a main factor, along with simultaneous heavy urbanization behind the shorelines, with new settlements constructed as holiday homes (Cencini, 1998). Along the coastal territory, dune ridges were fragmented and flattened in order to build fixed beach establishments called “*bagni*” (Martinelli et al., 2011). From 1892 until 2006, 50% of foredune ridges were damaged (Antonellini et al., 2008).

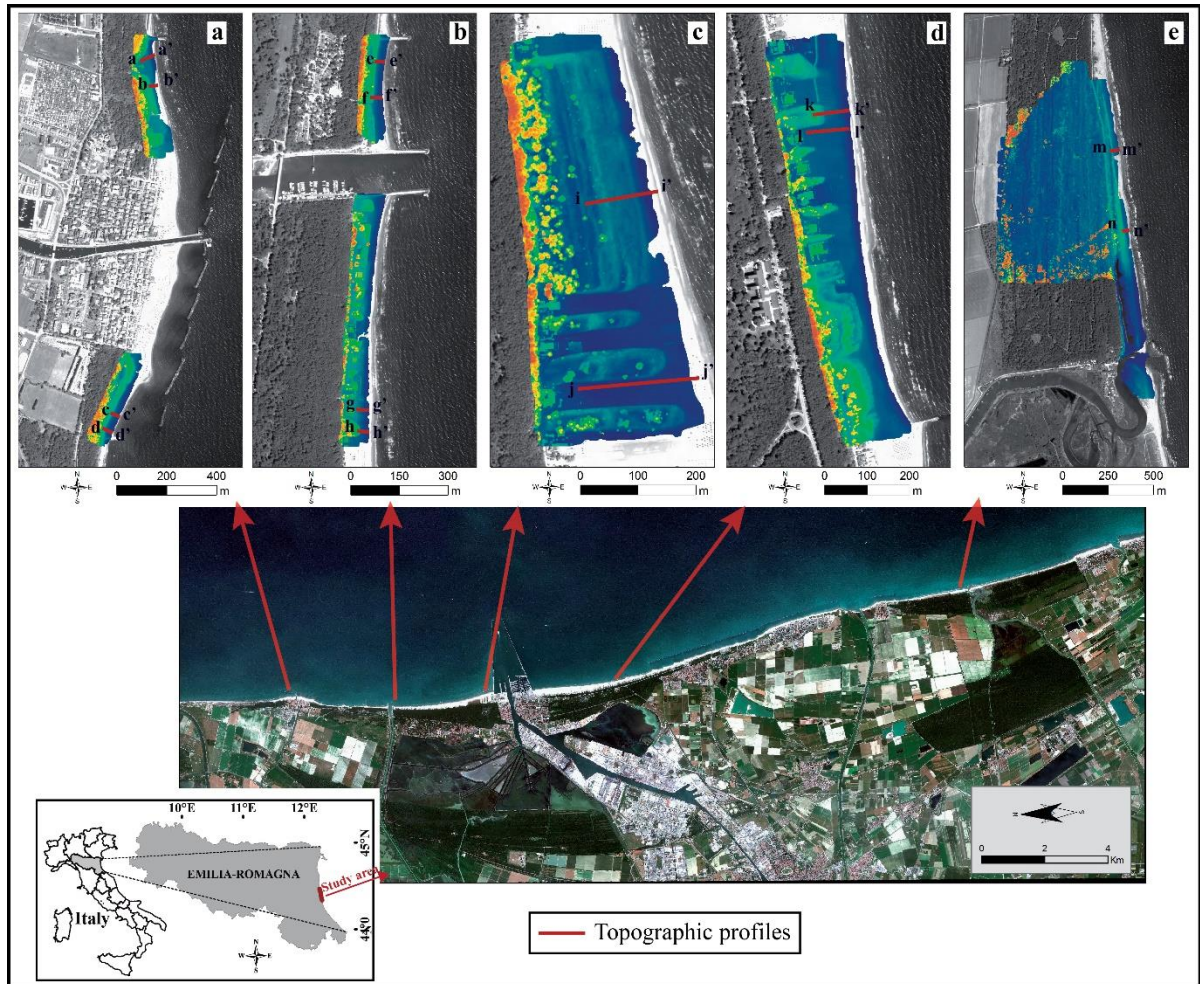


Figure 1: Study area and UAV surveys in a) Casal Borsetti, with two surveys—one in north of the town and the other in the south; b) Marina Romea, with one study north of Lamone river mouth and the other on the south; c) Porto Corsini; d) Marina di Ravenna; and e) Pineta Ramazzotti.

The study area includes a non-urbanized zone (Fig. 1e) that is under the protection of several international and national constraints (VV. AA., 2009). Here, in 2006, the Bevano River mouth was deflected 500 m south (Gardelli et al., 2007) to prevent erosion. In the same area, dune reconstruction and re-vegetation has been carried out (Taramelli et al., 2014b), with the body of water behind the dune reconstruction preserved to create a natural environment (VV. AA., 2009). It is a stretch of about 5 km that retains the natural coastal dynamic and without a direct anthropogenic influence on the coastal system, and the zone shelters the unique continuous foredune ridges of the Ravenna coast (Taramelli et al., 2014a).

During winter season, in front of the *bagni* exist the “winter dunes.” According Armaroli et al. (2012), these are built using foreshore and upper shoreface accumulated sand, which is reworked using bulldozers as a storm surge and inundation damage protection measure (Fig. 2). They are called artificial dunes by Harley and Ciavola (2013), who studied the importance of these anthropogenic

dunes in decreasing the impacts of the winter storms. Due the missing natural dynamics between vegetation, storms, and wave or wind action in these dune formations, which are completely man-made dune, in this work these type of dunes will be called “bulldozer dunes” (Fig. 2). The term bulldozer dunes may be the most apt name for an anthropogenic dune, as it describes the dunes’ genesis. During the summer season in the study area, the sand from bulldozer dunes are used to increase the beach’s width (Figs. 2a and 2b), providing more space in front of establishments (Armaroli et al., 2012).



Figure 2: Bulldozer dunes; anthropogenic dunes built using a bulldozer on the Ravenna coast; a) bulldozer reworking the sand to prepare the beach for the summer season; b) bulldozer increasing the beach’s width for the summer season; c) behind a bulldozer dune in Marina di Ravenna during the winter season; d) above the bulldozer dune to protect the *bagnini*.

Ravenna’s coastal plain has a low elevation above medium sea level (MSL), with dune crest elevations between 1.5 to 3 m above MSL (REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2010), an average sediment size of between fine and medium sand (Armaroli and Ciavola, 2011), and a microtidal regime, with a neap mean range of 30 – 40 cm and a spring mean neap of 80 – 90 cm. The beaches have a slow gradient of 0.03° , the mean backshore/foreshore width is 70 m, and the beaches are classified as being very dissipative (surfing scaling parameters $(-\xi_0) < 0.3$) (Armaroli et al., 2012).

The waves are of low height, below 1.95 m for 91% of waves measured by the Ravenna port tide gauge, Dominant wave comes from the east and storms are caused by the “Bora wind” from the ENE and the “Scirocco wind” from the SE (Armaroli et al., 2012). The Bora wind has an important influence on wave climate and circulation patterns in the Adriatic Sea. It is turbulent, powerful, and cold, and it can last from 12 h to several days and may occur several days during winter (Signell et al., 2010). Thus, it is an important factor to monitor in order to understand its effects on the coastal system and how it behaves.

The studied zone has an erosive trend induced by man’s influence (Bondesan et al., 1995; Gambolati et al., 1998; Martinelli et al., 2011; Harley and Ciavola, 2013), principally due the construction of inland dams, which decrease the river sediment rates for natural beach nourishment (Martinelli et al., 2011). The zone is affected by natural subsidence (sediments compaction) and anthropogenic

subsidence (gas and groundwater extraction) (Taramelli et al., 2014a), both of which increase the erosive trend and the pressures on this coastal system (Gambolati et al., 1999). To fight erosion and preserve the urban zone, breakwaters were built alongshore at the beginning of the 1980s, changing the alongshore sediment transport dynamic (Armaroli et al., 2012). After 1990, beach nourishment have been done at critical points. Because of that, this coastal zone is under intense pressure, increasing the coastal susceptibility. Thus, appropriate ICZM actions are essential to decrease the system's susceptibility and to integrate the stakeholders' interests.

3. MATERIALS AND METHODS

To monitor the beach dune system during the 2014/2015 winter season, two high-resolution DSMs were generated from dense point clouds, which were elaborated using a structure from motion (SfM) approach with data from two UAV surveys to create a high-accuracy analysis (Mancini *et al.* 2013). Using the photogrammetry method, it was possible to measure the coastal system's response to environmental changes, analyzing the effects and the impacts induced by coastal dynamics during the season and human actions taken in this particular zone from a sedimentary depositional-erosion point of view (Brown and Arbogast, 1999). Moreover, between these two surveys, a large storm occurred over the NW Adriatic coast, damaging many structures in that area. This method allowed a qualitative and quantitative evaluation of the beach dune changes. This analysis included principal storm data from during the season that showed the importance of local action.

3.1- UAVs surveys

In this work, two UAV surveys were done in the study area: the first in September 2014, corresponding with the end of the summer season, and the second in March 2015, at the end of the winter season. The flights covered only the beaches and dune systems, and not any strictly urban zones, due an ENAC (Ente Nazionale Per l'Aviazione Civile - Italiana) regulation prohibiting UAV flights near settlements (ENAC, 2013). The monitoring campaign was commissioned by SAL Engineering and the UAV included a technical report system (SAL Engineering, 2015), a vertical take off and landing (VTOL) hexacopter, and a calibrated Canon EOS model 550D digital camera (resolution 5184x3456, focal length 25 mm, pixel size 4.4036x4.4036 μm).

Photo acquisition was automatic, set at one shot per second, flying at about 60 m height, with appropriate overlap between aerial photos. The images were then processed to generate the DSM and converted into ortho-rectified images (orthophoto) by Agisoft Photoscan's workflow algorithms (Agisoft, 2013) using an SfM approach (Snively et al., 2007). For a precise georeferencing, and to minimize horizontal and vertical error, a GNSS-NRTK was used to acquire the coordinates of ground control points (GCP) with UTM Zone 33N (ETRF00) for horizontal coordinates and the geoid model ITALGEO2005 provided by the IGMI (Istituto Geografico Militare Italiano) for vertical values compared to the mean sea level. The GCPs were subjected to a PhotoScan process for better photogrammetric reconstruction.

The data were consigned in ortho-rectified images with 0.5 m pixel size and in dense point cloud with .LAS format. Using Global Mapper, the DSMs were generated in ASCII format with 0.5 m cell size. This resolution allowed the determination of the sediments' spatial distribution on the coast (Andrews et al., 2002). The surveys were segmented into seven areas: i) *Casal Borsetti North* (Fig. 1a); ii) *Casal Borsetti South* (Fig. 1a); iii) *Marina Romea Nord* (Fig. 1b); iv) *Marina Romea Sud* (Fig. 1b); v) *Porto Corsini* (Fig. 1c); vi) *Marina di Ravenna* (Fig. 1d); and vii) *Pineta Ramazzotti – Bevano Mouth* (Fig. 1e). The surveys in the Casal Borsetti and Marina Romea coastal towns were each divided into two parts north and south of the river mouth. All elaborations, results and discussion use this subdivision.

3.2- Surface changes

The surveys were used to evaluate the surfaces changes of beaches and dunes, due principally to storm events during the period analyzed. For the surface analysis, Fledermaus software was used; this

software is a validated analysis tool for interactive 3D geo-spatial processing (Varela-Gonzales et al., 2013), allowing a surface comparison between surveys based on volumetric difference and providing information about spatial variations (Brown and Arbogast, 1999). In the software, is possible to drape the DSMs with orthophoto, improving the analysis and integrating the 3D assessment from DSMs with 2D data to identify the beach land use or vegetation cover (Gonçalvez and Henriques, 2015).

Two types of analysis were executed: the first was focused on the surface differences between surveys, using 2014 survey data as the *base surface* and the 2015 survey data as *interest surface* as well as request by the Fledermaus tool called surface difference tool; this process was done for each segment. The tool subtracts the cell center value and the result is represented in another DSM as an elevation difference, where positive values represent areas with deposition and negative values represent erosion.

For the pine forest and vegetation, and others elements that were not of interest for analysis, the orthophoto imagery helped to identify changes, although the aim was to evaluate the spatial variations. The high resolution allowed the representation of sedimentary beach and dune spatial changes using a 0.5 m color scale within the ranges of $> + 4$ m to $< - 4$ m. In the second analysis, the beach dune profile from the 2014 and 2015 UAVs surveys was extracted for the critical and representative zone and exported in .xyz format to analyze the local environmental changes in each segment.

3.3- Meteo-Marine Data

In order to evaluate the beach-dune system's susceptibility, meteo-marine conditions were used to identify the strongest storm over the set period. This analysis was conducted using data from the Angelina platform (courteously provided by ENI-IT) and the storm events were identified according to MICORE project criteria, which consider a storm as being indicated by wave height >1.5 m for six consecutive hours (Arpa-Emilia Romagna, 2011). The event of interest was identified as an intense storm that occurred on 5 and 6 February 2015, lasting about 43 hours with strong winds from the ENE. During the storm, the mean wave height was 2.40 m and the highest wave was 4.85 m. Moreover, a storm surge occurred, with a mean sea level of 0.73 m and a highest sea level of 1.21 m.

To estimate the maximum flood level (MFL) during the storm, the wave runup (R_2) elevation was calculated according to Stockdon et al. (2006) using a dissipative-specific formula. Maximum flood level occurred in association with the highest wave (4.85 m), with a $R_2 = 0.73$ m (± 0.21 m root mean square error) and a concurrent sea level of 1.02 m. The sum of these two components determined a MFL of 1.75 m (± 0.21 m root mean square error), which was overlapped the extracted profiles from 2014 and 2015 UAV surveys, to demonstrate the susceptibility of zones without dunes.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The two surveys allowed the monitoring of changes induced by humans and by winter storms on this coastal zone. The results will be discussed for each segment. The results also allow a discussion of the advantages of and the precautions to use with the UAV surveys for coastal monitoring in order to obtain an enhanced result. Photogrammetry by UAVs may have limitations in the coastal zone, which can be addressed by integrating the survey with other information and knowledge about the site under study. In this work, the presence of man-made changes may confuse the interpretation of beach and dune behavior during the winter season but with due caution, these elements will not interfere with the aim of this work.

On Ravenna's coast, man-made changes done to prepare the beach for summer's tourist season are significant, modifying the natural morphology after winter season (Armaroli et al., 2012). In the locations where the foredunes have been reworked, the high resolution DSM and orthophotos from UAV survey enable the investigation of these changes (Figs. 3a and 3b). The presence of vegetation on foredunes without any man-made changes is evident in the 2014 survey (Fig. 3a), while in the 2015 survey, man-made changes to foredune are visible, with a sign leave by the bulldozers on the sand to rework the foredune (Fig. 3b), limiting the interpretation of the natural behavior in this zone.

The DSM and orthophotos from the UAV surveys proved a powerful tool for monitoring the beach and coastal dunes. Also, from naturalist point of view, they allow people to inquire and obtain information about vegetation on dunes. The orthophotos provide valid data to observe the natural state of the system, and how it changes on the coast, since the presence of vegetation is clear on the foredune. In these two surveys, it is possible recognize the changes in vegetation density on the foredunes due to the seasonal growth of trees and bushes (Figs. 3c and 3d).

These changes in vegetation generate high negative values in the measurement done by the difference surface tool, which are considered as volume changes (Fig. 4) by the software. In this case, the surface differences are due principally to seasonal changes in vegetation density on the dunes. The negative values may be interpreted as dune erosion but can also be considered as noise when the aim of study is the spatial distribution or sediments. Because of this, the integration of knowledge from the study site, and the DSM and the orthophotos from photogrammetry, can resolve this problem during interpretation of the results.

In addition, the UAV surveys may be used to monitor in detail geomorphological elements and processes, such as dune blowout behavior (Figs. 3e, 3f and 3g) (Andrews et al., 2002) or washover processes, providing an accurate result with a high spatial resolution (Mancini et al., 2013). This analysis requires attention to the noise source during data elaboration and principally during data interpretation. Other instruments, however, such as the terrestrial laser scanner, may give better results for detailed morphological elements and small spatial scales in terms of survey time and the ability to clean noise like vegetation and others elements not of interest.

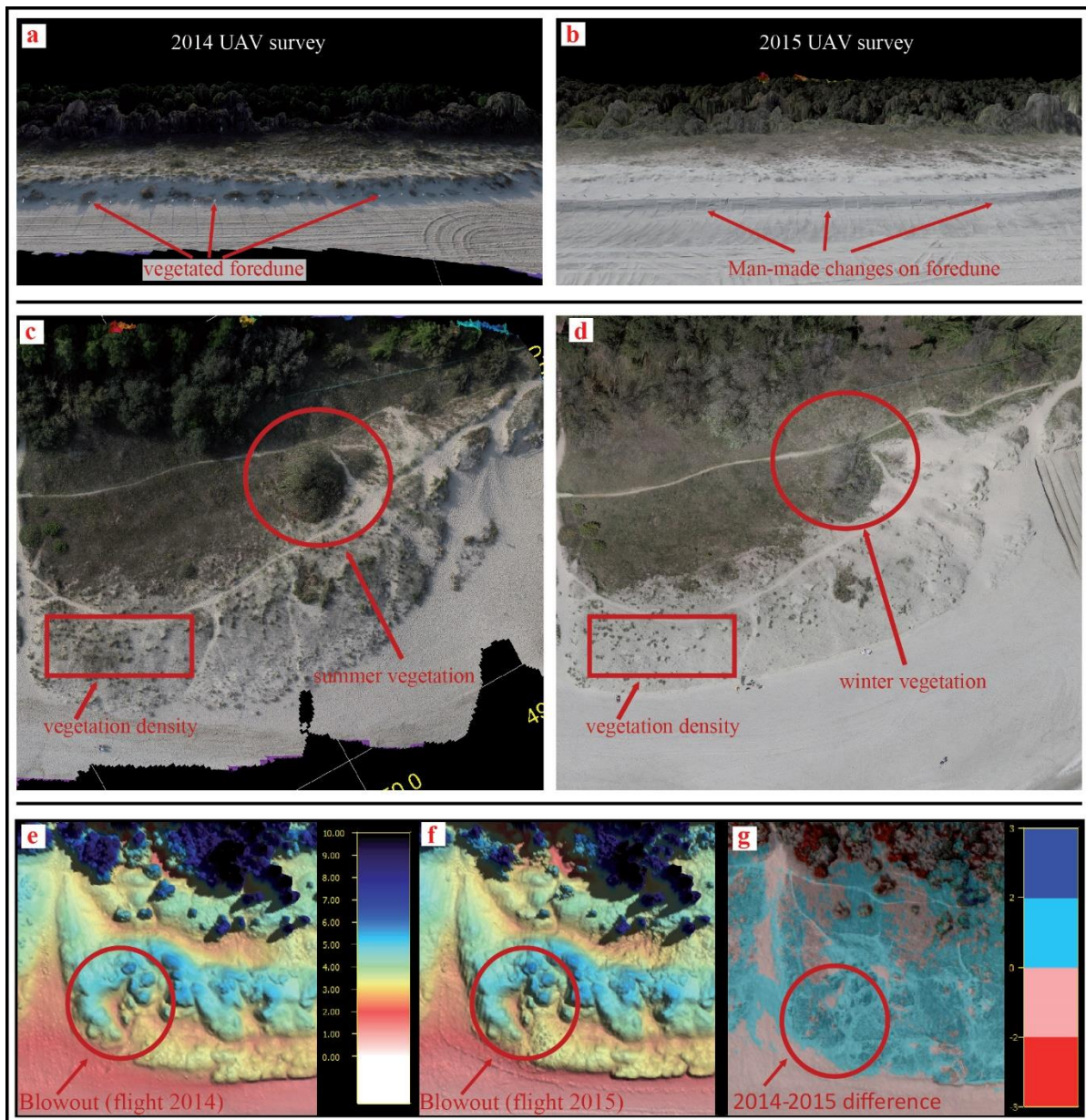


Figure 3: The potential of UAV surveys for coastal monitoring; a) and b) a natural foredune with vegetation from the 2014 UAV survey and the man-made changes to the foredune observable in the 2015 UAV survey; c) and d) the vegetation difference between the 2014 and 2015 UAV surveys; c) after the 2014 summer season, there exists a higher vegetation density on the foredune; d) after 2015 winter season, less vegetation is seen on the foredune; e), f) and g) a detailed scale dune monitoring, blowout detail on the DSM obtained from UAV survey (e and f); g) high resolution data on deposition and erosion on blowout, obtained using surface difference tool.

For a land use and spatial occupation analysis on the coast, it was possible to acquire data with high resolution (Fig. 4a and 4b). Observing and comparing the surveys, it was possible clearly verify the changes on land for both images. These changes occur every year in the most anthropogenic parts of the Ravenna coast when the bulldozer dunes are built (Fig. 4a and 4b) the beach profile is flattened in summer to build tourist facilities (Armaroli, et al. 2012; Harley and Ciavola, 2013). The surface difference (Fig. 4c) shows these changes on the territory, and moreover, it is possible to identify coastal system changes due to anthropization such as the bulldozer dunes and changes due to natural dynamics such as dune erosion by storms. These qualitative and quantitative analyses provide important information by which local authorities can follow changes to the coastal system.

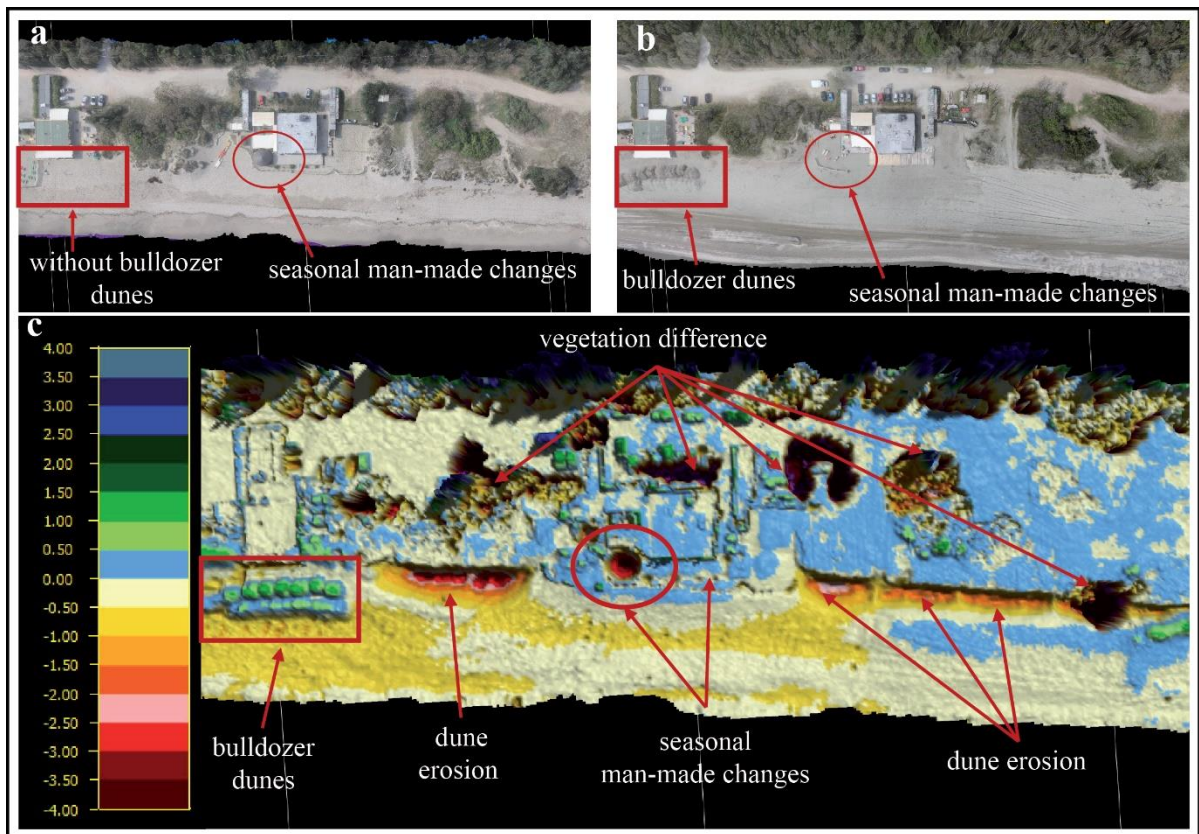


Figure 4: Individualized elements on the beach; a) imagery from the 2014 UAV survey; b) imagery from the 2015 UAV survey; c) surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys.

For each segment, two representative profiles were done using the same positions in the 2014 and 2015 UAV surveys (Fig. 5). Figure 1 shows the topographic profiles location. Profiles were extracted using fledermaus-v7 software overlapped with MFL to show the changes that occurred during the 2014-2015 winter season, the susceptibility of this beach/dune system, and the territorial vulnerability. A discussion of each segment is presented below.

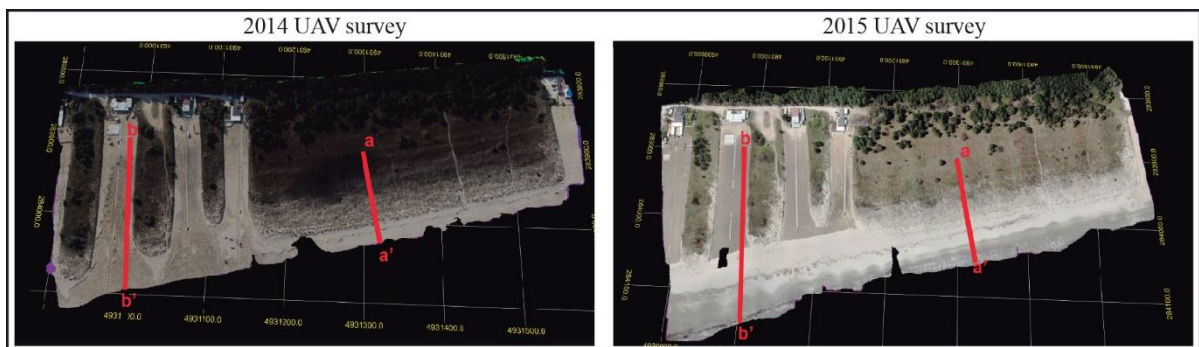


Figure 5: Example of profiles extracted from the 2014 and 2015 UAV surveys. This method was used to extract and calculate the profiles along each segment.

4.1 - Casal Borsetti North: In front of the Casal Borsetti settlement, severe erosion process led to parallel and transversal groins construction aided in protecting the foredune during winter storm. Figure 6 shows the surface difference between the surveys. In this segment, the majority of the area shows a positive value due man-made changes on the system, where the dunes had been reworked and bulldozer dunes had been constructed. Adjacent to the bulldozer dune is a small zone with a negative value, showing dune erosion. Behind the coast exists a pinewood forest and due to the difference in vegetation density between the two surveys, the surface difference behind the dune shows high variation.

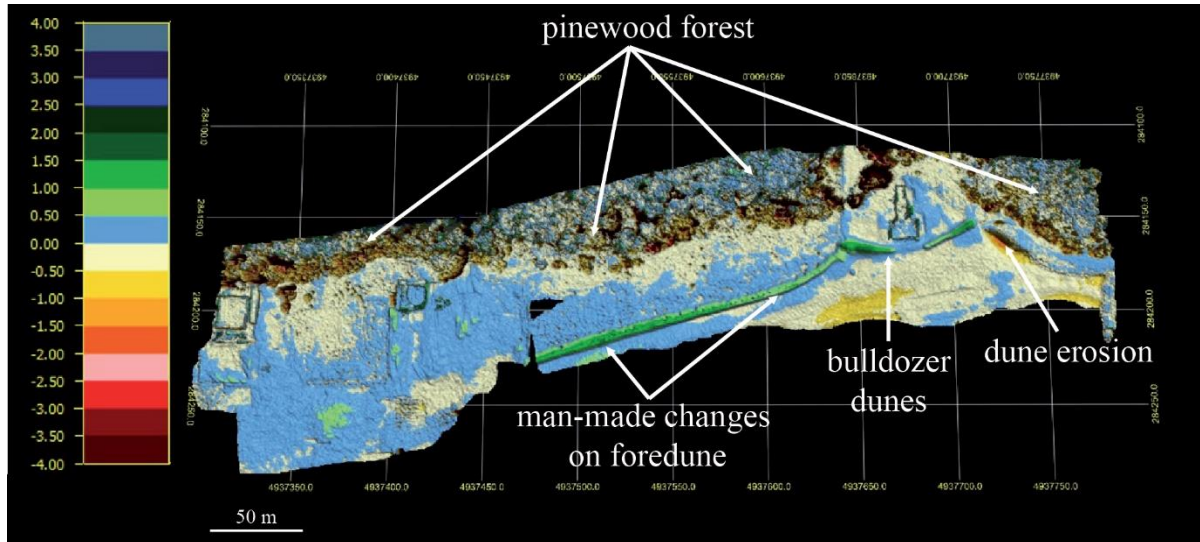


Figure 6: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the north of the Casal Borsetti settlement.

Analyzing across dune and beach profiles, (Fig. 14) profile a-a' shows the bulldozer dune constructed in front of a *bagno* and the vulnerability of this structure due to the winter storm. In profile b-b', the increase in the foredune is due to sand rework by humans (Fig.2a). It is possible to see the bulldozer signs in the sand. The groins protected this zone, decreasing damage from the winter storm surge.

4.2 - Casal Borsetti South: the segment at the south of the Casal Borsetti settlement is more natural than the northern one. A fixed structure is present in the right part of the segment, where values are positive, between 1 m and 1.5 m (Fig.7), due to bulldozer dune building. Behind it is a pinewood forest and the higher positive and negative values above the dune are due to vegetation density. A part of the foredune in the center of the segment has been eroded, as detailed in Fig. 14, profile c-c'. The sedimentary spatial distribution has a positive value in the left part of the segment, where a transversal breakwater is present that contributes to trapping the sediment (Armaroli et al., 2012). The profile d-d' (Fig.14), which was extracted close to the breakwaters, shows that the foredune changes are between 0.5 m and -0.5 m. These values are too small to be considered a change between seasons.

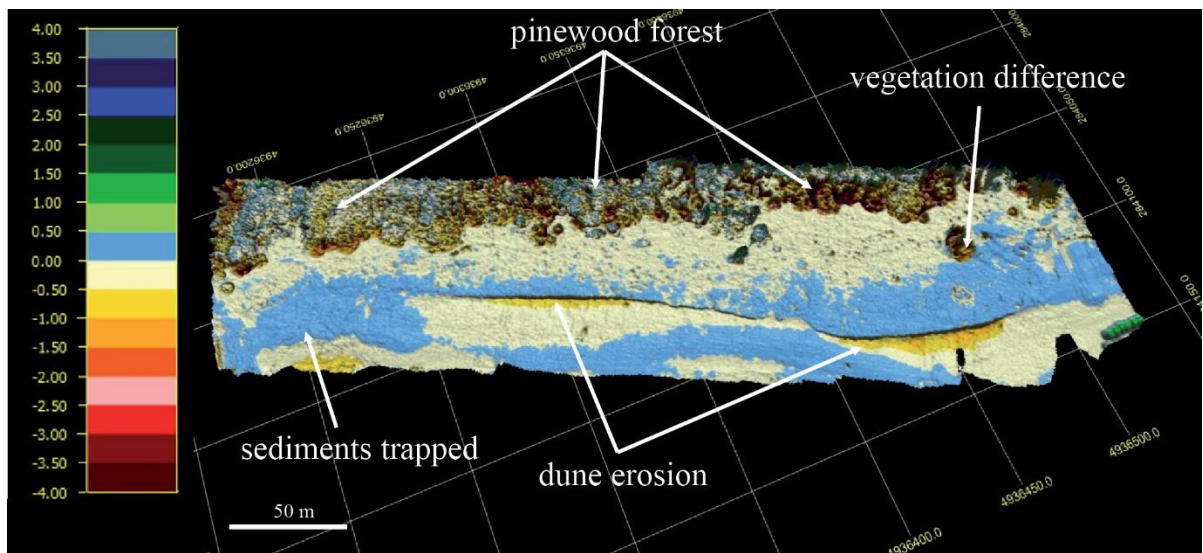


Figure 7: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the south of the Casal Borsetti settlement.

4.3 - *Marina Romea North*: This segment is between a transversal breakwater and the north jetty of the Lamone River Mouth. The impact of the storm in this zone was strong. The foredune had been eroded and the erosion values are between -0.5 m to -1 m (Fig. 8) in main foredune zone. The profiles e-e' and f-f' in Fig. 14 show the erosion in this segment that occurred during the 2014-2015 winter season.

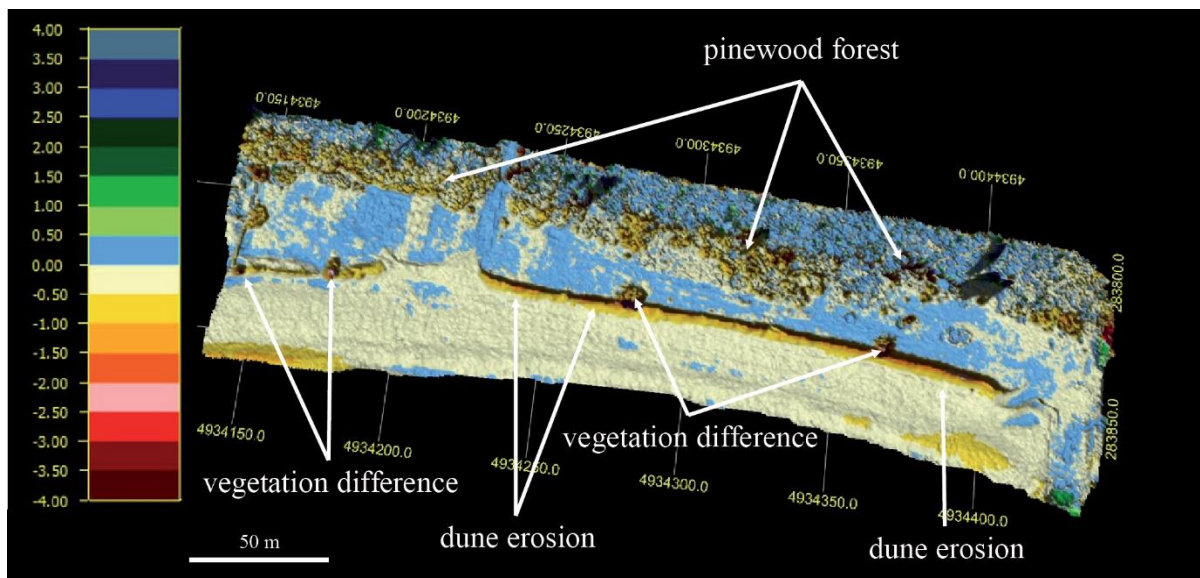


Figure 8: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the north of the Marina Romea settlement.

The segment of Marina Romea North is a more natural beach than Marina Romea South. Although the impact of the storm in this zone was strong, the vulnerability of this part lower due the nonexistence of fixed structures on the beach. Moreover, in this zone, the vacations houses are behind the pinewood forest, contributing decreased local vulnerability.

4.4 - *Marina Romea South*: Together with Marina di Ravenna, this segment is highly anthropized, with many fixed structures on the beach. In addition bulldozer dunes are present in front of all the fixed structures, where the surface difference values are positive, ranging from 0 to 3 m (Fig. 9). This segment shows the importance of bulldozer dunes in protecting the *bagni* from storm damage. All of the dune fragments still present in this zone show erosion, with values of about -1.5 m. The profile g-

g' (Fig. 14), in front of a fixed structure, shows exposure to the storm and the protection created by the bulldozer dune. In profile h-h' (Fig. 14), erosion is seen in a dune adjacent the fixed structure.

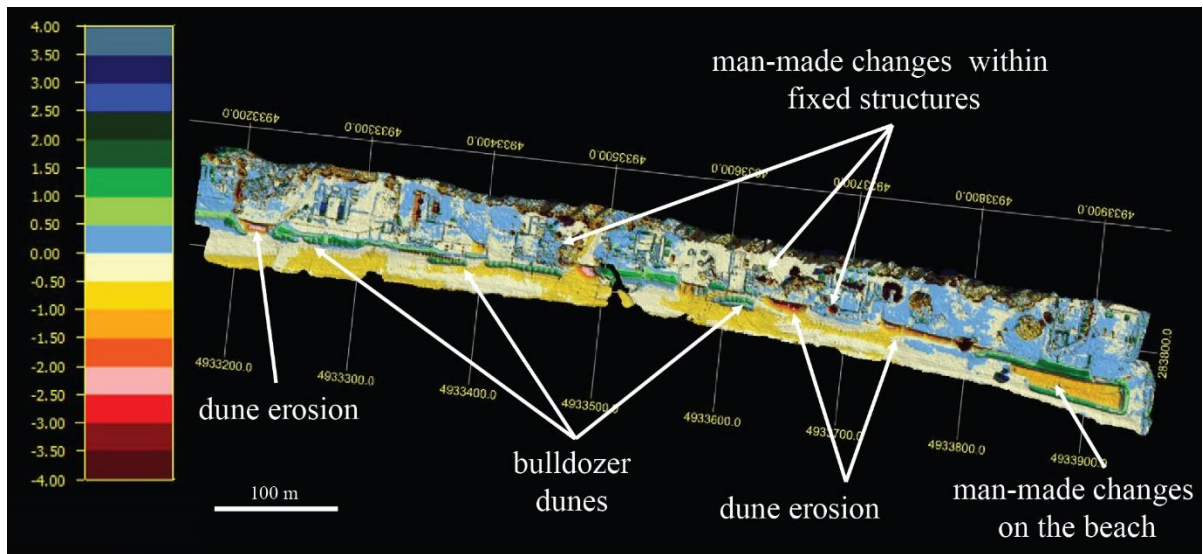


Figure 9: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the south of the Marina Romea settlement.

During the summer season, this zone receives many tourist and the beach is modified to create more space and change the land use. The clearest changes are concentrated near the *bagni*, where recreational areas have been built. It is possible to identify these new construction by the surface difference (Fig. 4c).

4.5 - Porto Corsini: This segment is located at the north of Ravenna's port, where there is a 3 km length jetty that traps the sediments. In this zone, the morphological changes due to the winter storms are very light. The surface difference values vary between -0.5 m and +0.5 m (Fig. 10) for the majority of the beach and dunes in this segment. The anomalies are due to bulldozer dunes in front of the three fixed structures in this segment. On the dunes, it is possible to observe the presence of vegetation, and the black area of the figure is due to no data for the 2015 survey.

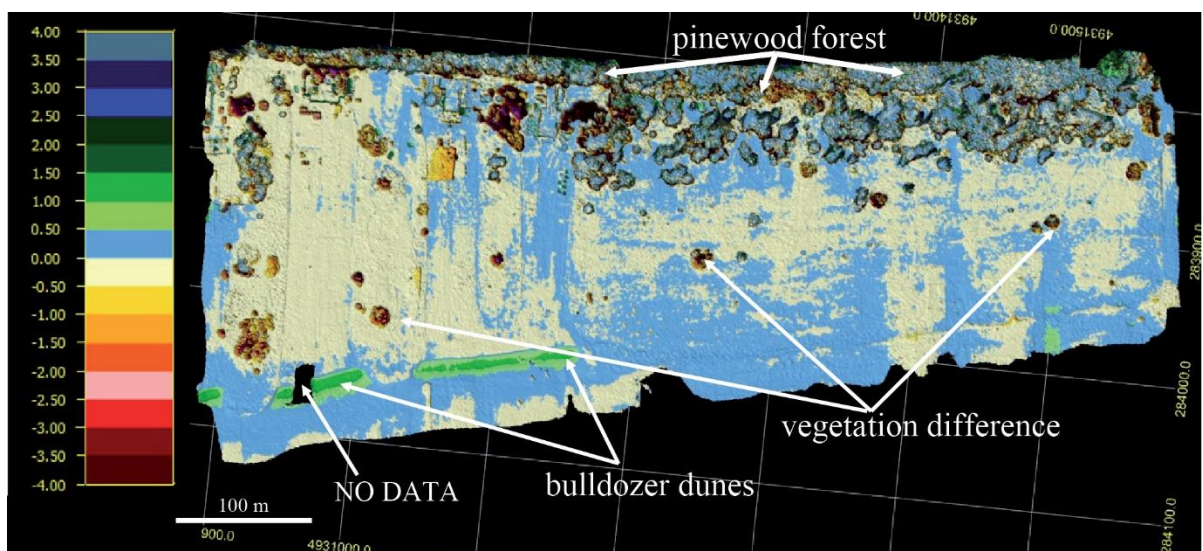


Figure 10: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the Porto Corsini settlement.

The profile i-i' (Fig. 15) shows the equilibrium of the foredune during the winter season. Regarding profile j-j' (Fig. 15), many fixed structures are clearly exposed to winter storms, showing the bulldozer dunes' role in front of these structures along the coast.

4.6 - *Marina di Ravenna*: In this part, at the south of Ravenna's port, half of the segment, on the left, shows natural dynamics with dunes. Here, the surface difference values for the beach are negative, at about -0.5 m, and behind the dune the values are positive, at about 0.5 m, representing a small sediment deposition (Fig. 11). These dunes are under control of monitoring for blowout behavior because these dunes represent a natural element adjacent to a dense anthropized coastal system (Fabbri, 2015). As such, the UAV surveys are important for understanding the environmental behavior adjacent to these dunes. The other part of the segment shows fixed structures built between dune fragments, where bulldozer dunes have been built to protect the facilities and the fixed structures.

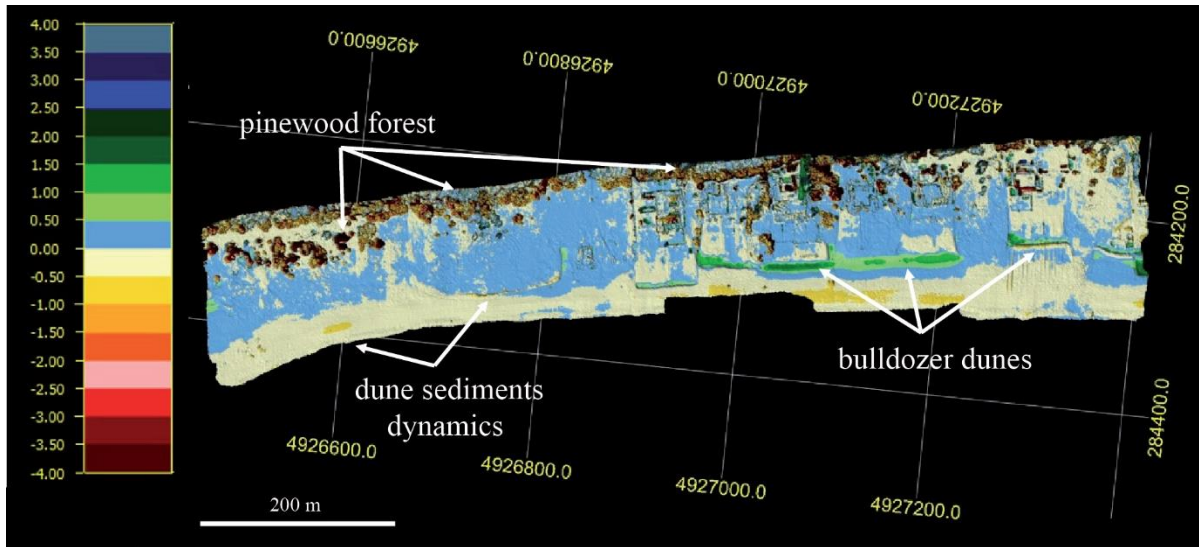


Figure 11: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at the Marina di Ravenna settlement.

Marina di Ravenna has the widest beach of the entire study area. At about 70 m, it dissipates the wave energy and consequently decreases the impact of storms. This can explain the low susceptibility of this beach and dune system and the lower vulnerability to winter storms. Profile k-k' (Fig. 15) shows no erosion on the dunes. Where the *bagni* are present in profile l-l' shows the bulldozer dunes' topography and the exposure these structures would face without bulldozer dunes.

4.7 - *Pineta Ramazzotti*: This segment is inside the natural reserve on the Ravenna coast. Without residences, fixed structures, or tourists, it was also severely affected by the storm in March 2015. The aerial beach in this segment is smaller than the other segments, decreasing wave dissipation and increasing the energy of the wave on the beach and on the foredune (Richter et al., 2013). To understand the natural dynamic changes on the Ravenna coast, it is important to investigate and monitor this zone in particular. In the right part of the segment, near the coastal town of Lido di Dante, the erosion values seen through surface difference (Fig. 12) are around -2.5 m, with a deposition behind the dunes.

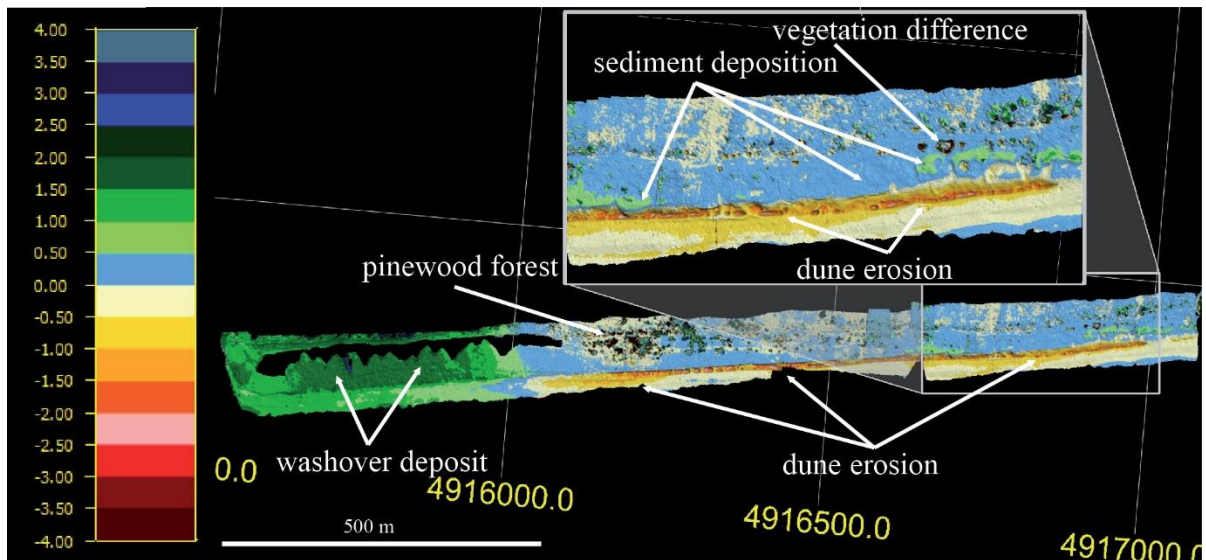


Figure 12: Surface difference between the 2014 and 2015 UAV surveys at Pineta Ramazzotti.

Profile m-m' (Fig. 15) shows the dune flattened and the foredune ridge completely damaged after the storm. A more detailed surface difference in this part demonstrates the impact on the foredune profile a-a' (Fig. 13A). At several points, strong erosion can be seen, where the foredune retracted almost 10 m (profile n-n', Fig. 15). The left part of this segment shows heavy sediment accumulation, with values of up to +3 m. During the storm, the left part of the segment was subjected to the washover process, increasing the surface at this point. Profile a-a' in Fig. 13B clearly shows the behavior of this part. In the 2014 UAV survey (before the storm), the dune was around 1 m height, while in the 2015 UAV survey (after the storm), the washover process had increased the dune height by 1 m.

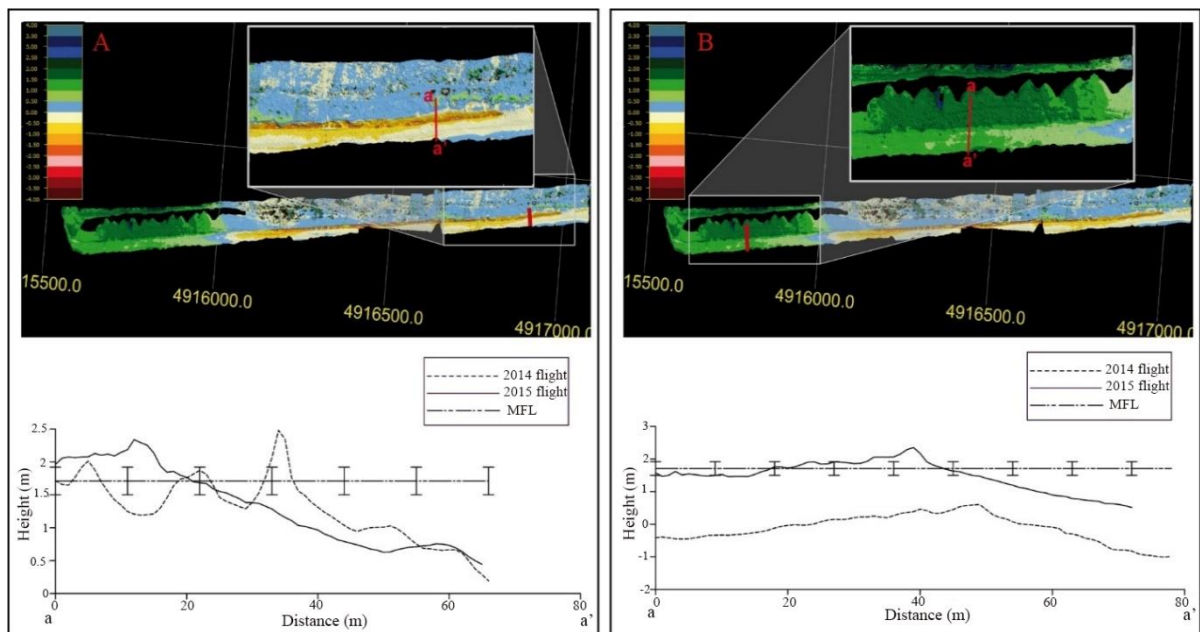


Figure 13: A) zoom and profile at the damage zone of the Pineta Ramazzotti segment, where profile a-a' was extracted; B) Zoom and profile at the south of the Pineta Ramazzotti segment, where profile a-a' was extracted.

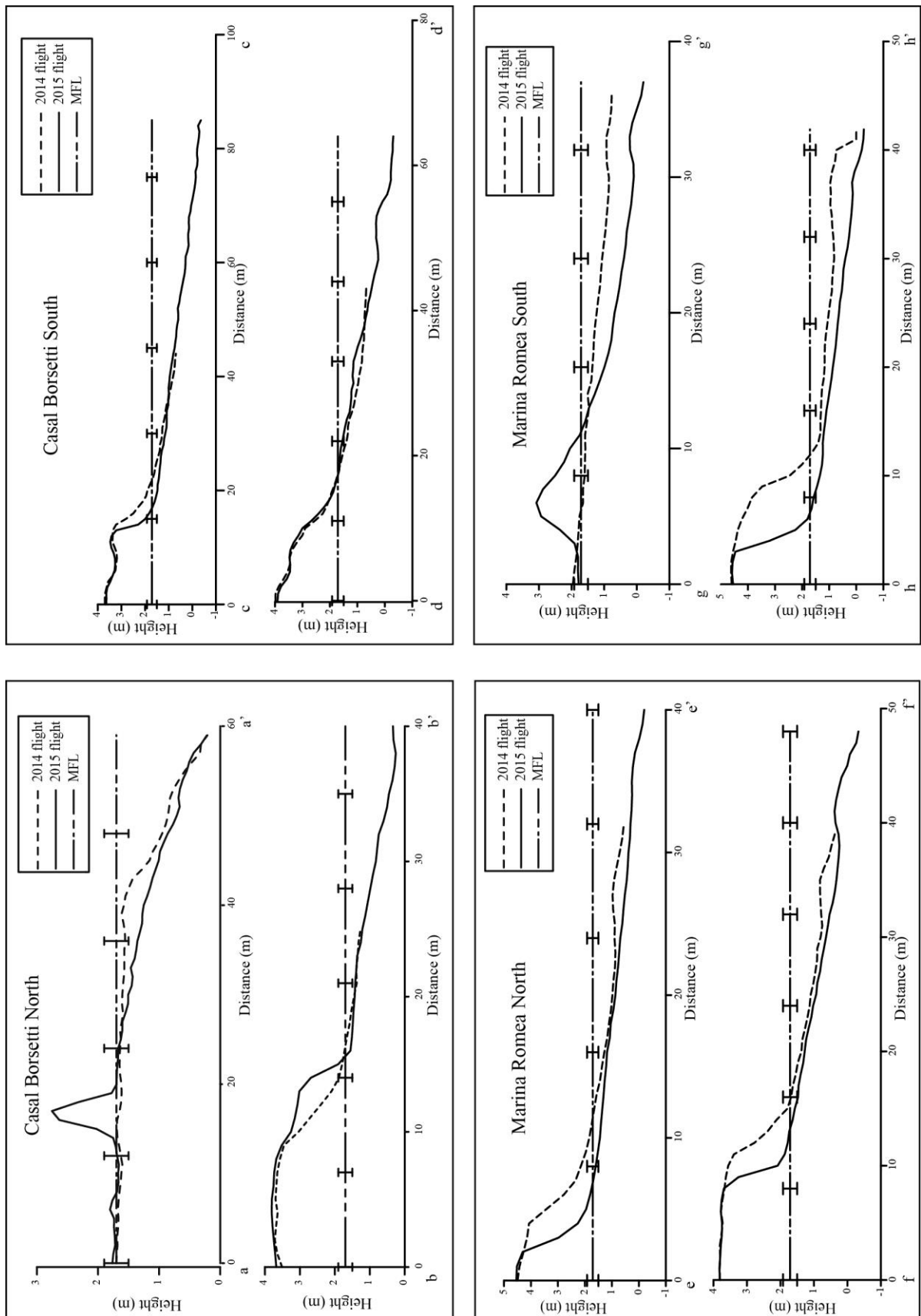


Figure 14: Profiles extracted from the 2014 and 2015 UAV surveys overlapped with WFL; profiles a-a' and b-b' at the Casal Borsetti North segment; profiles c-c' and d-d' at the Casal Borsetti South segment; profiles e-e' and f-f' at the Marina Romea North segment; g-g' and h-h' at the Marina Romea South segment.

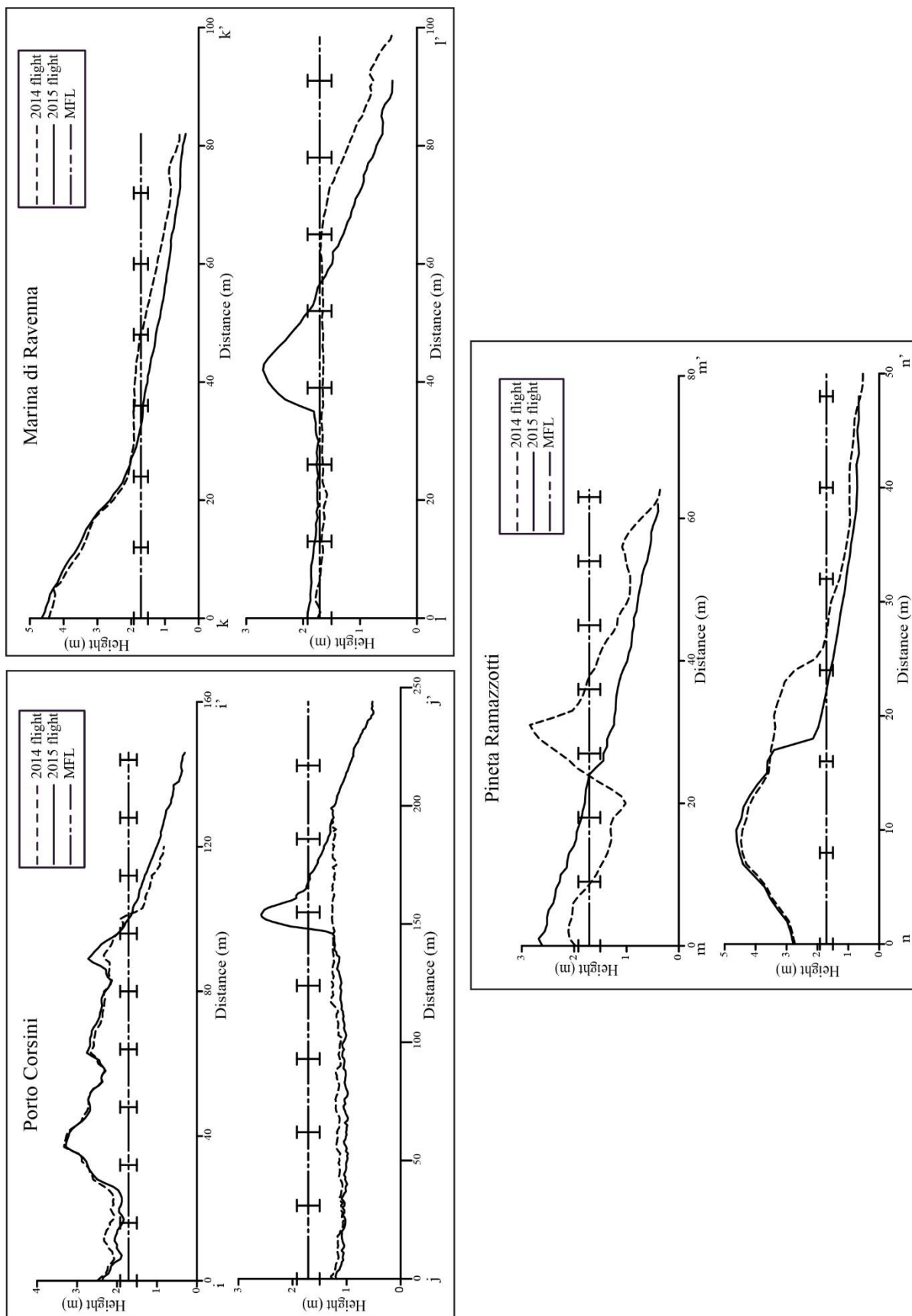


Figure 15: Profiles extracted from the 2014 and 2015 UAV surveys overlapped with WFL; profiles i-i' and j-j' at the Porto Corsini segment; profiles k-k' and l-l' at the Marina di Ravenna segment; profiles m-m' and n-n' at the Pineta Ramazzotti segment.

5. CONCLUSION

The use of UAV surveys has allowed us to monitor the Ravenna coast, understand the mean pressure factors for all segments, and see how the coastal behavior changed during the winter season due to man-made changes and a winter storm. The changes in the Pineta Ramazzotti segment showed the power of the storm, which caused severe erosion of the entire dune, changing the local morphology. A natural foredune present in this zone increases the resilience of the coastal system. Thus, it is important to continue monitoring and to integrate more knowledge about dune and beach behavior to construct a complete framework of behavior in this zone that will aid in maintaining the natural state.

The results from the other segments show the changes that have been made by building fixed structures; the UAV surveys were an important tool in investigating these changes during the 2014-2105 season, and can be used as a new tool to support local studies in geomorphology and ICZM studies. Moreover, this work has determined the man-made changes on the beach and the importance human actions, especially with regard to the fixed structures during winter storms and their vulnerability in the absence of bulldozer dunes. With the assistance of photogrammetry, it is possible identify the critical points of the dune and beach system, thus decreasing local susceptibility by giving authorities an understanding of the natural and anthropogenic factors that induce coastal susceptibility. Coastal geomorphology has been made a theme for local stakeholders' interests and not just a scientific research theme, forcing local authorities to seek out regular, high resolution data acquisition.

Moreover, this study shows the facilities for coastal monitoring, promoted by UAV surveys based on photogrammetry to monitor the environment's behavior and drive ICZM actions. The results obtained from UAV surveying may be use to monitor a particular location or an interesting area in the beach and dune system. It may also be applied in multidisciplinary scientific studies such as economics and management studies to evaluate environmental changes from a monetary point of view, or in biology to investigate the changes in vegetation and habitats. Or, engineering studies can use the high-resolution data to increase the measurements quality of projects.

The territory DSM and orthophotos obtained by photogrammetry allow the gathering of high accuracy data to identify changes due to natural factors or human actions in the short and long terms (Stive et al., 2002). The cost of these surveys is more advantageous for local authorities, compared with the cost for LIDAR surveys or high quality satellite imagery for regular data acquisition. Another important factor to consider in using UAV surveys for ICZM by local authorities is the relativity low price of UAVs, including a low operating cost and high automatic survey level (Gonçalves and Henriques, 2015) that can obtain highly accurate data. Thus, this method can become an important tool that allows coastal environmental decision-makers to understand coastal behavior by monitoring the coastal dynamic and using that information to evaluate their decisions.

Acknowledgments

This research was founded by Fondazione Flaminia (Ravenna, Italy) via the RIGED-Ra project. The work was performed inside the Joint Laboratory on Coastal Evolution between UFRGS and UNIBO. We are grateful to ENI-IT for providing the Angelina wave data and SAL-Engineering. We would like to thank the anonymous reviewers.

References:

- Agisoft PhotoScan, 2013. *User Manual: Professional Edition*; Version 0.9.1; AgiSoft LLC: Petersburg, Russia. pp., 65.
- Andrews, B., Gares, P., Colby, J., 2002. Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology* 48, pp. 289-308.
- Antonellini, M., Mollema, P., Giambastiani, B., Bishop, K., Caruso, L., Minchio, A., Pellegrini, L., Sabia, M., Ulazzi, E., Gabbianelli, G., 2008. Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy. *Hydrogeology Journal* 16, pp. 1541-1556.
-

-
- Archetti, R., Zanuttigh, B., 2010. Integrated monitoring of the hydro-morphodynamics of a beach protected by low crested detached breakwaters. *Coastal Engineering* 57, pp. 879-891.
- Armaroli, C., Ciavola, P., 2011. Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification. *Geomorphology* 126, pp. 201-216.
- Armaroli, C., Ciavola, P., Perini, L., Calabrese, L., Lorito, S., Valentini, A., Masina, M., 2012. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology* 143-144, pp. 34-51.
- Armaroli, C., Grottole, E., Harley, M.D., Ciavola, P., 2013. Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology* 199, pp. 22-35.
- Arpa Emilia-Romagna, 2011. Le mareggiate e gli impatti sulla costa in emilia-romagna 1946-2010, pp. 144 (*in italian*).
- Bondesan, M., Castiglioni, G.B., Elmi, C., Gabbianelli, G., Marocco, R., Pirazzoli, P.A., Tomasin, A., 1995. Coastal areas at risk from storm surges and sea-level rise in northeastern Italy. *Journal of Coastal Research*. 11, pp. 1354-1379.
- Brown, D.G., Arbogast, A.F., 1999. Digital photogrammetric change analysis as applied to active coastal dunes in Michigan. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65, 467-474.
- Buono, F., Soriani, S., Camuffo, M., Tonino, M., Bordin, A., 2015. The difficult road to Integrated Coastal Zone Management implementation in Italy: Evidences from the Italian North Adriatic Regions. *Ocean & Coastal Management* 114, pp. 21-31.
- Carrasco, A.R., Ferreira, O., Matias, A., Freire, P., 2012. Natural and human-induced coastal dynamics at back-back barrier beach. *Geomorphology* 159 -160, pp. 30-36
- Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Mucerino, L., Casella, M., Cusati, L.A, Vacchi, M., Ferrari, M., Firpo, M., 2014. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 149, pp. 160-167.
- Catto, N., 2002. Anthropogenic pressures on coastal dunes, southwestern Newfoundland. *The Canadian Geographer* 46, pp. 17-32.
- Cencini, C., 1998. Physical Processes and Human Activities in the Evolution of the Po Delta, Italy. *Journal of Coastal Research*, 14(3), pp. 774-793.
- Davidson, M.A., Aarninkhof, S.G.J., Van Koningsveld, M., Holman, R.A., 2006. Developing coastal video monitoring systems in support of coastal zone management. *Journal of Coastal Research*, SI 39, pp. 49-56.
- Dissanayake, P., Brown, J., Karunarathna, H., 2014. Modelling storm-induced beach/dune evolution: Sefton coast, Liverpool Bay, UK. *Marine Geology* 357, pp. 225-242.
- ENAC, 2013. Regolamento – Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto Edizione n° 1 del 16.12.2013, pp. 21 (*national regulation, in Italian*).
- Fabbri, S., 2015. Geomorphological and statistical analysis on Ravenna dune fields changes, based on Terrestrial Laser Technology. University of Bologna, Bologna, Italy, pp. 233 (*PhD Thesis*).
- Gambolati, G., Giunta, G., Putti, M., Teatini, P., Tomasi, L., Betti, I., Morelli, M., Berlamont, J., De Backer, K., Decouttere, C., Monbaliu, J., Yu, C.S., Breker, I., Kristenser, E.D, Elfrink, B., Dante, A., Gonella, M., 1998. Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and Natural and Anthropic Land Subsidence. In: CENAS. Kluwer Academic (Ed.), Dordrecht, The Netherlands, pp. 1-34.
- Gambolati, G., Teatini, P., Tomasi, L., 1999. Coastline regression of the Romagna region, Italy, due to natural and anthropogenic land subsidence and sea level rise. *Water Resources Research* 35 (1), pp. 163-184.
- Gardelli, M., Caleffi, S., Ciavola, P., 2007. Evoluzione morfodinamica della foce del torrente Bevano. *Studi Costieri* 13, pp. 55-76 (*in Italian with English abstract*).
- Gares, P.A., Wang, Y., White, S.A., 2006. Using LIDAR to monitor a beach nourishment project at Wrightsville Beach, North Carolina, USA. *Journal of Coastal Research*, 22(5), pp. 1206-1219.
- Gonçalves, J. A., Henriques, R., 2015. UAV photogrammetric for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing* 104, pp. 101-111.
- Gormsen, E., 1997. The impact of tourism on coastal areas. *GeoJournal* 42, pp. 39-54.
- Harley, M.D., Ciavola, P., 2013. Managing local coastal inundation risk using real-time forecasts and artificial dune placements. *Coastal Engineering* 77, pp. 77-90.
-

-
- Helsenfeld, P., Jungerius, P.D., Klijn, J.A., 2008. European coastal dunes: ecological values, threats, opportunities and policy development. In: Martinez, M., Psuty, N. (Eds.), *Ecological Studies* 1 (171), Coastal Dunes, pp. 335-351.
- Hesp, P.A., 2002. Foredune and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48, pp. 245-248.
- Houser, C., Wernette, P., Rentschlar, E., Jones, H., Hammond, B., Trimble, S., 2015. Post-storm beach and dune recovery: Implications for barrier island resilience. *Geomorphology* 234, pp. 54-63.
- Kindermann, G., Gormally, M.J., 2013. Stakeholder perceptions of recreational and management impacts on protected coastal dune systems: A comparison of three European countries. *Land Use Policy* 31, pp. 472-485.
- Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., 1999. Assessment of coastal vulnerability to climate change. *Ambio* 28 (2), pp. 182-187.
- Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., Mimura, N., 1999. "Coastal Adaptation to Climate Change: Can the IPCC Technical Guidelines be applied?" *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 4, pp. 51-64.
- Lambert, A., Zanuttigh, B., 2005. An integrated approach to beach management in Lido di Dante, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 62, pp. 441-451.
- Larson, M., Kraus, N.C., 1995. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales. *Marine Geology* 126, pp. 111-127.
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., Gabbianelli, G., 2013. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sens.* 5, pp. 6880-6898.
- Martinelli, L., Zanuttigh, B., De Nigris, N., Preti, M., 2011. Sand bag barriers for coastal protection along the Emilia Romagna littoral, Northern Adriatic Sea, Italy. *Geotextiles and Geomembranes* 29, pp. 370-380.
- Perini, L., Calabrese, L., Cibir, U., Lorito, S., Luciani, P., 2007. Il Sistema Informativo della Costa e i prodotti cartografici di supporto agli studi e alle strategie di difesa. In *Ambienti e Territorio* 127, pp. 71-88 (*in Italian*).
- Psuty, N.P., 1988. Sediment budget and beach/dune interaction, in: N.P. Psuty (Ed), *Dune/Beach Interaction*. *Journal of Coastal Research Special Issue No. 3*, pp. 1-4.
- Regione Emilia-Romagna, 2010. Per la sicurezza del territorio 2007/2009, pp 41 (*technical report, in Italian*).
- Richter, A., Faust, D., Maas, H.-G., 2013. Dune cliff erosion and beach width change at the northern and southern spits of Sylt detected with multi-temporal Lidar. *Catena* 103, pp. 103-111.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G.M., Gelfenbaum, G., Voigt, B., 2005. Seasonal to interannual morphodynamics along a high-energy dissipative littoral cell. *Journal of Coastal Research*, 21(3), pp. 553-578.
- SAL Engineering, 2015. Relazione finale relativa ai rilievi geometrici tridimensionali per mezzo di fotogrammetria aerea sulle zone oggetto di studio. pp. 11 (*technical report, in Italian*).
- Saye, S.E., Van Der Wal, D., Pye, K., Blott, S.J., 2005. Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology* 72, pp. 128-155.
- Sherman, D.J. and Bauer, B.O., 1993. Dynamics of beach-dune interaction. *Progress in Physical Geography* 17, pp. 413-447.
- Sherman, D.J., 1995. Problems of scale in the modeling and interpretation of coastal dunes. *Marine Geology* 124, pp. 339-349.
- Signell, R.P., Chiggiato, J., Horstmann, J., Doyle, J.D., Pullen, J., Askari, F., 2010. High-resolution mapping of Bora winds in the northern Adriatic Sea using Synthetic Aperture Radar. *Journal of Geophysical Research* 115, C04020, pp. 20.
- Snavely, N., Seitz, S., Szeliski, R., 2007. Modeling the world from the internet photo collections. *Int. J. Comput. Vision* 80(2), pp. 189-210.
- Stive, M., Aarninkhof, A., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K., Nicholls, R., Capobianco, M., 2002. Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering* 47, pp. 211-235.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., Sallenger, A. H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), pp. 573-588.
-

-
- Taborda, R., Silva, A., 2012. COSMOS: A lightweight coastal video monitoring system. *Computer & Geosciences* 49, pp. 248-255.
- Taramelli, A., Di Matteo, L., Ciavola, P., Guadagnano, F., Tolomei, C., 2014a. Temporal evolution of patterns and processes related to subsidence of the coastal area surrounding the Bevano River mouth (Northern Adriatic) – Italy. *Ocean & Coastal Management*, pp. 1-15.
- Taramelli, A., Valentini, E., Cornacchia, L., Mandrone, S., Monbaliu, J., Hoggart, S.P.G., Thompson, R.C., Zanuttigh, B., 2014b. Modeling uncertainty in estuarine system by means of combined approach of optical and radar remote sensing. *Coastal Engineering* 87, pp. 77-96.
- Tătui, F., Vespremeanu-Stroe, A., Preoteasa, L., 2013. The correlated behavior of sandbars and foredunes on a nontidal coast (Danube Delta, Romania) *in*: Conley, D.C., Masselinck, G., Russell, P.E., O'Hare, T.J. (eds.) *Proceedings 12th International Coastal Symposium* (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 1874-1879.
- UNEP, 1995. *Guidelines for Integrated Management of Coastal and Marine Areas*. UNEP Regional Seas Reports and Studies 161, pp. 80.
- USAID, 2009. *Adapting To Coastal Climate Change A Guidebook For Development Planners*, pp 148.
- Varela-González, M., González-Jorge, H., Riveiro, B., Arias P., 2013. Performance testing of LiDAR exploitation software. *Computers & Geosciences* 54, pp. 122-129.
- Vicinanza, D., Ciavola, P., Biagi S., 2009. Field experiment to control coastline subsidence: a unique case study at Lido Adriano (Italy). *Journal of Coastal Research*, pp. 1105-1109.
- VV. AA., 2009. *Foce Bevano: l'area naturale protetta e l'intervento di salvaguardia*. Servizio Difesa del Suolo della Costa e Bonifica, regione, Emilia-Romagna. pp. 110 (*in Italian*).
- Woodroffe, C.D., 2007. The natural resilience of coastal systems: primary concepts. *In*: L. McFadden, E. Penning-Rowsell, R.J. Nicholls (Eds.), *Managing Coastal Vulnerability*, Elsevier, Amsterdam (2007), pp. 45-60.
- World Bank, 1993. *Guidelines for Integrated Coastal Zone Management*. J. C. Post and C. G. Lundin (editors), *Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs Series* 9, pp. 16.
-

Capítulo 4

**NATURAL AND ANTHROPOGENIC COASTAL SYSTEM COMPARISON USING
DSM FROM A LOW COST UAV SURVEY (CAPÃO NOVO, RS/BRAZIL)**



giovedì 14/01/2016 00:45
David M. Kennedy <davidmk@unimelb.edu.au>
ICS2016-Paper ACCEPTANCE-1547

Para Frederico Scarelli
Cc ics2016.secretariat@sydney.edu.au

Mensagem jcr_copyright_form_pdf.pdf (35 KB)

Dear Frederico,

Thank you for submitting your revised paper. I have now reviewed it and I am pleased to inform you that it is **accepted and ready for publication** in the Special Issue of the Journal of Coastal Research. If you haven't done so already, please send your copyright transfer agreement to ics2016.secretariat@sydney.edu.au, I have attached a copy of the form to this email. We would like to thank you for your contribution and for complying with formatting and deadlines.

Also, if you haven't already, please complete your registration at <http://ics2016.org/registration/> to ensure the publication of your paper.

We are looking forward to seeing you in Sydney in March!

Best wishes,
David

A/Prof David M. Kennedy
School of Geography
The University of Melbourne
Parkville, Vic, 3010
Australia

ph 61+3+83449168
fax 61+3+93494218



giovedì 14/01/2016 00:45

David M. Kennedy <davidmk@unimelb.edu.au>
ICS2016-Paper ACCEPTANCE-1547

Para Frederico Scarelli

Cc ics2016.secretariat@sydney.edu.au

Periódicos Qualis

Dados para Consulta

*Evento de Classificação:

Qualis 2014 ▼

Área de Avaliação

GEOCIÊNCIAS ▼

ISSN:

0749-0208

Título:

Classificação:

-- SELECIONE -- ▼

Consultar

Cancelar

Periódicos

ISSN	Título	Área de Avaliação	Classificação
0749-0208	Journal of Coastal Research	GEOCIÊNCIAS	B2

Natural and Anthropogenic coastal system comparison using DSM from a low cost UAV survey (Capão Novo, RS/Brazil)



Frederico M. Scarelli^{‡††}, Luigi Cantelli[†], Eduardo G. Barboza^{††}, Maria Luiza C.C. Rosa^{††}, and Giovani Gabbianelli[†]

[‡] Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, RS, Brasil.

[†] BiGeA, Università di Bologna, Ravenna, Italy.

^{††} CECO, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Porto Alegre, RS, Brasil.



ABSTRACT

Scarelli, F.M.; Cantelli, L.; Barboza, E.G.; Rosa, M.L.C.C.; and Gabbianelli, G., 2016. Natural and Anthropogenic coastal system comparison using DSM from a low cost UAV survey (Capão Novo, RS/Brazil). In: Vila-Concejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium* (Sydney, Australia). *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 75, pp. XX-XX, ISSN 0749-0208.

www.JCRonline.org

In many cases, the unplanned urbanization processes are the main factor that cause the crisis in the coastal environment, decreasing the coastal system resilience. This paper compare the differences between the anthropogenic and natural coastal zone, based on the morphological dune reconstruction, using a low cost UAV (unmanned aerial vehicle) survey and the photogrammetric reconstruction method. The study area is in the Northern Littoral of Rio Grande do Sul State, where are present a dune field with few man-changes, adjacent an anthropogenic zone with high changes on the beach/dune system, which has a contrast in the beach/dune system between these two zones. By photogrammetric reconstruction method, were possible obtain a high-resolution DSM (Digital Surface Model) and a high-resolution othophoto to analyse the morphology differences. The characterization of the natural and the anthropogenic zone and the knowledge obtained from this work are important to understand the local coastal system behaviour. The data acquired are important to aid the coastal managers and decision makers to have a high-resolution data to apply in the local Integrated Coastal Zone Management. Moreover this work propose a low coast method to obtain a high-resolution data in the coastal zones, and a tool for the researches group and local authorities, with good cost-benefit, to acquire more information, increase the local database and to monitor the coastal environment.

ADDITIONAL INDEX WORDS: *ICZM; coastal morphology; coastal zone; photogrammetry.*

INTRODUCTION

To increase knowledge about coastal environmental behavior and to apply integrated coastal zone management (ICZM), it is essential to know about the pressures on the system and the interaction between the anthropogenic and natural factors (Psuty, 1988; Sherman and Bouer, 1993; Hesp, 2002; Carrasco *et al.*, 2012). This knowledge aids coastal managers in improving their choices about coastal actions including better coastal resources management, decreasing the vulnerability and the hazards in the coastal zone and attending to stakeholders interests, which is a fundamental point in ICZM actions (Kindermann, and Gormally, 2013). To acquire more information and to monitor the coastal environment, local authorities need a better cost-benefit tool to obtain data on natural factors as the impact of the storm-surges on the coast, and by anthropogenic pressure factors as the coastal urban zone expands (Andrews *et al.*, 2002; Lambert and Zanuttigh, 2005; Davidson *et al.*, 2006; Tătui *et al.*, 2013).

This work proposes a methodology to acquire high-resolution Digital Surface Models (DSM) and ortho-rectified images (orthophotos) in the coastal environment (Mancini *et al.*, 2013) using a low cost and easy to operate unmanned aerial vehicle (UAV). Moreover, these data may be used in several disciplines, as engineering, urban planning, biological, geological and environmental science, archaeology and others (Gares *et al.*, 2006).

The study aims to investigate the morphology and the interaction between natural and anthropogenic features of a dune/beach system on a Brazilian coastal region, using aerial photos obtained from a UAV survey (Casella *et al.*, 2014; Gonçalves and Henriques, 2015).

In this work we have done a qualitative analysis since the main aim is to propose the methodology to acquire environmental data at a low cost. In the region where this study was conducted, many features are present that may increase the vulnerability and the risks in the coastal zone such as small creeks, which are washouts through the foredunes and beach named “sangradouros”, according to

Figueiredo and Calliari, (2005). These are mainly pluvial water drainage channels that are about 0.8 m deep. These features may be observed along the entire Rio Grande do Sul (RS) coast and are mainly present in the urbanized stretches. These washouts represent a high coastal hazard, because in many cases the beaches are trafficked by cars and the washouts are hidden, causing severe accidents. In addition, due to the foredune fragmentation the sediment transport from dune and beach to the surf zone, mainly during storms, may create a sediment deficit, increasing the coastal erosion. Finally, this work offers a good coast-benefit tool for local authorities to increase the investments in the local ICZM and in the coastal urbanization planning, since many of the coastal settlements grow without an urban plan (Esteves *et al.*, 2003).

Background

The study area is in Capão Novo, a beach settlement in the Northern littoral stretch of Rio Grande Do Sul (RS), the southernmost state of Brazil (Fig. 1). The RS coast is approximately 620 km length, has a gentle undulating barrier coast with a NE-SW orientation, and is characterized by a barrier-lagoon depositional system formed by sea level changes during the Quaternary (Villwock *et al.*, 1986; Dillenburg *et al.*, 2009). The coast is classified as dissipative and intermediate beaches; the beaches area about 60 m in width (Gruber *et al.*, 2006), and have a microtidal regime with a semidiurnal tide with a mean of 0.5 m. It is a wave dominated coast and the sediment supply is by littoral drift that is northward. The barrier deposits are dominated by quartz sand from very fine to medium; the dominant winds are from NE during spring and summer, and from SW during autumn and winter (from April to July). The latter are responsible for the stronger storm surges (Dillenburg and Barboza, 2014). The average significant wave height is 1.5 m, and during storms the sea level may surge up to 1.3 m at the coast (Barletta and Calliari, 2001; Calliari *et al.*, 1998).



Figure 1: Study area in North Littoral of RS. The red polygon is the UAV survey area.

The study area is located in a mildly concave part of the coast in a regressive stretch of the barrier that was covered by transgressive dunefields during the barrier progradation (Dillenburg *et al.*, 2009; Barboza *et al.*, 2011 and 2013). In this stretch, the reduction and dispersion of wave energy resulted in a positive balance for the sediment budget, however, the anthropogenic activities and an unplanned development (Esteves *et al.*, 2003) increased the vulnerability along the coast. The foredunes have been subject to an urbanization process with sidewalks built directly above the dunes and beachfront properties and sand mining, that affected the local sand balance (Dillenburg *et al.*, 2004). Capão Novo and near settlements represent the most developed and urbanized beaches in this stretch, principally by holiday houses that are engaged during the summer season. The beaches were classified as developed and mainly eroding beaches by Esteves *et al.*, (2003). This study focuses on a

600 m stretch which includes a part of a dune in an urbanized zone and a part of dune in an adjacent non urbanized zone, with a washout in between.

METHODS

To do a high-accuracy analysis of the stretch under study a low coast UAV was used to obtain a high-resolution DSM and orthophoto from a photogrammetric reconstruction method (Mancini *et al.*, 2013). The flight was done in the final part of the summer season (mid-march) when the beach presented a summer profile. To collect the aerial photographs a DJI Phantom quadcopter was utilized, a smaller commercial UAV costing about USD\$1,000. The advantages of this UAV are that it has an easy flight system platform allowing a safe control and operability and costs much more less than a professional UAV. The DJI Phantom UAV has an integrated GPS Positioning Module as

± 0.8 m vertical and ± 2.5 m horizontal accuracy, a Controlled Automatic Return to Home; an Intelligent Flight Battery; a 3-Axis Camera Stabilization; a 14 Megapixel HD camera, which has a FOV (field of view) 140° f/2.8 focus at ∞ , with real-time Camera Preview on IOS and Android Device Application. A smartphone integrated with the the UAV Remote Controller is required to control the camera. The survey took about one hour, and was done in three flights in the entire stretch, flying at three different heights, ~ 16 , ~ 30 , and ~ 5 m above the washout to increase data resolution. The flight speed was ~ 1.5 m/s; and 689 photos were acquired, shot perpendicular to the ground, with about 80% overlap between the aerial photos to allow the creation of the DSM in Agisoft Photoscan software. The UAV flight was coupled with a Global Navigation Satellite System (GNSS) eTrex[®]30-Garmin with barometric altimeter and with the local topographic chart. The flight track acquired was used to insert a geotag in all the photos using BaseCamp[™]. For high-accuracy that allows one to use the model for a quantitative and future comparative analyses 36 Ground Control Points (GCPs) were used and georeferenced by Differential Global Navigation Satellite System (DGNSS) using a Trimble[®] ProXRT GNSS in UTM-WGS84-22S. These used in Agisoft as monument points in coded targets. Due to the FOV wide-angle camera on the UAV, a customized calibration profile to recover planarity in the potos was used, and this calibration allow us to obtain a higher accuracy orthophoto. Using a Structure from Motion (SfM) approach (Snavely et al., 2007) by Agisoft Photoscan Professional Edition algorithms workflow (Agisoft, 2013), after photo alignment and GCPs the following was accomplished: i) point cloud; ii) the dense cloud, where the model was cleaned, deleting the outlier points and persons or other objects; iii) a mesh was built; and iv) the texture. After this workflow the model has been exported into a DSM in ascii format and an orthophoto in tiff extension,

allowing the data to be imported into a Geographic Information System (GIS) software.

RESULTS AND DISCUSSION

This survey allow us to obtain a DSM with a 0.3 m cell resolution and an orthophoto with a pixel size of 0.05 m. The orthophoto was draped on the DSM to improve this analysis, allowing us to identify the features in the area, such as the vegetation density. In this model the features without interest were not eliminated such as the people, cars or trees, because these elements may indicate the survey quality. Based on the model results (Fig. 2) it is possible to recognize clear differences between the natural and urbanized areas:

In the urbanized area (Fig. 2E and 2F): the dune is very fragmented, the blowouts are visible, the anthropogenic pressure is very high with a walkway above the dune, and behind the dune facilities for vacationers are present. In addition, a -controlled washout is present, which removes sediments from the foreshore/backshore and carries them to the surf zone, decreasing the dune resilience. Since according to Tomazelli *et al.* (2008) most of the sediment to the natural system nourishment of the dune system in the Northern Littoral of RS comes from the backshore/foreshore, that are transported by the NE wind. In the natural area (Fig. 2C and 2D), an active dune field is present, with vegetation that increases in density inland. The sediment availability for the system equilibrium due to the seasonal beach profile changes is clearly higher and the washout is bigger than in the urbanized area and without human driven changes. Actually this area present the same morphological characteristic of the zone in 1948 where it is possible to identify the dune fields with a NE orientation but without anthropomorphic pressures.

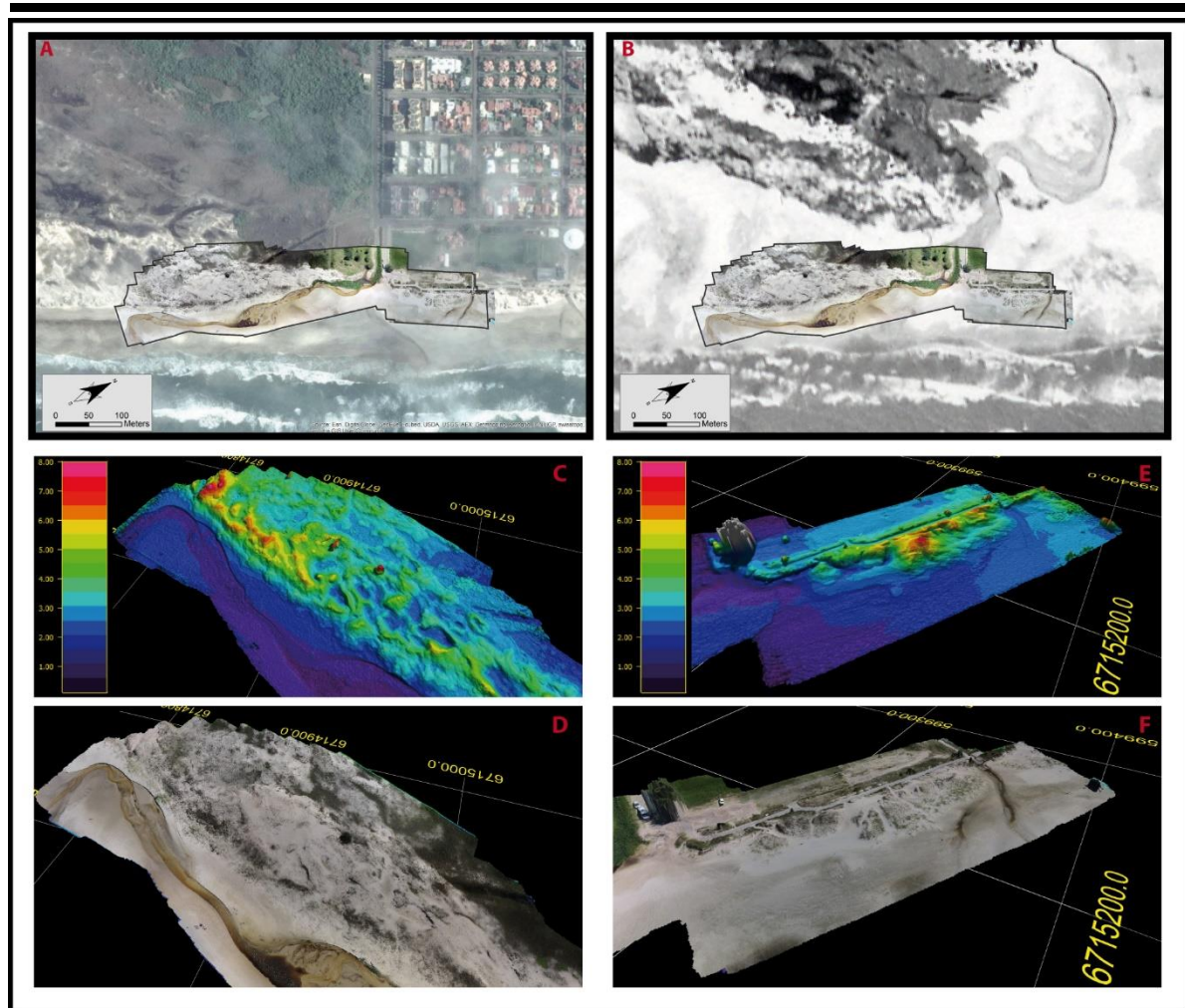


Figure 2: Results from the UAV survey: A) the orthophoto overlapping the World Imagery from ArcGIS Online data; B) the orthophoto overlapping the aerial photo from 1948; C) DSM in the natural area; D) orthophoto draped on the DSM in the natural area; E) DSM in the anthropogenic area; F) orthophoto draped on the DSM in the anthropogenic area

This survey has disadvantages and advantages, which are necessary to discuss to increase the potential of the method in future work. The disadvantages are the time to realize the workflow on Agisoft, mainly to obtain high-resolution data; a powerful computer is necessary; the cost of the GNSS equipment to do the GCPs survey with high accuracy; in the surveys where water and features in movement are present, there may be some gaps because, e.g. the vegetation is moved by wind, and the softwares are unable to do point matching between the photos; for a quantitative analysis of the volumetric changes with high accuracy, the vegetation cover may be a problem because it interferes in producing accurate results; the weather is another limiting factor because the Dji Phantom cannot fly in wind speeds above ~ 18 km/h winds. The advantages are the price to acquire high-resolution data if compared to

the other UAV's or Lidar surveys that may be able to provide the same data accuracy; the facility to operate the UAV with high security; the logistics are simpler allowing a quick organization for the surveys after an interesting event such as a storm appears; easily repeatability of the data to increase the database and to aid coastal monitoring; the data may be used in different disciplines for scientific work as well for management work.

CONCLUSIONS

Using a low cost UAV, it has been possible to conduct a first high-accuracy DSM to study the coastal environment in the coast of RS. This has allowed us to investigate the factors that act in this zone and to understand in a detailed scale the environmental response to the urbanized areas. The results obtained from the aerial photographic survey are of great quality,

which is ± 0.13 m accuracy, and in accordance with other works (Mancini *et al.*, 2013; Casella *et al.*, 2014; Gonçalves and Henriques, 2015) where the same survey methodology was used using a SfM approach with a professional camera. Actually others surveys are programmed to monitor changes along the RS coast and to continue this study a survey after the winter season (September) will be carried out to monitor and quantify the seasonal changes. Moreover, this work provides a low cost methodology to aid the local authorities acquire high-resolution data in their area of interest and to improve the management and knowledge about the environment responses to natural and human pressures. In many cases, mainly in developing countries such as Brazil, the local authorities do not have funds to create a simple database to aid decision-makers in their actions, and this work and UAV provides a low cost alternative to support both scientific research or the local authorities.

ACKNOWLEDGMENTS

This study has been done through the Joint Laboratory on Coastal Evolution between UFRGS and UNIBO; funded by Fondazione Flaminia (Italy) via project RIGED-RA; and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Brazil) via project n° 307856/2013-5. We are grateful for PPGGEO/IGEO/UFRGS and for all students who participated in the survey.

LITERATURE CITED

- Agisoft PhotoScan, 2013. *User Manual: Professional Edition*; Version 0.9.1; AgiSoft LLC: Petersburg, Russia
- Andrews B.; Gares P., and Colby J., 2002. Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology*, 48, 289-308.
- Barboza, E.G.; Rosa, M.L.C.C.; Hesp, P.A.; Dillenburg, S.R.; Tomazelli, L.J., and Ayup-Zouain, R.N., 2011. Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) - a new approach with GPR data. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 646-650.
- Barboza, E.G.; Rosa, M.L.C.C.; Dillenburg, S.R., and Tomazelli, L.J., 2013. Preservation potential of foredunes in the stratigraphic record. *Journal of Coastal Research*, SI 65, 1265-1270.
- Barletta, R.C. and Calliari, L.J., 2001. Determinação da intensidade das tempestades que atuam no litoral do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 28(2), 117-124.
- Calliari, L.J.; Tozzi, H.A.M., and Klein A.H. F., 1998. Beach Morphology and Coastline Erosion Associated with Storm Surges in Southern Brazil- Rio Grande to Chuí, RS. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, 70, 231-247.
- Casella, E.; Rovere, A.; Pedroncini, A.; Mucerino, L.; Casella, M.; Cusati, L.A.; Vacchi, M.; Ferrari, M., and Firpo, M., 2014. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 149, 160-167.
- Carrasco, A.R.; Ferreira, O.; Matias, A., and Freire, P., 2012. Natural and human-induced coastal dynamics at back-back barrier beach. *Geomorphology*, 159 -160, 30-36.
- Davidson, M.A.; Aarninkhof, S.G.J.; Van Koningsveld, M., and Holman, R.A., 2006. Developing coastal video monitoring systems in support of coastal zone management. *Journal of Coastal Research*, SI 39, 49-56.
- Dillenburg, S.R. and Barboza, E.G., 2014. The Dip and Strike-Fed Sandy Coast of Southern Brazil. In: Martini, I.P. and Wanless H.R. (eds.). *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*, *Geological Society, London*, Special Publications 388, 333-352.
- Dillenburg, S.R.; Esteves, L.S., and Tomazelli, L.J., 2004. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76(3), 611-623.
- Dillenburg, S.R.; Barboza, E.G.; Tomazelli, L.J.; Hesp, P.A.; Clerot, L.C.P., and Ayup-Zouain, R.N., 2009. The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: Dillenburg, S.R. and Hesp, P.A. (eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil. Lecture Notes in Earth Sciences*, 107, 53-91.
- Esteves, L.S.; Silva, A.R.P.; Arejano, T.B.; Pivel, M.A.G., and Vranjac, M.P., 2003. Coastal development and human impacts along the Rio Grande do Sul beaches, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 35, 548-556.

-
- Figueiredo, S.A. and Calliari, L.J., 2005. Sangradouros: Distribuição Espacial, Variação Sazonal, Padrões Morfológicos e Implicação no Gerenciamento Costeiro. *Gravel*, 3, 47-57.
- Gares, P.A.; Wang, Y., and White, S.A., 2006. Using LIDAR to monitor a beach nourishment project at Wrightsville Beach, North Carolina, USA. *Journal of Coastal Research*, 22(5), 1206-1219.
- Gonçalves, J.A. and Henriques, R., 2015. UAV photogrammetric for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*, 104, 101-111.
- Gruber, N.L.S.; Toldo, E.E.; Barboza, E.G.; Nicolodi, J.L., and Ayup-Zouain, R.N., 2006. A shoreface morphodynamic zonation and the equilibrium profile variability on the northern coastline of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 39, 504-508.
- Hesp P.A., 2002. Foredune and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48, 245-248.
- Kindermann, G. and Gormally, M.J., 2013. Stakeholder perceptions of recreational and management impacts on protected coastal dune systems: A comparison of three European countries. *Land Use Policy*, 31, 472-485.
- Mancini, F.; Dubbini, M.; Gattelli, M.; Stecchi, F.; Fabbri, S., and Gabbianelli, G., 2013. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sensing*, 5, 6880-6898.
- Psuty, N.P., 1988. Sediment budget and beach/dune interaction, in: N.P. Psuty (Ed), Dune/Beach Interaction. *Journal of Coastal Research*, SI 3, 1-4.
- Sherman, D.J. and Bauer, B.O., 1993. Dynamics of beach-dune interaction. *Progress in Physical Geography*, 17, 413-447.
- Snavely, N.; Seitz, S., and Szeliski, R., 2007. Modeling the world from the internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210.
- Tătui, F.; Vespremeanu-Stroe, A., and Preoteasa, L., 2013. The correlated behavior of sandbars and foredunes on a nontidal coast (Danube Delta, Romania). *Journal of Coastal Research*, SI 65, 1874-1879.
- Tomazelli, L.J.; Dillenburg, S.R.; Barboza, E.G., and Rosa, M.L.C.C., 2008. Geomorfologia e Potencial de Preservação dos Campos de Dunas Transgressivos de Cidreira e Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Pesquisas em Geociências*, 35(2), 47-55.
- Villwock, J.A.; Tomazelli, L.J.; Loss, E.L.; Dehnhardt, E.A.; Horn, N.O.; Bachi, F.A., and Dehnhardt, B.A., 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (Ed.), *Quaternary of the South America and Antarctic Peninsula*, 4, 79-97.
-

Capítulo 5

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 – Integração das escalas em análise

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e discutidos nos capítulos anteriores, foi possível integrar as escalas temporais nas quais foram feitos os estudos nas duas localidades.

Tal integração foi elaborada para disponibilizar as informações sobre o comportamento da dinâmica do sistema costeiro a longo prazo (Holoceno tardio) e a curto prazo (sazonal). As informações obtidas a partir desses estudos contribuem para o planejamento nas questões de uso e ocupação das zonas costeiras, fornecendo também um embasamento técnico para auxiliar os tomadores de decisões no âmbito da GIZC. Essa integração de escalas proposta neste trabalho é uma questão chave para uma efetiva aplicação da GIZC (Buono *et al.*, 2015; Montanari *et al.*, 2014).

5.1.1- Integração dos dados de Capão Novo

Para a área de Capão Novo, as informações sobre a evolução costeira no Holoceno tardio foram adquiridas através dos trabalhos desenvolvidos no litoral norte da PCRS. Foram utilizados os primeiros trabalhos desenvolvidos na área através da correlação cronoestratigráfica e o mapeamento geológico (Figura 2, no capítulo 1.1.2) (Tomazelli *et al.*, 2005; Villwock & Tomazelli, 1995), junto com os trabalhos dos estudos em subsuperfície utilizando o GPR, que permitiram a elaboração de um modelo da evolução costeira local em alta resolução (Barboza *et al.*, 2011; Dillenburg *et al.*, 2009; Rosa, 2012).

A partir dos trabalhos já realizados na área, foi possível conhecer o comportamento a longo prazo da linha de costa e as características do território onde se encontra o balneário de Capão Novo. De acordo com os estudos recentes, o território se encontra dentro de um embaiamento da PCRS e apresenta um andamento regressivo. Os dados obtidos com o GPR na zona mostram uma clara progradação do sistema em direção do oceano (Barboza *et al.*, 2011; Dillenburg & Barboza, 2014).

No caso da barreira holocênica de Curumim (Figura 1), aproximadamente 6 km ao norte de Capão Novo, a qual apresenta o mesmo comportamento da barreira onde se encontra o balneário em estudo (Dillenburg *et al.*, 2009), a barreira

regressiva progradou 4,7 km desde os últimos 8-7 ka B.P. (Dillenburg & Barboza, 2014).

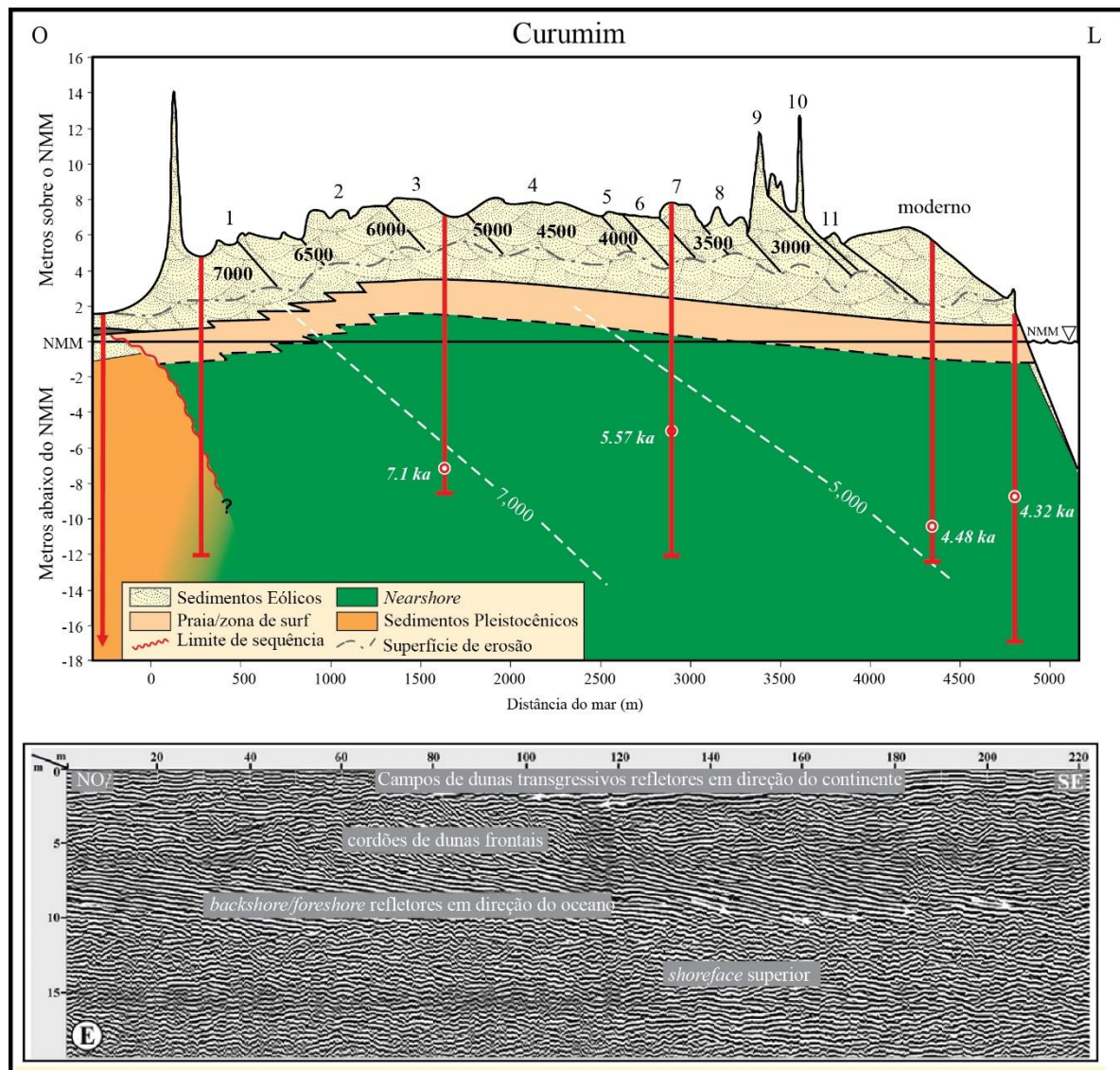


Figura 1: Acima, modelo estratigráfico com a reconstrução evolutiva da barreira de Curumim (modificado de Dillenburg & Barboza, 2014); abaixo, perfil GPR com as radar facies identificadas e os refletoras indicando a progradação no sentido no oceano (modificado de Barboza *et al.*, 2011).

Considerando as informações obtidas através da pesquisa bibliográfica sobre a área (*ver capítulo 1.1.2*), foi possível obter o modelo evolutivo recente do território para uma escala temporal holocênica, a qual define com clareza o comportamento da área de estudo no Holoceno.

Assim, é possível afirmar que a região onde se encontra o balneário de Capão Novo apresenta um comportamento regressivo e a mesma foi urbanizada sobre uma extensa barreira arenosa. Dessa forma, analisando a suscetibilidade do sistema

costeiro e a vulnerabilidade do balneário, esse estaria menos suscetível e menos vulnerável aos problemas de erosão e de déficit sedimentar devido aos fatores naturais, aumentando a resiliência do sistema.

Em relação a situação do sistema costeiro em estudo em uma escala temporal mais recente, dados já existentes em bibliografias foram integrados ao MDS e a ortofoto de alta resolução, obtidos a partir do levantamento com o VANT, para auxiliar no entendimento da situação atual do sistema.

De acordo com Esteves (2004), de 1970 até os anos 2000, na zona de Arroio Teixeira (aproximadamente 4 km ao norte de Capão Novo), a linha de costa vem apresentando uma progradação em direção ao oceano de 3 m/ano, caracterizando-a como uma área atualmente em regressão.

Através da comparação entre a foto aérea de 1948 e uma imagem de satélite atual (Figura 2) da região onde, atualmente, se encontra o balneário de Capão Novo, é possível observar o desaparecimento de um campo de dunas transgressivo, o qual era não vegetado e possuía dunas barcanas, que se desenvolveram sobre depósitos eólicos, formados por fases de dunas transgressivas, paralelos a linha de costa (Hesp *et al.*, 2005, 2007)

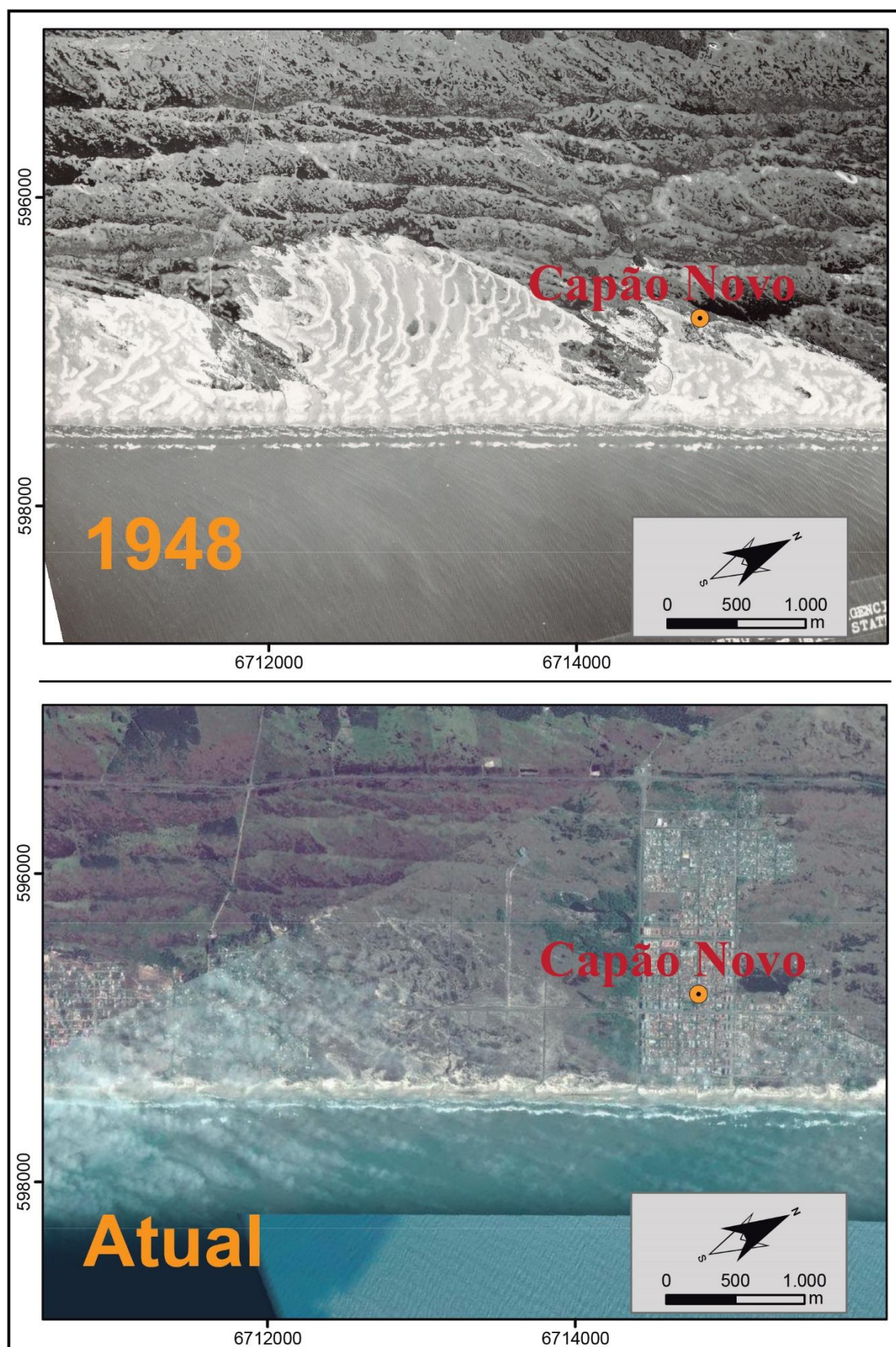


Figura 2: Acima, foto aérea de 1948 mostrando o campo de dunas sem antropização na área de Capão Novo; abaixo, foto atual a partir do Google Earth mostrando a antropização da zona.

Essa comparação mostra que o processo de urbanização no litoral norte do RS tem sido o principal fator de impacto sobre os sistemas costeiros da região, de forma direta e indireta, causando também a extinção dos campos de dunas (Tomazelli *et al.*, 2008). Muitas vezes, o mau planejamento territorial das áreas costeiras tem agravado essa situação (Esteves *et al.*, 2003).

Para entender com mais detalhes a tendência atual da área em estudo, onde, no caso do RS, os estudos sobre a evolução costeira local e os dados em bibliografia mostram que o fator antrópico é o principal elemento a colocar em crise o sistema costeiro, em março de 2015 foram adquiridos MDSs e ortofotos de alta resolução, através da fotogrametria aérea, utilizando um VANT de baixo custo, trabalho inédito na área (artigo apresentado no capítulo 4).

As ortofotos restituídas através do levantamento fotogramétrico, permitiram analisar, por exemplo, o nível de antropização da área natural (Figura 3A), na qual se nota um campo de dunas pouco antropizado e a presença de um sangradouro bem desenvolvido, sem o controle do homem. Já na área urbanizada (Figura 3B), adjacente a área natural, é possível notar uma situação diferente, com uma duna fragmentada, com vários pontos de erosão, pouco vegetada e a presença de elementos antrópicos, como o calçadão e uma zona altamente modificada atrás da duna.

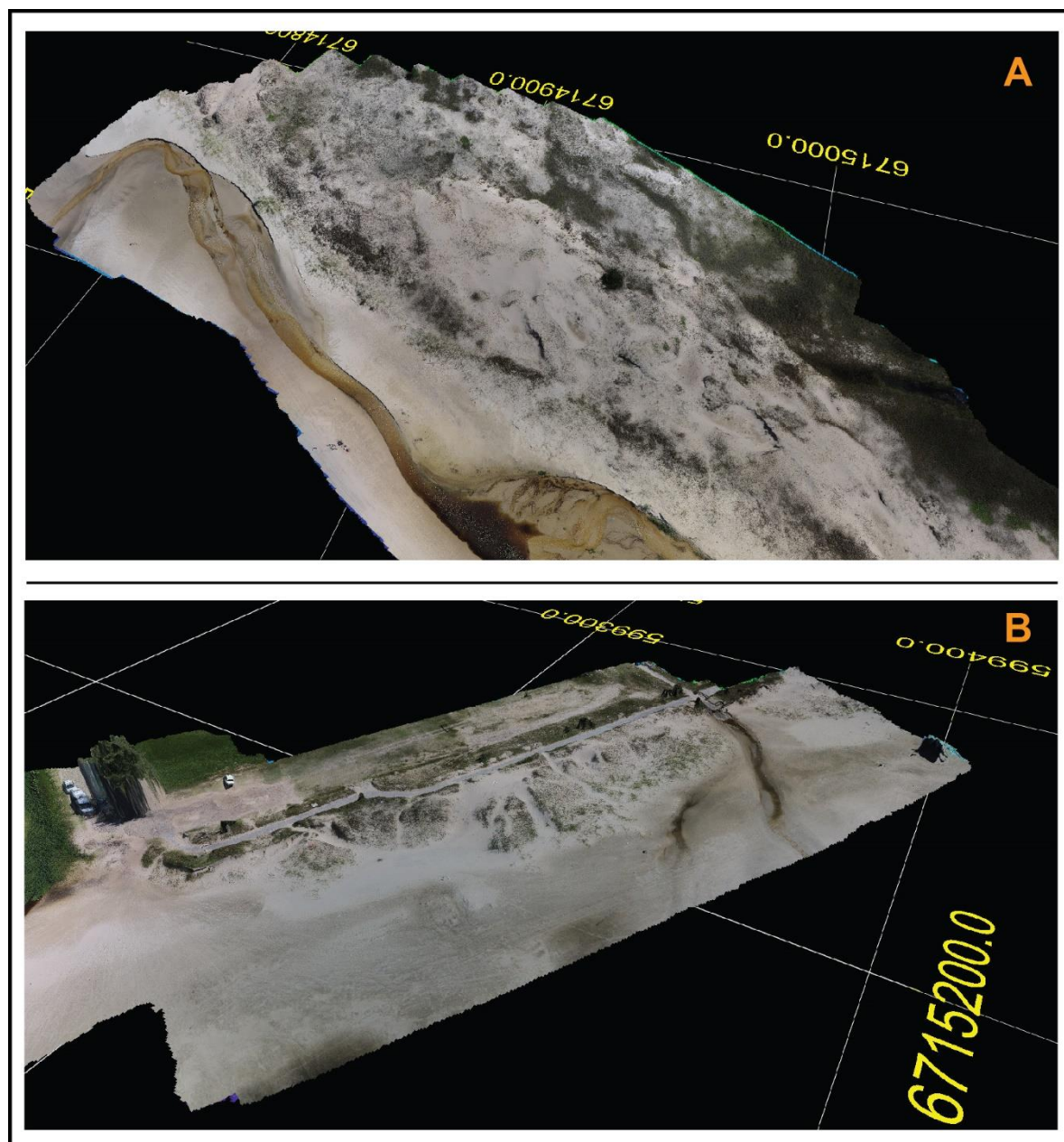


Figura 3: (A) Ortofoto em alta resolução, obtida através do levantamento feito com VANT, na área não urbanizada adjacente a Capão Novo; (B) ortofoto em alta resolução obtida na parte urbanizada de Capão Novo.

Já os MDSs serviram como suporte para a obtenção de dados topográficos de alta resolução. Na Figura 4A é possível notar a topografia do campo de dunas, com a ausência de *blowout*, principalmente na parte frontal da duna, e a erosão da praia por parte do sangradouro. Observando o MDS na área urbana (Figura 4B), o dado mostra claramente o processo erosivo sobre a duna, com a presença de setores de deflação (*blowout*) e mais uma vez a presença de elementos antrópicos, como, por exemplo, as trilhas sobre a duna frontal e a presença de um calçadão construído sobre a mesma.

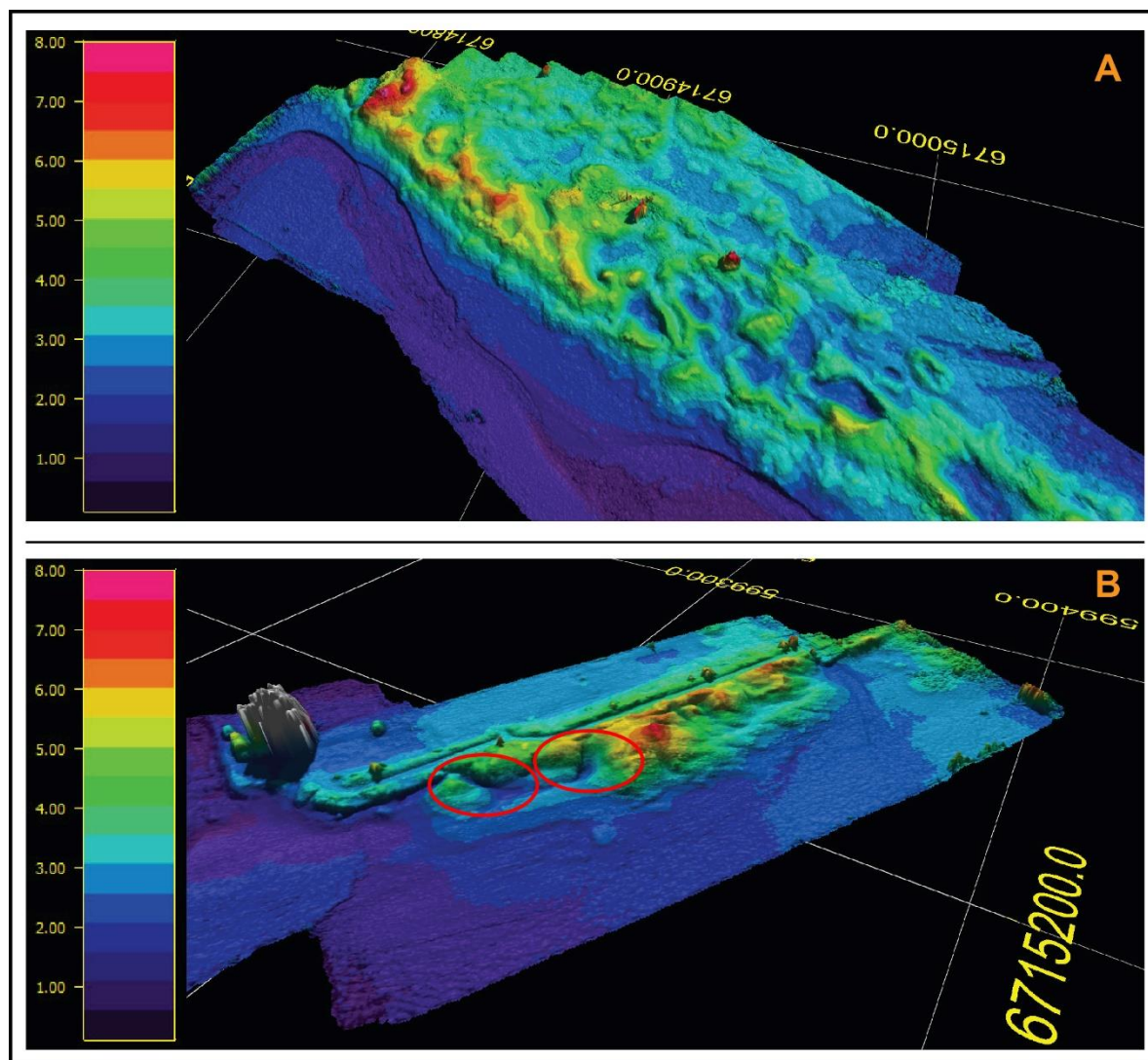


Figura 4: (A) MDS em alta resolução obtido através do levantamento feito com VANT na área não urbanizada adjacente a Capão Novo; (B) MDS em alta resolução obtido na parte urbanizada de Capão Novo, em destaque os *blowouts*.

Comparando os dados obtidos através da fotogrametria, é possível observar a suscetibilidade da duna na área urbana e também a vulnerabilidade do local, visto que a destruição das dunas causará danos diretos nas estruturas antrópicas. Além de demonstrar que o fator antrópico é o componente principal a colocar em crise o sistema costeiro.

Diferentemente dos dados apresentados para a área de Ravenna, esses foram dados inéditos adquiridos no Litoral Norte do RS. Devido a inexistência de um banco de dados consistente, é impossível fazer uma análise quantitativa, como, por exemplo, a diferença de volume em diferentes períodos, como mostrado no capítulo 3. Esse levantamento é o primeiro passo para a criação desse banco de dados, o

qual é fundamental para as pesquisas envolvendo o sistema costeiro e também para ser utilizado pelas autoridades locais como subsídio nas tomadas de decisões.

Assim, a fim de diminuir a suscetibilidade e a vulnerabilidade do sistema costeiro e, conseqüentemente, evitar perdas econômicas, sociais e ambientais, as principais ações devem ser voltadas para os processos que agem no sistema a curto prazo. Uma atenção particular deve ser dada ao planejamento territorial urbano, dirigindo as ações para os processos de recuperação das dunas e das praias, através dos planos de gestão e programas de monitoramento local.

Em frente ao crescimento desordenado de muitos balneários no passado, alguns municípios do litoral norte do RS já estão solicitando um plano de manejo, como é o caso do município de Xangri-Lá (Gruber, 2005; Gruber *et al.*, 2008), e aplicando a GIZC para evitar danos futuros, com ações que incluem : i) a construção de galerias fluviais para conter o transporte de areia das dunas para a praia submersa (Tabajara & Weschenfelder, 2011), evitando assim a erosão das dunas e o déficit negativo de sedimento na praia emersa; e ii) a recuperação das dunas frontais (Portz, 2012).

5.1.2- Integração dos dados de Ravenna

Em relação aos dados utilizados na área costeira de Ravenna, este trabalho apresentou a primeira reconstrução do modelo da evolução costeira local utilizando dados de subsuperfície em 2D (*ver capítulo 2*), utilizando o GPR e aplicando o intercâmbio de conhecimentos dos estudos feitos na PCRS. Os trabalhos anteriores, os quais estudavam a evolução costeira local, utilizavam, principalmente, dados em 1D, obtidos através de furos de sondagem e penetrometria. Os mesmos serviram como base conceitual e de conhecimento para a aplicação do novo método.

O modelo elaborado nesta Tese ainda carece principalmente de datações para uma reconstrução ainda mais acurada da região. Porém, o resultado obtido é um primeiro passo para aumentar o conhecimento sobre a região e para incentivar a utilização de métodos atuais para a pesquisa ligada a Geologia Costeira e contribuir ainda mais com o banco de dados existente.

Juntamente com a cartografia histórica, foi possível analisar qualitativamente as mudanças morfológicas da linha de costa e na região, seja por parte do homem ou de fatores naturais, nos últimos quatro séculos. Combinando a cartografia histórica e dados obtidos de trabalhos anteriores, foi possível propor o modelo

geológico de superfície da planície costeira de Ravenna, sem as modificações feitas pelo homem (*ver capítulo 2*).

A importância desse modelo proposto se dá pelo fato que a planície costeira de Ravenna é uma região sob forte influência do homem, que o transformou para seu próprio benefício. Até hoje, essa região necessita de uma gestão integrada para reduzir sua suscetibilidade e vulnerabilidade, no entanto, a mesma possui um alto custo econômico, o qual é arcado pela região Emilia-Romagna e municípios.

Devido a essas fortes mudanças, muitos indicadores morfológicos para a reconstrução da gênese da área foram cancelados. Em muitos casos, a falta desses indicadores faz com que a região não seja vista como realmente ela seria. Isso implica uma falta de conhecimento sobre a zona ao se desenvolver as diretrizes para a gestão e planificação do território, aumentando assim a vulnerabilidade da área e, conseqüentemente, os custos econômicos.

O modelo apresentado na Figura 5 foi elaborado para mostrar a gênese da região, auxiliando assim as pesquisas futuras e as ações ligadas a Gestão Integrada das Zonas Costeiras. Com os resultados obtidos, pode-se afirmar que, diferentemente do sistema barreira-laguna presente em Capão Novo, o sistema costeiro de Ravenna é formado por uma barreira antiga e um sistema barreira-laguna atual, formado nos últimos quatro séculos e esses são controlados principalmente pelas variações climáticas causada pela LIA.

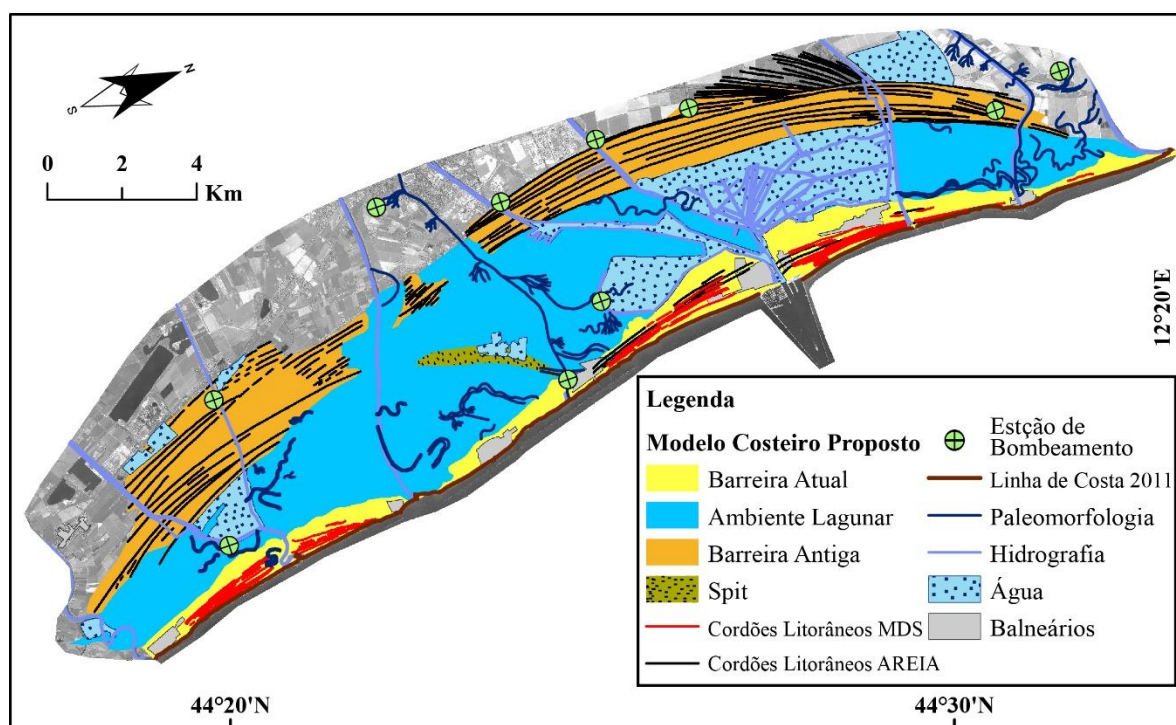


Figura 5: Modelo geológico de superfície construído para representar a geologia superficial na área costeira de Ravenna, com os cordões identificados e a paleomorfologia da área, sem a intervenção humana no território.

A barreira atual, onde se encontra a maior parte dos balneários, foi formada pela erosão dos deltas existentes na área e com o retrabalhamento dos sedimentos por parte das ações das ondas, dinâmica já descrita em bibliografia nos trabalhos anteriores (Carbognin & Tosi, 2002; Marabini & Veggiani, 1992; Simeoni & Cobau, 2009). Através dessa dinâmica, formou-se uma barreira arenosa estreita, onde os corpos de água presentes entre as barreiras foram recuperados com a intervenção do homem, principalmente para a instalação de campos agrícolas.

Esse modelo se propôs também a atualizar a cartografia geológica em escala 1:50.000 da área, onde foram mapeados cordões litorâneos, os quais poderiam levar a entender que na área existia uma planície de cordões litorâneos regressivos que formaram a barreira atual. O modelo proposto, junto com dados de trabalhos anteriores, demonstra que essa não é uma barreira regressiva, e sim uma barreira construída pelo retrabalhamento dos sedimentos por parte das ondas, como já afirmado.

Diferentemente dos estudos ligados a evolução geológica recente na área de Ravenna, os estudos que descrevem a situação atual do sistema são abundantes. Esses estudos, provenientes de trabalhos científicos e relatórios técnicos, são elaborados em diversas áreas do conhecimento e por diversos órgãos ligados à

região, aos municípios e a grupos de pesquisa, produzindo uma rica base bibliográfica.

Por parte da Região Emilia-Romagna e do município de Ravenna, existe um vasto data-base em Web-GIS, com cartografia interativa e acesso livre, no qual, em alguns casos, os dados podem ser descarregados livremente, contendo a cartografia dos parques e das zonas sob tutela da região, a cartografia geológica e do solo, o sistema informativo do mar e da costa, o sistema informativo territorial, entre outros (Provincia di Ravenna, 2015; Regione Emilia-Romagna, 2013).

Junto ao banco de dados mencionado, os trabalhos realizados na área e citados nesta Tese (*capítulo 1.1.3 e capítulo 3*), contribuem ainda mais para um melhor entendimento da situação atual do sistema costeiro de Ravenna. Isso permitiu uma melhor análise da situação atual, possibilitando inclusive a quantificação desse andamento atual através da comparação sazonal das modificações no sistema costeiro.

O trabalho apresentado no capítulo 3, no qual foram utilizadas novas tecnologias através dos levantamentos feitos com VANTs, serviu como base para as considerações feitas sobre a situação atual, ao comparar e quantificar as transformações do sistema costeiro no período entre setembro de 2014 e abril de 2015 (Figura 6). No trabalho ficaram claras as modificações causadas pelo homem na região e a vulnerabilidade do sistema atual em relação aos fatores naturais.

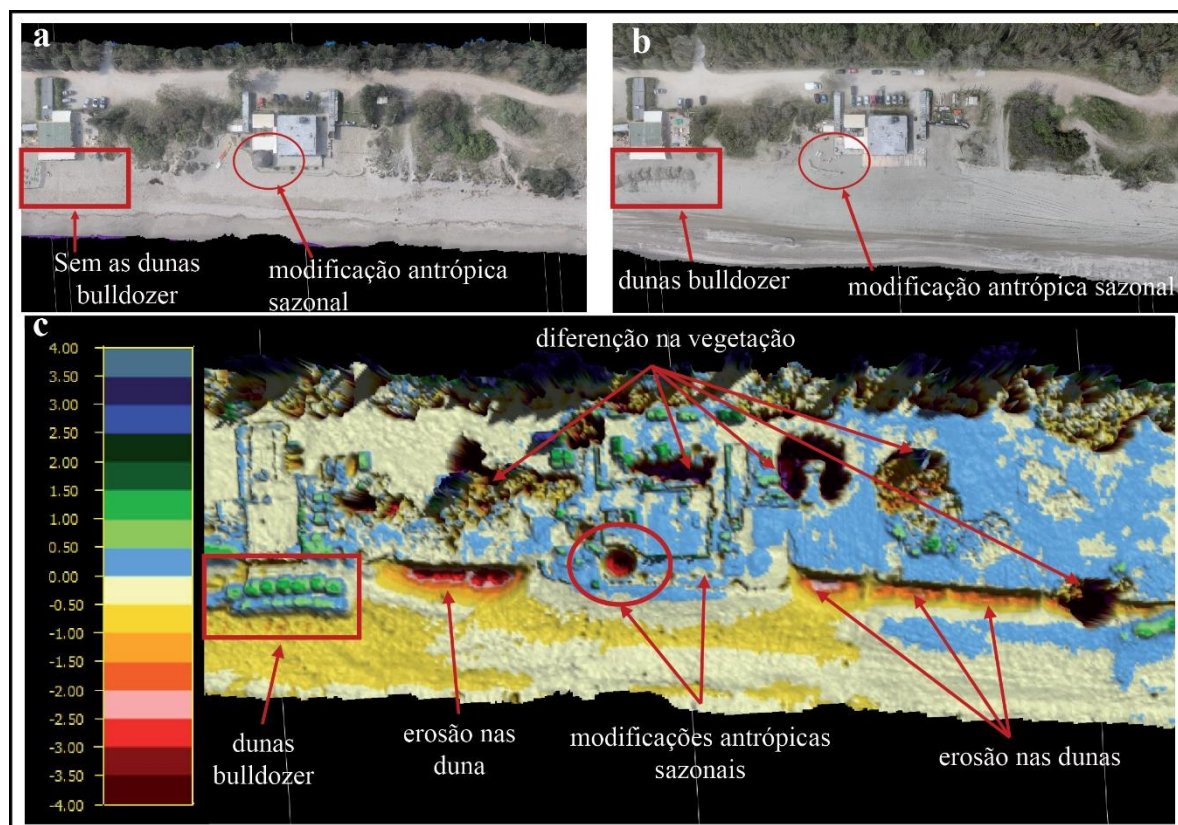


Figura 6: Comparação sazonal mostrando as modificações devido as ações do homem e fatores naturais no período de setembro de 2014 e abril de 2015. (a) Detalhe do levantamento utilizando VANT feito em 2014; (b) detalhe do levantamento com VANT feito em 2015; (c) detalhe da diferença de superfície entre 2014 e 2015.

Segundo os estudos na área, atualmente, a costa de Ravenna possui uma tendência erosiva (Armaroli *et al.*, 2012; Gambolati *et al.*, 1998; Harley & Ciavola, 2013), a qual requer uma efetiva aplicação do planejamento territorial e aplicação da GIZC na área para reduzir ao máximo seja a vulnerabilidade da zona, devido aos balneários e áreas agrícolas presentes, seja a suscetibilidade do sistema exposto a fatores naturais e antrópicos.

Desde os anos 70 até os dias de hoje, a área vem recebendo diversas obras de proteção costeira para conter os danos provocados, principalmente pela erosão. Essas obras incluem barreiras fixas, transversais e paralelas a linha de praia, dunas *bulldozer*, construídas durante o inverno, para proteger as estruturas fixas presentes na praia contra os danos causados pelas tempestades, e, ultimamente, um método muito utilizado e que, segundo os estudos da região, fornece os melhores resultados, o engordamento de praia, o qual, porém, requer um alto investimento econômico.

Os perfis topográficos obtidos nos trechos levantados com os VANTs mostram com clareza a situação atual da área e as atenções que a mesma necessita (no anexo 2 estão presentes os perfis topográficos do capítulo 3 com a localização em cada trecho levantado).

Analisando de forma conjunta os resultados obtidos a partir do modelo evolutivo, a análise das modificações sazonais e os dados bibliográficos, é possível entender com maior clareza o comportamento e a ocupação atual do território em estudo. O modelo geológico de superfície (Figura 7) mostra que os balneários da costa se encontram todos sobre a barreira arenosa mais recente, formada pela erosão na foz dos rios da região.

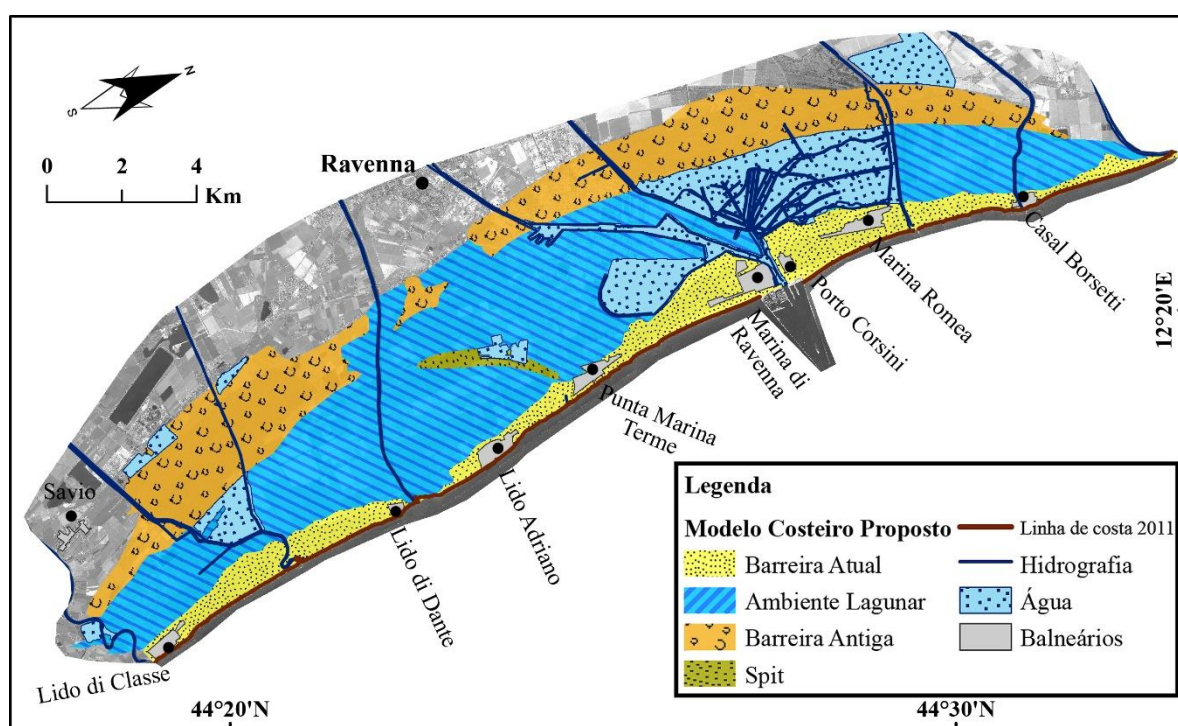


Figura 7: Modelo geológico utilizado para auxiliar nas ações ligadas a GIZC local, mostrando a presença dos balneários sobre a barreira arenosa atual.

A região possui uma barreira estreita que, em zonas como entre os balneários de Lido di Dante e Lido Adriano e na área de Casal Borsetti, é quase inexistente devido a erosão. Atrás dessa barreira arenosa, existe um ambiente lagunar, recuperado e mantido emerso pelo homem, com uma topografia que, na maior parte da área, não supera os 0,5 m, onde a barreira arenosa com sua topografia, que chega até os 5 m, serve como única proteção contra a intrusão do mar nas áreas agrícolas.

Junto a esse fator, observado a partir da reconstrução da evolução recente da zona, se integram os dados obtidos dos relatórios técnicos da região Emilia-Romagna, indicando: i) a diminuição do aporte sedimentário útil por parte dos rios, que ocasiona a diminuição do engordamento natural da costa; ii) a intensa antropização do território; e iii) o andamento erosivo atual (Regione Emilia-Romagna, 2011a).

Já os conhecimentos obtidos no capítulo 3, demonstram não só as intensas modificações por parte do homem, que ocorrem todos os anos na área, mas também como a ocupação ocorrida na barreira atual está vulnerável aos fatores naturais como, por exemplo, as tempestades de inverno que ocorrem na área. Ou seja, para manter essa zona ocupada e diminuir os riscos econômicos, sociais e ambientais do território, é necessário um alto investimento das autoridades locais; esse investimento, entre 2006 e 2009, foi de 7,8 milhões de euros, sendo 2,2 milhões de euros somente para costa de Ravenna (Regione Emilia-Romagna, 2010). Isso justifica ainda mais a necessidade de conhecer o sistema na sua forma mais complexa, desde a sua formação até seu comportamento atual.

5.2 –Escala integradas na GIZC

A partir dos estudos sobre a evolução costeira das áreas de estudo, foi possível entender a morfologia atual do território. Essa é definida principalmente pela morfologia antecedente existente na região e pelas variações climáticas de grande porte ocorridas durante o Holoceno, que agem principalmente modificando o balanço sedimentário do sistema (Dillenburg *et al.*, 2000; Oost *et al.*, 2012), como as glaciações no caso do Brasil e a LIA no caso da Itália.

Já os estudos sobre o comportamento dos sistemas costeiros utilizando uma escala temporal de menor duração, demonstraram o comportamento do sistema atualmente, mostrando o andamento atual e os principais elementos de pressão no sistema, seja por fatores antrópicos ou por fatores naturais. Esses estudos são capazes de dar indicações para as ações de gestão e manutenção imediata do sistema, a fim de diminuir a sua suscetibilidade e vulnerabilidade, consequentemente aumentando a resiliência do sistema.

Porém, os estudos através da escala a curto prazo não dão indicadores para as medidas a serem tomadas para a GIZC a longo prazo, as quais procuram reestabelecer a dinâmica natural do sistema costeiro (Oost *et al.*, 2012) e, com isso,

diminuir, não somente a vulnerabilidade e suscetibilidade, mas também os gastos para a manutenção do território. Isto proporciona o uso sustentável das zonas costeiras com um apropriado plano de gestão que envolva todas as partes interessadas.

A partir dos resultados, foi possível fazer considerações para as duas áreas objeto de estudo deste trabalho, demonstrando a utilidade de estudar os sistemas barreira-laguna em diferentes escalas.

5.2.1 – *Capão Novo*

No caso de Capão Novo, pode-se concluir que, devido as suas características evolutivas e geomorfológicas, esse é um sistema barreira-laguna com uma maior resiliência, se considerados os processos erosivos, os quais acarretam altos custos para contê-lo. Essa maior resiliência ocorre devido ao fato de o sistema se encontrar em progradação desde o último máximo transgressivo, com um grande aporte de sedimentos que contribui para a manutenção natural do sistema.

Diferentemente de outras localidades ao longo da costa da PCRS, onde foram identificadas áreas em retrogradação (Dillenburg *et al.*, 2009), como é o caso da região onde se encontra o Farol da Conceição, a qual se localiza em uma projeção da PCRS e que devido a sua configuração morfológica, vem sofrendo um forte processo de erosão, como se pode observar na Figura 8. Em relação à GIZC, caso haja ocupação nessas áreas, o planejamento e a gestão devem seguir medidas totalmente diferentes daquelas utilizadas nas áreas em progradação da PCRS.



Figura 8: Erosão costeira no Farol da Conceição no trecho transgressivo do Litoral Médio do RS. Foto de 1988 com o velho farol e a casa logo atrás; foto de 1997 com o velho farol destruído; foto de 1999 com a casa que se encontrava atrás do velho farol destruída (modificado da Toldo Jr. *et al.*, 2006).

No caso de ocupação em áreas como essas, se não considerados os estudos sobre a evolução recente do território, essas zonas iriam requerer altos investimentos econômicos para manutenção, reparação e medidas de prevenção. Evitando assim, casos como o verificado na região do balneário do Hermenegildo (Santa Vitória do Palmar) no Litoral Sul do RS, onde houve a ocupação desordenada sobre o sistema duna/praias e, hoje, esse representa um problema social e econômico alto para a zona, com fortes erosões nas estruturas presentes na área (Figura 9).



Figura 9: Problemas de erosão costeira na região do balneário do Hermenegildo (Santa Vitória do Palmar) no Litoral Sul do RS.

Em relação ao andamento atual, ficou claro que a crise nas praias e nas dunas da região ocorre, principalmente, devido à má ocupação e urbanização do território, aumentando a pressão sobre o sistema, como foi possível observar a partir da comparação entre as fotos aéreas e também pela reconstrução do MDS e ortofotos realizada em Capão Novo. Esses dados são importantes para o entendimento da situação do sistema e indispensáveis para uma ação local que tenha o efeito desejado com menor custo e maior efetividade das medidas definidas pelos tomadores de decisões (*decision-makers*).

Com isso, as precauções a serem tomadas para ocupação da área podem se concentrar na manutenção da dinâmica natural, através de uma diminuição da pressão sobre o sistema costeiro. Pode-se citar como exemplo, a aplicação de modelos de recuperação e gestão costeira já efetuados em diferentes municípios do litoral norte, que consideram, principalmente, a recuperação das dunas através de métodos que já demonstraram ter um bom resultado na região (Portz, 2012) (Figura

10). A canalização dos sangradouros evita a perda de sedimentos que são levados para a antepraia (Tabajara & Weschenfelder, 2011) (Figuras 10B e 10C).



Figura 10: Recuperação das dunas frontais no litoral norte do RS: A) início da recuperação das dunas frontais; B) acúmulo de sedimentos pelo transporte eólico; C) canalização dos sangradouros para evitar a erosão das dunas, D) recuperação das dunas sob a canalização (A e B modificado de Portz, 2012; C e D modificado de Tabajara & Weschenfelder, 2011).

Integrando os resultados nas escalas analisadas, recomenda-se que, para as ações futuras, seja considerada uma ocupação com menor pressão sobre o sistema costeiro, com construções mais distantes da duna frontal, proibindo, por exemplo, a ocupação em áreas nas quais a dinâmica seja muito ativa, como é o caso da praia emersa e das dunas frontais, e criando alternativas para evitar o trânsito de pessoas sobre as dunas através da construção de passarelas. É também indispensável o desenvolvimento e aplicação dos planos de manejo integrados, seguindo as diretrizes a nível nacional, regional e municipal, com monitoramento contínuo do sistema, evitando assim perdas futuras de natureza econômica, social e ambiental e mantendo alta a resiliência do sistema.

5.2.2 – Planície Costeira de Ravenna

A partir dos estudos efetuados na planície costeira de Ravenna, investigando as duas escalas temporais, pode-se concluir que, com base nos estudos sobre a

evolução recente deste sistema barreira-laguna, essa se encontra em uma situação muito mais crítica do que a observada em Capão Novo.

Nesse caso, a barreira atual não é uma barreira regressiva, e sim uma barreira formada pelas erosões da foz dos rios locais, mostrando que a contribuição do aporte sedimentar não era abundante para criar uma planície de cordões regressivos, sendo que o maior aporte aconteceu no início da LIA quando as costas eram dominadas por rios. Essa mesma barreira é mais suscetível e possui menor resiliência em comparação a uma barreira regressiva pelo fato de apresentar um sistema lagunar logo atrás e apresentar uma extensão de aproximadamente 800 m, no caso de Ravenna, contra cerca de 4000 m em Capão Novo. Essa estreita barreira passou a ser ocupada com uma intensa urbanização (Figuras 11A e 11B), o que gerou muitas modificações no território e o aumento da pressão sobre o sistema praia/duna, com a ocupação também das dunas frontais e da praia emersa com a instalação de balneários e estruturas fixas para atender a demanda de veraneio.

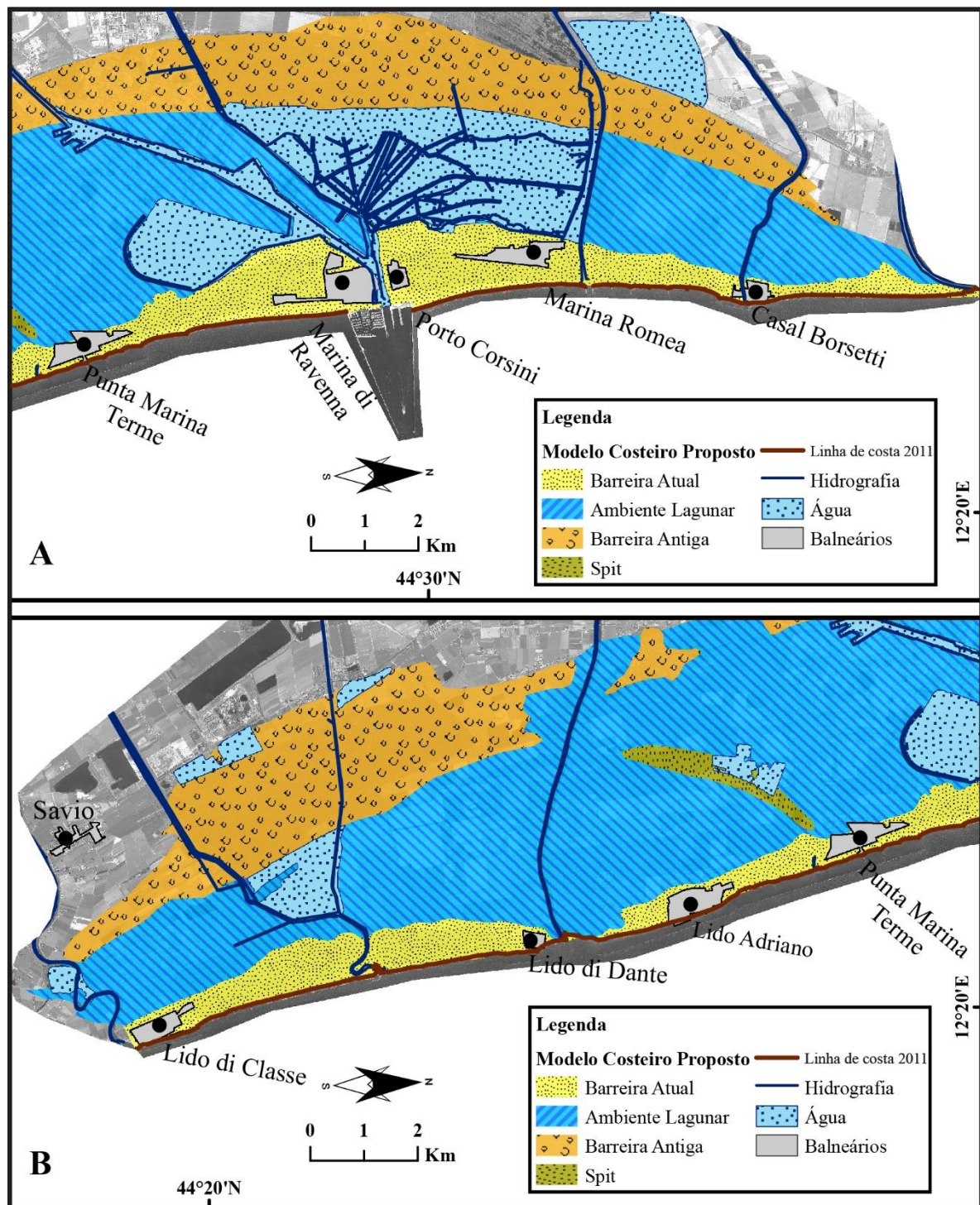


Figura 11: Detalhe da presença dos balneários sobre a barreira arenosa atual. A) Trecho norte da zona costeira de Ravenna; B) trecho sul da zona costeira de Ravenna.

Devido à forte pressão antrópica (urbanização, subsidência por exploração de fluidos e construção de barragens nos rios), aliada às pressões naturais locais (subsidência e tempestades de inverno), essa região passou a ser muito vulnerável (Figura 12). Conseqüentemente, para a manutenção da região, passaram a ser gastas cifras significativas a fim de evitar danos maiores.



Figura 12: A e B) Exemplos de obras costeiras na costa de Ravenna com molhes paralelos e transversais a costa; C e D) danos causados às estruturas fixas presentes na praia, causados por tempestades de inverno na costa de Ravenna.

Para conter os danos causados pelas ações dos fatores citados, as principais ações tomadas, a partir dos anos 80, foram a construção de obras para proteção costeira através de molhes emersos e submersos, paralelos e transversais a linha de costa. Ultimamente, a principal ação tomada é o engordamento das praias, sendo que as duas intervenções principais foram realizadas em 2002 e 2007 com um custo de aproximadamente 13 milhões de euros (Regione Emilia-Romagna, 2010).

Segundo estudos feitos pelo serviço geológico da Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, 2010), entre 1984 e 2007, foram utilizados $8,1 \times 10^5 \text{ m}^3$ de areia para o engordamento das praias. Considerando o preço da areia como sendo 13 euros/ m^3 , foram gastos aproximadamente 105 milhões de euros para a manutenção do litoral, sem considerar outros gastos como, por exemplo, o gasto para manter o sistema de drenagem do território. Esse valor demonstra a importância de uma efetiva aplicação da GIZC e de um plano de manejo apropriado para a zona, conhecendo ao máximo as variáveis que atuam no sistema local, através da análise atual do comportamento do sistema, justificando assim, a importância dos estudos feitos em uma escala de tempo menor.

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho sobre a área de Ravenna, pode-se concluir que essa área necessita de medidas mais severas em comparação àquelas propostas para Capão Novo, sendo um território pouco apropriado para a ocupação urbana, o qual requer um alto investimento para a sua manutenção. Hoje, as medidas apropriadas seriam a diminuição da expansão urbana juntamente com uma planificação territorial apropriada. Essas ações teriam que começar pelo fim das construções nas áreas vizinhas às dunas frontais e à praia emersa, prevendo, no futuro, a troca das estruturas fixas por estruturas removíveis, que sejam montadas durante o período de veraneio e retiradas antes do inverno. Uma vez diminuída a pressão dos fatores antrópicos na área, juntamente com os programas de manutenção da costa já existentes, será possível aplicar medidas para a recuperação das dunas na área com uma maior eficiência, seguindo casos de sucesso como os que foram realizados no litoral norte da PCRS.

Todas essas medidas têm como objetivo principal diminuir a vulnerabilidade do sistema e aumentar a sua resiliência. Isso reduzirá também gastos econômicos futuros para manter o sistema costeiro e compensar os danos causados nas esferas tanto social quanto ambiental e econômica e permitirá a o aproveitamento dos serviços oferecidos pelo sistema costeiro local de forma mais sustentável, evitando erros cometidos no passado.

5.3 – Conclusão

A partir desse trabalho, conclui-se que para sistemas do tipo barreira-laguna é necessário um estudo desde a gênese até o comportamento atual, do ponto de vista das características geomorfológicas da região. Essas características são a base para o desenvolvimento da parte biótica, com a qual existe uma interação direta e de extrema importância ao tratar-se da ocupação territorial por parte do homem.

A integração das escalas tratadas nesta Tese demonstra a chave para entender e conhecer os territórios costeiros. Essa permite uma análise apropriada de todo o sistema auxiliando no entendimento das ações dos fatores antrópicos e naturais sobre o sistema costeiro. Esta Tese propõe também o uso de geotecnologias com uma boa relação custo/benefício, seja para desenvolver trabalhos ligados à área acadêmica, seja para área de gestão territorial, já que um dos objetivos desta Tese foi utilizar métodos de fácil acesso e que podem ser operados e elaborados com conhecimentos básicos na área de atuação.

Os principais métodos que demonstraram ser inéditos nas áreas de estudo foram os levantamentos com GPR e VANTs. Esses foram integrados com os dados adquiridos a partir de bancos de dados já existentes e com informações adquiridas a partir de trabalhos já realizados, os quais são de extrema importância para a construção do modelo evolutivo costeiro e para o entendimento do comportamento atual do sistema. Foram integrados também os dados adquiridos a partir dos outros métodos de uso já consolidados para aplicação nos estudos das zonas costeiras e citados nos métodos utilizados para esse trabalho.

O GPR, que foi utilizado para a aquisição dos dados de subsuperfície em 2D para a construção do modelo da evolução costeira na planície de Ravenna, está apresentado no capítulo 2. Apesar do alto custo do equipamento, um modo para obter esses dados com um baixo custo no âmbito acadêmico, pode ser o compartilhamento do instrumento através de parcerias entre grupos de pesquisa que já possuam o instrumento e a experiência.

No caso de levantamentos com o GPR para o uso no âmbito da gestão costeira, visando a caracterização da subsuperfície em casos específicos, o instrumento pode ser alugado com diárias, amortizando os custos e considerando também a necessidade de especialistas para a interpretação dos dados elaborados. Geralmente, são necessários poucos dias para o levantamento dos dados, no exemplo de Ravenna foram necessários apenas três dias para todos os levantamentos.

No caso dos levantamentos com VANTs, o método proporcionou a obtenção de MDSs e ortofotos de alta resolução. Foram usados VANTs profissionais e de difícil operabilidade; o uso destes instrumentos permitiu a elaboração do trabalho apresentado no capítulo 3 desta Tese.

Neste trabalho também foi desenvolvido um novo método para obter os mesmos tipos de dados e com a mesma resolução, utilizando VANTs comerciais de baixo custo e com fácil operabilidade. Esse método e a sua utilização nos sistemas costeiros foi exposto no capítulo 4. Esses VANTs, como mostrado na Figura 12 (*capítulo 1*), têm como principal característica, além do baixo custo, a fácil operabilidade do instrumento.

Os métodos propostos obtiveram sucesso e permitiram adquirir os dados para a elaboração deste trabalho, permitindo testar e validar a hipótese de que “A

antropização nas zonas costeiras em estudo neste trabalho, modificou a morfologia e a dinâmica da costa, refletindo na sua resiliência, suscetibilidade e vulnerabilidade, se comparado com sistemas costeiros naturais”. Além de mostrar a utilidade deste trabalho dentro do GIZC em sistemas deposicionais do tipo barreira-laguna que se encontram em diferentes contextos geológicos.

Esta Tese se mostrou importante pelo fato de que, estudando os sistemas costeiros em diferentes escalas temporais, os conhecimentos obtidos auxiliam para determinar as ações a serem tomadas dentro da GIZC. Podem ser definidas, assim, diretrizes específicas para cada sistema costeiro, já que o comportamento desses sistemas depende muito do contexto no qual se encontram, variando em localidades diferentes, como foi mostrado ao longo deste trabalho.

Considerando, então, os dois sistemas barreiras-laguna estudados, é possível afirmar que, apesar de serem dois sistemas barreira-laguna muito similares, existe uma diferença na escala espacial, sendo que, na área do Brasil, todos os elementos morfológicos presentes no território são maiores que os elementos existentes na Itália. Essa diferença pode ser observada na morfologia desde a dimensão da bacia deposicional até o tamanho dos ambientes lagunares existentes. Porém, apesar dessa diferença, as duas áreas têm problemas análogos, quanto ao equilíbrio sedimentar do sistema costeiro devido a urbanização sem planejamento, esses causam danos sociais, econômicos e ambientais nas duas áreas como foi demonstrado nesta Tese.

Ampliando os resultados deste trabalho para outros sistemas costeiros do tipo barreira-laguna, pode-se afirmar que: a especificidade das ações para cada sistema deve ser determinada com base no estudo da evolução costeira local e do andamento atual, estudando também os fatores que determinaram a evolução do sistema e definem o comportamento atual do mesmo. Esses resultados validam a hipótese de que “Para uma gestão efetiva das zonas costeiras, a integração dos conhecimentos sobre a evolução recente do território com os conhecimentos do seu estado atual é um elemento fundamental na GIZC dos sistemas deposicionais do tipo barreira-laguna”. Somente depois de obter essas informações é possível elaborar um plano de gestão apropriado para cada zona e integrar os componentes bióticos e sociais para um planejamento territorial integrado.

Este trabalho mostrou não somente a importância de se entender o comportamento dos sistemas barreira-laguna, estudando o mesmo desde a sua gênese até o seu comportamento atual, devido aos fatores naturais e antrópicos que agem sobre as áreas de estudo; mas mostrou também métodos com adequado custo/benefício, para serem aplicados seja para o conhecimento e caracterização da área quando usado no âmbito acadêmico, seja para o auxiliar no entendimento do território e para programas de monitoramento por autoridades locais, fornecendo ainda mais informações para guiar a tomada de decisão pelos gestores e outros tomadores de decisões no âmbito costeiro.

Esta Tese descreve o pensamento do autor, que considera que a relação entre as escalas, tanto temporal quanto espacial, é de fundamental importância para os avanços na Gestão Integrada das Zonas Costeira, já que as escalas maiores determinam os limites e condicionam o desenvolvimento das escalas menores, através de uma hierarquia de escalas.

Mostrou-se também que a aplicação de novos instrumentos, no caso os VANTs e o GPR, integrada com os trabalhos já realizados, é a base para a evolução de qualquer ciência, ressaltando a importância de iniciar qualquer estudo científico a partir dos conceitos básicos da área na qual se está trabalhando, os quais devem ser aplicados através do raciocínio científico, para assim chegar aos resultados mais complexos com fundamentos teóricos.

Para concluir este trabalho, torna-se importante também citar os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste projeto de doutorado, o qual proporcionou um intercâmbio de conhecimento entre o Instituto de Geociências da UFRGS e o Departamento de Ciências Biológicas, Geológicas e Ambientais da UNIBO e a criação de um Laboratório Conjunto (*Joint Laboratory*) para estudos no âmbito Costeiro entre as instituições (<http://www.magazine.unibo.it/archivio/2014/10/06/alma-mater-e-universidade-federal-do-rio-grande-do-sul-insieme-per-la-ricerca>; <http://www.ufrgs.br/ufrgs/noticias/comitiva-da-universidade-de-bologna-visita-a-ufrgs>; último acesso 28/12/2015), feito citado como projeto de sucesso e que está funcionando com resultados concretos já obtidos e projetos futuros em andamento, apoiados não só pelas instituições mas também pelos municípios, no caso os municípios de Ravenna e Porto Alegre (<http://www.ravennatoday.it/cronaca/scienze->

ambientali-collaborazione-ravenna-porto-alegre-brasile.html; último acesso: 28/12/2015).

Foram levados novos métodos de pesquisa para a UNIBO, através do uso do GPR, com a realização de cursos de capacitação e saídas de campo; e para a UFRGS os novos métodos apresentados incluem a utilização dos VANTs na área costeira, também com cursos de capacitação e saídas de campo. Além disso, foram discutidas e intercambiadas as ações de GIZC nas duas áreas para uma evolução do conhecimento e assim obter uma melhor eficiência nas ações futuras ligadas as zonas costeiras, em específico as que se encontram em sistemas deposicionais do tipo barreira-laguna.

REFERÊNCIAS

- AGISOFT 2013. PhotoScan - User Manual: Professional Edition; Version 0.9.1; Software AgiSoft LLC: Petersburg, Russia, p. 65.
- AMOROSI, A. 1999. **Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio-223**. Foglio-223, Ravenna, p. 144.
- AMOROSI, A. & FARINA, M. 1995. Large-scale architecture of a thrust-related alluvial complex from subsurface data: the Quaternary succession of the Po Basin in the Bologna area (northern Italy), **Giornale di Geologia**, 57/1-2: 3-16.
- AMOROSI, A. & MARCHI, N. 1999. High-resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: an example from the late quaternary deposits of the SE Po Plain. **Sedimentary Geology**, 128: 69-83.
- AMOROSI, A.; BARBIERI, M.; CASTORINA, F.; COLALONGO, M.L.; PASINI, G. & VAIANI, S.C. 1998a. Sedimentology, micropaleontology, and strontium-isotope dating of a lower-middle Pleistocene marine succession ("Argille Azzurre") in the Romagna Apennines, northern Italy. **Bollettino della Società Geologica Italiana**, 117: 789-806.
- AMOROSI, A.; CAPORALE, L.; CIBIN, U.; COLALONGO, M.L.; PASINI, G.; RICCI LUCCHI, F.; SEVERI, P. & VAIANI, S.C. 1998b. The Pleistocene Littoral deposits (Imola Sands) of the northern Apennines foothills. **Giornale di Geologia**, 60: 83-118.
- AMOROSI, A.; CENTINEO, M.C.; COLALONGO, M.L.; PASINI, G.; SARTI, G. & VAIANI, S.C. 2003. Facies architecture and latest Pleistocene-Holocene depositional history of the Po Delta (Comacchio area), Italy. **Journal of Geology**, 111: 39-56.
- ANDREWS, B.; GARES, P. & COLBY, J. 2002. Techniques for GIS modelling of coastal dunes. **Geomorphology**, 48: 289-308.
- ANTONELLINI, M.; MOLLEMA, P.; GIAMBASTIANI, B.; BISHOP, K.; CARUSO, L.; MINCHIO, A.; PELLEGRINI, L.; SABIA, M.; ULAZZI, E. & GABBIANELLI, G. 2008. Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy. **Hydrogeology Journal**, 16: 1541-1556.
-

-
- AQUATER 1978. Interpretazione dei dati geofisici delle strutture plioceniche e Quaternarie della Pianura Padana e Veneta. Rapporto inedito per ENEL (GEOTENECO). GEOS/A A0153. San Loernzo in Campo, 31.08.1978. Relatório Técnico.
- ARMAROLI, C.; CIAVOLA, P.; PERINI, L.; CALABRESE, L.; LORITO, S.; VALENTINI, A. & MASINA, M. 2012. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. **Geomorphology**, 143-144: 34-51.
- BARBOZA, E.G. 1999. **Terraços da Margem Leste da Laguna dos Patos, Litoral Médio do Rio Grande do Sul: Estratigrafia e Evolução Holocênica**. Porto Alegre, 140p., Dissertação de Mestrado em Geociências. Instituto de Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/2865>>.
- BARBOZA, E.G.; DILLENBURG, S.R.; ROSA, M.L.C.C.; TOMAZELLI, L.J & HESP, P.A. 2009. Ground-penetrating radar profiles of two Holocene regressive barriers in southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, 56: 579-583.
- BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; DILLENBURG, S.R. & TOMAZELLI, L.J. 2010. The Holocene Coastal Barrier of Rio Grande do Sul (Southern Brazil): an Evaluation Based on GPR Data. In: The Meeting of Americas. Eos Trans. AGU, **Meet. Am. Suppl.**, 91: NS11A-03.
- BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; HESP, P.A.; DILLENBURG, S.R.; TOMAZELLI, L.J. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2011. Evolution of the Holocene coastal barrier of Pelotas Basin (southern Brazil) - a new approach with GPR data. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, 64: 646-650.
- BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; DILLENBURG, S.R. & TOMAZELLI, L.J. 2013. Preservation potential of foredunes in the stratigraphic record. **Journal of Coastal Research**, Special Issue 65: 1265-1270.
- BONDESAN, M. 1985. Quadro schematico dell'evoluzione geomorfologica olocenica del territorio compreso fra Adria e Ravenna. In: **Atti della Tavola Rotonda II Delta del Po**, 24 novembre, 1982, Bologna. Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna, p. 21-36.
-

-
- BONDESAN, M. 1989. Geomorphological Hazards in the Po Delta And Adjacent Areas. **Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria**. Supplemento II: 25-33.
- BONDESAN, M.; FAVERO, V. & VINALS, J. 1995. New evidence of the evolution of the Po-delta coastal plain during the Holocene. **Quaternary International**, 29-30: 105-110.
- BONETTI, J.; SERAFIM, M.B.; ABOUDHA, P. & WOODROFFE, C.D. 2015. Multicriteria indices for coastal susceptibility assessment: a comparative study of embayed Brazilian and Australian coasts. In: CoastGIS 2015 - The 12th International Symposium for GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management, 2015, Cape Town. **Proceedings**. Durban: CSRI, 2015.
- BOTHA, G.A.; BRISTOW, C.S.; PORAT, N.; DULLER, G.; ARMITAGE, S.J.; ROBERTS, H.M.; CLARKE, B.M.; KOTA, M.W. & SCHOEMAN, P. 2003. Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa. In: BRISTOW, C.S.; JOL, H.M. (Ed.). **Ground Penetrating Radar in Sediments**. The Geological Society, London, Special Publication, 211: 29-46.
- BRASIL 1988. LEI Nº 7.661, DE 16 DE MAIO DE 1988. **Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L7661.htm>. Acesso em: 08 de setembro de 2015.
- BRÁZDIL, R.; PFISTER, C.; WANNER, H.; VON STORCH, H. & LUTERBACHER, J. 2005. Historical Climatology in Europe - The State of the Art. **Climatic Change**, 70: 363-430.
- BRISTOW, C.S.; JONES, B.G.; NANSON, G.C.; HOLLANDS, C.; COLEMAN, M. & PRICE, D.M. 2007. GPR surveys of vegetated linear dune stratigraphy in central Australia: Evidence for linear dune extension with vertical and lateral accretion. In: BAKER, G.S.; JOL, H.M. (eds.). **Stratigraphic Analyses Using GPR**. The Geological Society of America, Colorado, Special Publication, 432: 19-34.
-

-
- BROWN, D.G. & ARBOGAST, A.F. 1999. Digital photogrammetric change analysis as applied to active coastal dunes in Michigan. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 65: 467-474.
- BRUNETTI, A.; DENÈFLE, M.; FONTUGNE, M.; HATTÉ, C. & PIRAZZOLI, P.A. 1998. Sea-level and subsidence data from a Late Holocene back-barrier lagoon (Valle Staudiana, Ravenna, Italy). **Marine Geology**, 150: 29-37.
- BUONO, F.; SORIANI, S.; CAMUFFO, M.; TONINO, M. & BORDIN, A. 2015. The difficult road to Integrated Coastal Zone Management implementation in Italy: Evidences from the Italian North Adriatic Regions. **Ocean & Coastal Management**, 114: 21-31.
- CARBOGNIN, L. & TOSI, L. 2002. Interaction between climate changes, Eustasy and Land Subsidence in the North Adriatic Region, Italy. **Marine Ecology**, 23 Supplement 1: 38-50.
- CARMINATI, E. & MARTINELLI, G. 2002. Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation. **Engineering Geology**, 66: 241-255.
- CARON, F.; TOMAZELLI, L.J.; LIMA, L.G.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C. & DILLENBURG, S.R. 2011. Características estratigráficas da barreira transgressiva holocênica na Praia dos Concheiros, Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. In: XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Búzios. **Resumos**.
- CARON, F. 2014. **Estratigrafia da barreira transgressiva do sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. 172p., Tese de Doutorado, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/88625>>.
- CARRARO, C.C.; GAMERMAN, N.; EICK, N.C.; BORTOLUZZI, C.A.; JOST, H. & PINTO, J.F. 1974. **Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:1.000.000**. Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- CARTA GEOLOGICA D'ITALIA IN SCALA 1:50.000. 1999. **Carta Geologica d'Italia In Scala 1:50.000, Foglio 223-Ravenna**. Servizio Geologico d'Italia, Regione Emilia-Romagna. Escala 1:50.000.
-

-
- CARTA GEOLOGICA D'ITALIA IN SCALA 1:50.000. 2005. **Carta Geologica d'Italia In Scala 1:50.000 Foglio 240-241 Forlì-Cervia**. Servizio Geologico d'Italia, Regione Emilia-Romagna. Escala 1:50.000.
- CARTER, R.W.G. 1988. **Coastal environments**. Academic Press Limited, London, p. 617.
- CARTER, R.W.G. & WOODROFFE, C.D. 1994. Coastal evolution: an introduction. In: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.D (Ed.). **Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics**, Cambridge University Press, p. 1-33.
- CASELLA, E.; ROVERE, A.; PEDRONCINI, A.; MUCERINO, L.; CASELLA, M.; CUSATI, L.A; VACCHI, M.; FERRARI, M. & FIRPO, M. 2014. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 149: 160-167.
- CASTIGLIONI, G.B. 1999. **Carta Geomorfologica della Pianura Padana al 1:250.000**. MURST, SELCA, Florence, Escala 1:250.000.
- CASTIGLIONI, G.B.; BONDESAN, M. & ELMI, C. 1990. Geomorphological mapping of the Po Plain (Italy), with an example in the area of Ravenna. **Zeitschrift für Geomorphologie NF**, 80: 35-44.
- CASTIGLIONI, G.B.; BIANCOTTI, A.; BONDESAN, M.; CORTEMIGLIA, G.C.; ELMI, C.; FAVERO, V.; GASPERI, G.; MARCHETTI, G.; OROMBELLI, G.; PELLEGRINI, G.B. & TELLINI, C. 1999. **Geomorphological Map of the Po Plain, Italy. At the scale 1:250.000**. Earth Surface Processes Landforms 24: 1115-1120.
- CENCINI, C. 1998. Physical Processes and Human Activities in the Evolution of the Po Delta, Italy. **Journal of Coastal Research**, 14(3): 774-793.
- CIABATTI, M. 1966. Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano. **Giornale di Geologia**. 34(2): 381-410.
- CIBIN, U. & SEVERI, P. 2005. **Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 240-241**. Forlì-Cervia, p. 104.
-

-
- COCCOSSIS, H. 1997. Integrated Coastal Area and River Basin Management. ICARM Technical Reports Series No. 1. UNEP, Priorities Action programme.
- COLANTONI, P.; PRETI, M. & VILLANI, B. 1990. Sistema deposizionale e linea di riva olocenica sommersi in Adriatico e al largo di Ravenna. **Giornale di Geologia**, 52: 1-18.
- COWELL, P.J. & THOM, B.G. 1994. Morphodynamics of coastal evolution. In: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.D. (Ed.). **Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics**. Cambridge University Press, p. 33-86.
- CURRAY, J.R. 1964. Transgressions and regressions. In: MILLER, R.L. (Ed.). Papers in **Marine Geology**, Macmillan, New York, p. 175-203.
- DALLA, S.; ROSSI, M.; ORLANDO, M.; VISENTIN, C.; GELATI, R.; GNACCOLINI, M.; PAPANI, G.; BELLI, A.; BIFFI, U. & CATRULLO, D. 1992. Late Eocene-Tortonian tectono-sedimentary evolution in the western part of the Padan basin (northern Italy). **Paleontología y Evolución**, 24-25: 341-362.
- DAVIDSON-ARNOTT, R. 2010. Humans and the coastal zone. In: DAVIDSON-ARNOTT, R. (Ed.). **An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology**. Cambridge University Press, UK. p. 442.
- DAVIS, R.A. Jr. 1994. Barrier Island systems - a geologic overview. In: DAVIS, R.A. Jr. (Ed.). **Geology of Holocene Barrier Island Systems**. Springer-Verlag, Berlin (1994), p. 1-46.
- DELANEY, P.J.V. 1965. **Fisiografia e geologia de superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul**. Publicação Especial da Escola de Geologia, UFRGS, Porto Alegre, n.6, 195p.
- DI DIO, G.; LASAGNA, S.; PRETI, D. & SAGNA, M. 1997. Stratigrafia dei depositi quaternari della provincia di Parma. **Bollettino della Società Paleontologica Italiana**, 35: 181-189.
- DILLENBURG, S.R. & HESP, P.A. 2009. Coastal Barriers -an introduction. In: DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. (eds). **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. Lecture Notes in Earth Sciences, 107: 1-16.
-

-
- DILLENBURG, S.R. & BARBOZA, E.G. 2014. The Dip and Strike-Fed Sandy Coast of Southern Brazil. In: MARTINI, I.P.; WANLESS H.R. (eds.). **Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences**, Geological Society, London, Special Publications 388: 333-352.
- DILLENBURG, S.R.; ROY, P.S.; COWELL, P.J. & TOMAZELLI, L.J. 2000. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of Coastal Research**, 16: 71-81.
- DILLENBURG, S. R.; ESTEVES, L. S. & TOMAZELLI, L. J. 2004. A critical evolution of coastal erosion in Rio Grande do Sul, southern Brazil. **Anais da academia brasileira de ciências**, 76: 611-623.
- DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; TOMAZELLI, L.J.; HESP, P.A.; CLEROT, L.C.P. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2009. The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: DILLENBURG, S.R. & HESP, P.A. (eds). **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. Lecture Notes in Earth Sciences, 107: 53-91.
- DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G. & ROSA, M.L.C.C. 2011. Ground penetrating radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, 64: 651-655.
- DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; HESP, P.A.; ROSA, M.L.C.C.; ANGULO, R.J.; SOUZA, M.C.; GIANNINI, P.C.F. & SAWAKUCHI, A.O. 2014. Discussion: "Evidence for a transgressive barrier within a regressive strandplain system: implications for complex response to environmental change" by Hein, *et al.* (2013), *Sedimentology* 60: 469-502. **Sedimentology** 61-7: 2205-2212.
- ESTEVES, L.S. 2004. **Variabilidade espaço-temporal dos deslocamentos da linha de costa no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. 139p., Tese de Doutorado, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/4128>>.
- ESTEVES, L.S.; SILVA, A.R.P.; AREJANO, T.B.; PIVEL, M.A.G. & VRANJAC, M.P. 2003. Coastal development and human impacts along the Rio Grande do Sul beaches, Brazil. **Journal of Coastal Research**, 35: 548-556.
-

-
- EU 2015. **FP7 - Research and Innovation funding 2014-2020**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm>. Acesso em: 09 de novembro de 2015.
- EU WG-ID 2004. **Measuring Progress in the Implementation of Integrated Coastal Zone Management**. Working Group on Indicators and Data. Guidance Notes for Completing the Progress Indicator, Bruxelles. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/iczm/expert_group.htm>. Acesso em: 23 de outubro de 2015.
- EUROPEAN PARLIAMENT 2002. **Council Recommendation of the European Parliament and of the Council Concerning the Implementation of Integrated Coastal Zone Management in Europe**. Com/2002/413.
- FEPAM 2015. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler-RS. **Programas e Projetos: Programa de Gerenciamento Costeiro-GERCO**. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/biblioteca.asp>>. Acesso em: 05 de novembro de 2015.
- FIGUEIREDO, S.A. & CALLIARI, L.J. 2005. Sangradouros: Distribuição Espacial, Variação Sazonal, Padrões Morfológicos e Implicação no Gerenciamento Costeiro. **Gravel**, 3: 47-57.
- FITZGERALD, D.M.; CLEARLY, W.J.; BUYNEVICH, L.V.; HEIN, C.J.; KLEIN, A.H.F.; ASP, N. & ANGULO, R. 2007. Strandplain Evolution along the Southern Coast of Santa Catarina, Brazil. **Journal of Coastal Research**, 50: 152-156.
- GABBIANELLI, G.; DEL GRANDE, C.; SIMEONI, U.; ZAMARIOLO, A. & CALDERONI, G. 2000. Evoluzione dell'area di Goro negli ultimi cinque secoli (Delta del Po). **Studi Costieri**, 2: 45-63.
- GALLOWAY, W. E. & HOBDAV, D. K. 1983. **Terrigenous Clastic Depositional Systems: Applications to Petroleum, Coal and Uranium Exploration**. New York, Springer-Verlag, p.423
- GAMBOLATI, G.; GIUNTA, G.; PUTTI, M.; TEATINI P.; TOMASI, L.; BETTI, I.; MORELLI, M.; BERLAMONT, J.; DE BACKER, K.; DECOUTTERE, C.; MONBALIU, J.; YU C.S.; BREKER, I.; KRISTENSER, E.D.; ELFRINK, B.; DANTE, A. & GONELLA, M. 1998. Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea
-

-
- due to Sea Level Rise, and Natural and Anthropogenic Land Subsidence. In: GAMBOLATI, G. (Ed.). **CENAS - Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence**. Kluwer Academic Dordrecht, The Netherlands, p. 1-34.
- GESAMP, 1996. The contributions of science to coastal zone management. **Reports and Studies**, GESAMP. No. 61. Rome, FAO, p. 66.
- GONÇALVES, J. A.; HENRIQUES, R.; 2015. UAV photogrammetric for topographic monitoring of coastal areas. **ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing**, 104: 101-111.
- GRUBER, N.L.S. 2005. Diagnóstico de Vulnerabilidade dos Campos de Dunas Frontais do Município de Xangri-Lá - RS, como Subsídio ao Plano de Manejo. Porto Alegre: CECO-UFRGS-PM de Xangri-Lá. Documento inédito, p.47.
- GRUBER N.L.S.; BARBOZA E.G. & NICOLODI, J.L. 2003. Geografia dos Sistemas Costeiros e Oceanográficos: Subsídios para Gestão Integrada da Zona Costeira. **Gravel**, 1: 81-89.
- GRUBER, N.L.S.; TOLDO, E.E.; BARBOZA, E.G.; NICOLODI, J.L. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2006. A shoreface morphodynamic zonation and the equilibrium profile variability on the northern coastline of Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, 39: 504-508.
- GRUBER, N.L.S.; TABAJARA, L.L.; SOUZA, R.R. & CORRÊA, I.C.S. 2008. Plano de Manejo das Dunas do Município de Xangri-Lá-RS. Porto Alegre: CECO-UFRGS. Documento Inédito/Licença de Instalação N°1107/2009-DL da FEPAM. p. 36.
- HARLEY, M.D. & CIAVOLA, P. 2013. Managing local coastal inundation risk using real-time forecasts and artificial dune placements. **Coastal Engineering**, 77: 77-90.
- HAYES, M.O. 1979. Barrier island morphology as a function of wave and tide regime. In: LEATHERMAN, S. (Ed.). **Barrier island from Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico**. Academic Press, New York, NY, p. 1-29.
- HESP, P.A.; DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; TOMAZELLI, L.J.; AYUP-ZOUAIN, R.N.; ESTEVES, L.S.; GRUBER, N.L.; TOLDO, E.E. Jr.;
-

-
- TABAJARA, L.L.C.A. & CLEROT, L.C.P. 2005. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the torres to tramandaí barrier system, southern brazil. **Anais da academia brasileira de ciências**, 77: 493-508
- HESP, P.A.; DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; CLEROT, L.C.P.; TOMAZELLI, L.J. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2007. Morphology of the Itapeva to Tramandaí transgressive dunefield barrier system and mid- to late sea level change. **Earth Surface Process Landforms**, 32: 407-414.
- IMBRIE, J.; HAYES, J.D.; MARTINSON, D.G.; MCINTYRE, A.; MIX, A.C.; MORLEY, J.J.; PISIAS, N.G.; PRELL, W.L. & SHACKLETON, N.J. 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine δO^{18} record. In: BERGER, A. *et al.* (eds). **Milankovitch and Climate**. Part I. Riedel. p. 269-305.
- IPCC 2012. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: a Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. University Press, Cambridge, p. 582.
- JOHNSTON, J.W.; THOMPSON, T.A. & BAEDKE, S.J. 2007. Systematic pattern of beach-ridge development and preservation: Conceptual model and evidence from ground penetrating radar. In: BAKER, G.S.; JOL, H.M. (eds.). **Stratigraphic Analyses Using GPR**. The Geological Society of America, Colorado, Special Publication, 432: 47-58
- LIPPARINI, T. 1969. **Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000 Foglio 100-Forlì, Foglio 101-Rimini**. Servizio Geologico d'Italia, Roma, p. 74.
- LOPES, R.P.; OLIVEIRA, L.C.; FIGUEIREDO, A.M.G.; KINOSHITA, A.; BAFFA, O. & BUCHMANN, F.S. 2009. ESR dating of pleistocene mammal teeth and its implications for the biostratigraphy and geological evolution of the coastal plain, Rio Grande do Sul, southern Brazil. **Quaternary International**, p.213-222.
- LOPES, R. P.; DILLENBURG, S.R. & SCHULTZ, C.L. 2011. Geological and environmental evolution of Lagoon System III in the southernmost coastal
-

plain of Rio Grande do Sul state. In: XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Búzios. **Resumos**

LYELL, C. 1830. **Principles of geology, being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation.**

London: John Murray, v.1.

MANCINI, F.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M.; STECCHI, F.; FABBRI, S. & GABBIANELLI, G. 2013. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. **Remote Sensing**, 5: 6880-6898.

MARABINI, F. & VEGGIANI, A. 1992. Climatic Variations in the Coastal Zone - Comparison between the Po River Delta (Adriatic Sea, Italy) and the Huanghe River Delta (Bohai Sea, China). **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, 11(3):193-206.

MARABINI, S.; LENZA, R. & VAI, G.B. 1987. Pleistocene superiore e Olocene del margine pedeappenninico romagnolo: rapporto preliminare. **Rendiconti della Società Geologica Italiana**, 10: 259-275.

MARABINI, S.; TAVIANI, M.; VAI, G.B. & VIGLIOTTI, L., 1995. Yellow sand facies with *Arctica islandica*: low stand signature in an early Pleistocene Front-Appennine Basin. **Giornale di Geologia**, 57(1-2): 259-275.

MARTINELLI, L.; ZANUTTIGH, B.; DE NIGRIS, N. & PRETI, M. 2011. Sand bag barriers for coastal protection along the Emilia Romagna littoral, Northern Adriatic Sea, Italy. **Geotextiles and Geomembranes** 29: 370-380.

MITCHUM, R.M. Jr.; VAIL, P.R. & SANGREE, J.B. 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphy interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON, C.E. (Ed.), **Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration**. AAPG, 26: 117-133 (Memoir # 26).

MMA 2006. **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. DIETER, M. (Ed.). Brasília, p. 476.

MOLLER, I. & ANTHONY, D. 2003. GPR study of sedimentary structures within a transgressive coastal barrier along the Danish North Sea coast. In: BRISTOW,

-
- C.S.; JOL, H.M. (eds.). **Ground Penetrating Radar in Sediments**. The Geological Society, London, Special Publication, 211: 55-66.
- MONTANARI, A.; LONDEI, A. & STANISCIA, B. 2014. Can we interpret the evolution of coastal land use conflicts? Using Artificial Neural Networks to model the effects of alternative development policies. **Ocean & Coastal Management**, 101(Part B): 114-122.
- MORAES, A.C.R. 1999. **Contribuições para a Gestão da Zona Costeira do Brasil: elementos para a geografia do litoral brasileiro**. Hucitec/Edusp, Sao Paulo, Brasil, p. 285.
- MULLER, M. & BONETTI, J. 2014. An Integrated Approach to Assess Wave Exposure in Coastal Areas for Vulnerability. **Marine Geodesy**, 37: 220-237.
- NEAL, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth Science Reviews**, 66: 261-330.
- NELSON, B.W. 1970. Hydrography, sediment dispersal and recent historical development of the Po river delta, Italy. In: Morgan, J.P.; Shaver, R.H. (Ed.). **Deltaic Sedimentation, Modern and Ancient**, SEPM Special Publication, 15: 152-184.
- NICOLODI, J. L.; FERRARO, L. M. W. & TOLDO, E.E. Jr. 2002. Situação Atual da Ocupação Comercial na Faixa de Praia do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS, - **Anais**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, v. 1.
- OOST, A.P.; HOEKSTRA, P.; WIERSMA, A.; FLEMMING, B.; LAMMERTS, E.J.; PEJRUP, M.; HOFSTEDE, J.; VAN DER VALK, B.; KIDEN, P.; BARTHOLDY, J.; VAN DER BERG, M.W.; VOS, P.C.; DE VRIES, S. & WANG, Z.B. 2012. Barrier island management: Lessons from the past and directions for the future. **Ocean & Coastal Management**, 68: 18-38.
- ORFORD, J.D. & CARTER, R.W.G. 1995. Examination of mesoscale forcing of a swash-aligned, gravel barrier from Nova Scotia. **Marine Geology**, 126: 201-211.
- ORI, G.G. 1993. Continental depositional systems of the Quaternary of the Po Plain (northern Italy). **Sedimentary Geology**, 83: 1-14.
-

-
- PERINI, L.; CARRARA, G. & LORITO, S. 2008. **Batimetrie e Modelli Digitali dei Fondali antistanti la Regione Emilia-Romagna**. Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna. **Relazione di attività SGSS**.
- PERNETTA, J.; AND ELDER, D.; 1993. **Cross-sectoral, Integrated Coastal Planning: Guidelines and Principles for Coastal Area Development**. Gland, Switzerland, IUCN, p. 63.
- PIERI, M. & GROPPPI, G. 1981. **Subsurface Geological structure of the Po Plain Italy**. Progetto Finalizzato. Geodinamica, Pubblicazione C.N.R., 414 p. 23.
- PORTZ, L. 2012. **Gestão de praias e dunas: aplicações para a região costeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. 188p., Tese de Doutorado, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/56335>>.
- POSAMENTIER, H.W.; ALLEN, J.P. & GIVES, D.P. 1992. High resolution sequence stratigraphy - The coast Coulee delta, Alberta. **Journal of Sedimentary Petrology**, 62: 310-317.
- PROJETO ORLA 2002. **Fundamentos para Gestão Integrada**. Brasília: MMA/SQA; Brasília: MP/SPU, p. 78.
- PROVINCIA DI RAVENNA, 2015. Sistema Informativo Territoriale Cartografia on-line. Disponível em: <<http://www.provincia.ra.it/Altri-servizi/SIT-Sistema-Informativo-Territoriale/Cartografia-on-line>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2015.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA 1999. **Carta Geologica di pianura dell'Emilia Romagna - 1:250.000**. Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna. Escala 1:250.000.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA 2010. **Per La Sicurezza Del Territorio 2007/2009**. Relatório Técnico Regione Emilia-Romagna, p. 44.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA 2011. **Nuovi strumenti per la gestione dei litorali in Emilia-Romagna**. MONTANARI, R.; MARASMI, C. (eds.). Relatório Técnico Regione Emilia-Romagna, p.72.
-

-
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA 2011a. **COASTANCE Strategie e strumenti di gestione della costa in Emilia-Romagna**. Relatório Técnico Regione Emilia-Romagna, p. 35.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA 2013. Emilia-Romagna ambiente - Cartografia interattiva. Disponível em: <<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/servizi-on-line/cartografia-interattiva>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2015
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA 2015. Emilia-Romagna Geological, seismic and soil survey - Cartografia interattiva e banche dati. Disponível em: <<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/webgis-banchedati>>. Acesso em: 11 de novembro de 2015.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP 1998. **Riserve idriche sotterranee della Regione Emila-Romagna**. A cura di G. DI DIO. S.EL.CA. (Firenze). Mapa. Escala: 1:250.000.
- RICCI LUCCHI, F.; COLALONGO, M.L.; CREMONINI, G.; GASPERI, G.; IACCARINO, S.; PAPANI, G.; RAFFI, S. & RIO, D. 1982. Evoluzione sedimentaria e paleogeografia nel margine appenninico. In: CREMONINI, G.; Ricci Lucchi, F. (Eds.). **Guida alla Geologia del margine appenninico-padano**. Guida Geologica Regionale, p. 17-46.
- RIZZINI, A. 1974. Holocene sedimentary cycle and heavy mineral distribution, Romagna-Marche coastal plain, Italy. **Sedimentary Geology**, 11: 17-37.
- ROSA, M.L.C.C. 2010. **Estratigrafia de Sequências: aplicação das ferramentas na alta frequência. Um ensaio na Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 67p., Monografia de Qualificação para o Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ROSA, M.L.C.C., 2012. **Geomorfologia, Estratigrafia De Sequências E Potencial De Preservação Dos Sistemas Laguna-Barreira Do Quaternário Costeiro Do Rio Grande Do Sul**. Porto Alegre. 251p., Tese de Doutorado, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em:<<http://hdl.handle.net/10183/66367>>.
- ROSA, M.L.C.C.; BARBOZA, E.G.; DILLENBURG, S.R.; TOMAZELLI, L.J. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2011a. The Rio Grande do Sul (southern Brazil) shoreline
-

-
- behavior during the Quaternary: a cyclostratigraphic analysis. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, 64: 686-690.
- ROSA, M.L.C.C.; BARBOZA, E.G.; TOMAZELLI, L.J. & DILLENBURG, S.R. 2011b. Proposta de hierarquização para o registro sedimentary da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. In: XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Búzios. **Resumos**.
- ROY, P.S.; ZHUANG, W-Y.; BIRCH, G.F. & COWELL, P.J. 1992. **Quaternary geology and placer mineral potential of the Forster-Tuncurry Shelf, southeastern Australia**. Geological Survey Report: GS 1992/201, Dept. of Mineral Resources, New South Wale, p. 164.
- ROY, P.S.; COWELL P.J.; FERLAND M.A. & THOM, B.G. 1994. Wave-Dominated Coasts. In: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C. D. (eds.). **Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics**. Cambridge, Cambridge University Press, p. 121-186.
- SAL ENGINEERING 2015. Relazione finale relativa ai rilievi geometrici tridimensionali per mezzo di fotogrammetria aerea sulle zone oggetto di studio. **Relatório Técnico**, p. 11.
- SCARPONI, D. & ANGELETTI, L., 2007. Integration of palaeontological patterns in the sequence stratigraphy paradigm: A case study from Holocene deposits of the Po Plain (Italy). **GEOACTA**, 7: 1-13.
- SCHWAB, W.C.; THIELER, E.R.; ALLEN, J.R.; FOSTER. D.S.; SWIFT, B.A. & DENNY, J.F. 2000. Influence of inner-continental shelf geologic framework on the evolution and behavior of the barrier island system between Fire Island Inlet and Shinnecock Inlet, Long Island, New York. **Journal of Coastal Research**, 16: 408-422.
- SHACKLETON, N.J. & OPDYKE, N.D. 1973 Oxygen isotope and palaeo-magnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes in a 105 and 106 year scale. **Quaternary Research**. 3: 39-55.
- SHORT, A.D. 1999. Beaches. In: Short, A.D. (Ed.). **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. Chichester: Wiley, p. 3-20.
-

-
- SILVA, A.B.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C. & FRACALOSSO, F.G. 2010. Caracterização dos depósitos sedimentares em subsuperfície do setor meridional da planície costeira sul de Santa Catarina. **Gravel**, 8: 1-7.
- SIMEONI, U. & CORBAU, C. 2009. A review of the Delta Po evolution (Italy) related to climatic changes and human impacts. **Geomorphology**, 107: 64-71.
- SNAVELY, N.; SEITZ, S. & SZELISKI, R., 2007. Modelling the world from the internet photo collections. **International Journal of Computer Vision**, 80(2): 189-210.
- STEFANI, M. & VINCENZI, S. 2005. The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system. **Marine Geology**, 222-223: 19-48.
- STIVE, M.; ARNINKHOF, A.; HAMM, L.; HANSON, H.; LARSON, M.; WIJNBERG, K.; NICHOLLS, R. & CAPOBIANCO, M. 2002. Variability of shore and shoreline evolution. **Coastal Engineering**, 47: 211-235.
- STROHAECKER, T.M. 2007. **A urbanização no Litoral Norte do estado do Rio Grande do Sul: Contribuição para a gestão urbana ambiental do Município de Capão da Canoa**. Porto Alegre. 239p., Tese de Doutorado, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em:<<http://hdl.handle.net/10183/10086>>.
- STROHAECKER, T.M. & TOLDO, E. 2011. Diretrizes de desenvolvimento regional para o litoral norte do estado do Rio Grande do Sul. XIV Encontro Nacional Da anpur, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais**, p. 21.
- SVENSMARK, H. 2000. Cosmic rays and Earth's climate. **Space Science Reviews**, 93: 175-185.
- TABAJARA, L.L.C.A. & WESCHENFELDER, J. 2011. Recuperação de Dunas Frontais em Área Degradada por Sangradouro na Praia de Xangri-Lá/RS. **Gravel** 9(1): 69-85.
- TAGLIANI, P.R.A.; LANDAZURI, H.; REIS, E.G.; TAGLIANI, C.R.; ASMUS, M.L. & SÁNCHEZ-ARCILLA A. 2003. Integrated coastal zone management in the Patos Lagoon estuary: perspectives in context of developing country. **Ocean & Coastal Management** 46: 807-822.
-

-
- TARAMELLI, A.; VALENTINI, E.; CORNACCHIA, L.; MANDRONE, S.; MONBALIU, J.; HOGGART, S.P.G.; THOMPSON, R.C. & ZANUTTIGH, B. 2014. Modeling uncertainty in estuarine system by means of combined approach of optical and radar remote sensing. **Coastal Engineering**, 87: 77-96.
- TEATINI, P.; FERRONATO, M.; GAMBOLATI, G. & GONELLA, M. 2006. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. **Water Resources Research**, 42: 1-19.
- TOLDO, E.E. Jr.; NICOLODI, J.L.; MARTINS, L.R. 2006. Erosão e acreção da zona costeira. In: MUEHE, D. (Org.). **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. Brasília: MMA, p. 476. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/arquivos/rs_erosao.pdf>. Acesso em: 17 de dezembro de 2015.
- TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 1996. Quaternary Geological Evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 68(3): 373-382.
- TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 2000. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira. In: HOLZ, M.; DE ROS, L.F. (eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Edições CIGO/UFRGS, Porto Alegre, p. 375-406.
- TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 2005. Mapeamento Geológico de Planícies Costeiras: o Exemplo da Costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, 3: 109-115.
- TOMAZELLI, L.J.; DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G. & ROSA, M.L.C.C. 2008. Geomorfologia e Potencial de Prseservação dos Campos de Dunas Transgressivos de Cidreira e Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociencias**, 35(2): 47-55.
- TOMAZELLI, L.J.; BARBOZA, E.G.; DILLENBURG, S.R.; ROSA, M.L.C.C.; CARON, F. & LIMA, L.G. 2008a. **Implantação, preenchimento e desenvolvimento de vales incisos na porção sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. Projeto PETROBRAS. Relatório Interno, p. 102.
- UNDP 2004. **Reducing disaster risk: A challenge for development**. United Nations Development Programme, New York, p. 146.
-

UNEP 2015. **Agenda 21 - Scientific and Technological Community - United Nations Environment Programme.** Disponível em: <<http://www.unep.org/documents.multilingual/default.asp?DocumentID=52&ArticleID=81&l=en>>. Acesso em: 09 de novembro de 2015.

UNESCO 2006. **A Handbook for Measuring the Progress and Outcomes of Integrated Coastal and Ocean Management.** IOC Manuals and Guides, No. 46, Paris, p. 217.

VAIL, P.R. 1987. Seismic Stratigraphy Interpretation Using Sequence Stratigraphy. Part 1: Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure. In: BALLY, A.W. (Ed.). **Atlas of Seismic Stratigraphy.** Tulsa, AAPG, 1: 1-9, (AAPG Studies in Geology # 27).

VAN WAGONER, J.C.; MITCHUM, R.M.; CAMPION, K.M. & RAHMANIAN, V.D. 1990. **Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies.** Methods in Exploration Series, AAPG, Tulsa, Oklahoma, n.7, p. 55.

VEGGI, L. & RONCUZZI, A. 1973. Sul problema delle più antiche foci padane e dell'evoluzione delle line costiere alto-adriatiche occidentali nell'Olocene. In: **Studi Idrogeologici dei Terreni Padani Inferiori II°**, p. 7-20.

VEGGIANI, A. 1973. Le trasformazioni dell'ambiente naturale del Ravennate negli ultimi millenni. **Studi Romagnoli**, 24: 3-26.

VEGGIANI, A. 1974. Le variazioni idrografiche del basso corso del Fiume Po negli ultimi 3.000 anni. **Padusa**, 1-2: 30-60.

VILLWOCK, J.A. 1984. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis. **Pesquisas**, 16: 5-49.

VILLWOCK, J.A. & TOMAZELLI, L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas**, Porto Alegre, n.8, p. 45.

VILLWOCK, J.A. & TOMAZELLI, L.J. 2006. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual. In: BECKER, F.G.; RAMOS, R.A.; MOURA, L.A. (eds.). **Biodiversidade, Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, planície costeira do Rio Grande do Sul.** Série Biodiversidade, 25: 20-33.

-
- VILLWOCK, J.A.; T OMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; HORN, N.O.; BACHI, F.A. & DEHNHARDT, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: RABASSA, J. (Ed.). **Quaternary of South America and Atartic Peninsula**. A.A. Balkema, Rotterdam, 4: 79-97.
- WITTMER, J.; DEXTER, T.A.; SCARPONI, D. & KOWALEWSKI, M. 2014. Quantitative Bathymetric Models for Late Quaternary Transgressive-Regressive Cycles of the Po Plain, Italy. **The Journal of Geology**, 122: 649-670.
- WOODROFFE, C.D. 2007. The Natural Resilience of Coastal Systems: Primary Concepts. In: MCFADDEN, L.; PENNING-ROWSELL, E.; NICHOLLS, R.J. (eds.). **Managing Coastal Vulnerability**. Elsevier, Amsterdam, p. 45-60.
- WORLD BANK 1996. **Guidelines for integrated coastal management. Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs Series No. 9**. POST, J.; LUNDIN, C. (Ed.), Washington, DC. The World Bank, p. 16.
-

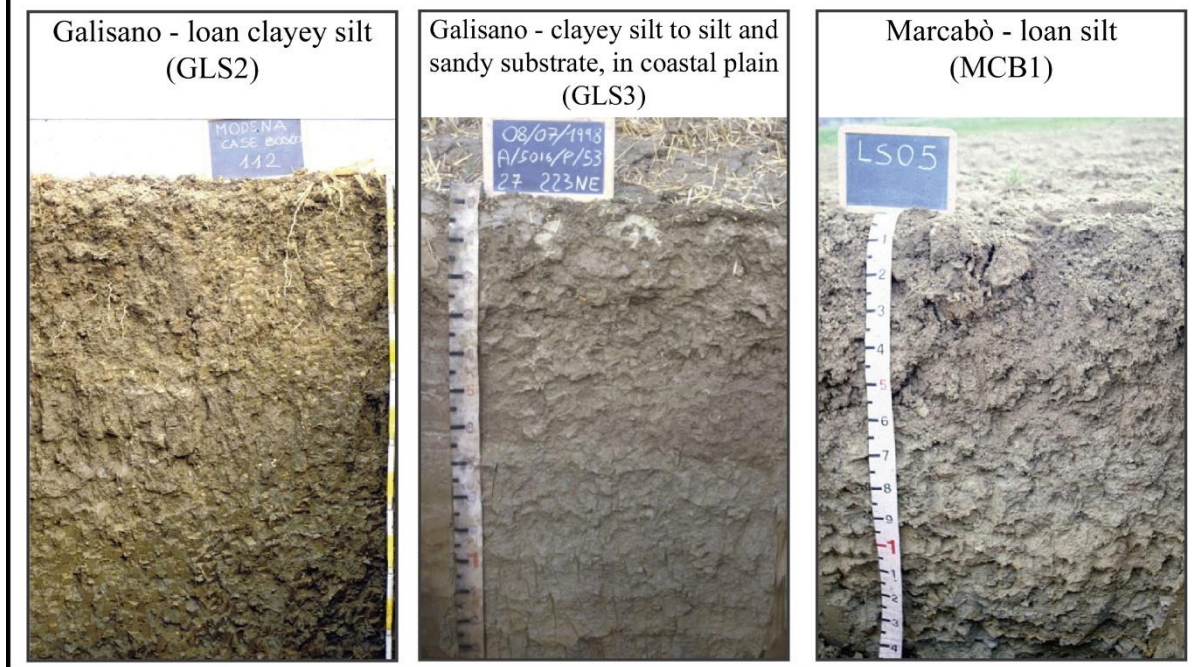
ANEXOS

ANEXO 1

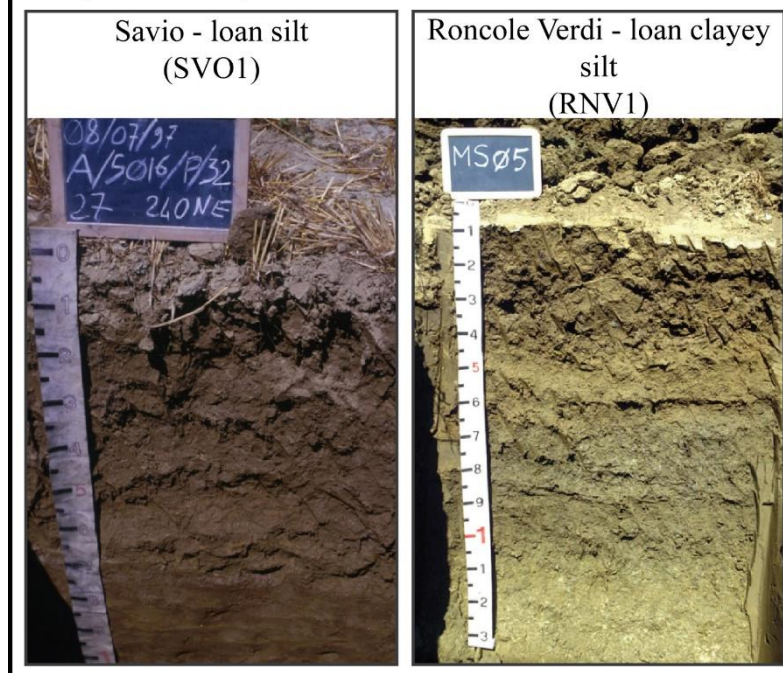
Supplementary material (capítulo 2):

Proposed soil association	Soil Acronym	Depth - cm (from - to)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
M U D S O I L	GLS 2	0 - 50	2	60.2	37.8
		50 - 90	.5	55.5	44
		90 - 140	1.3	58.7	40
		140 - 160	4.6	75.4	20
	GLS 3	10 - 40	3.3	49.9	46.8
		70 - 100	1	45.2	53.8
	MCB 1	0 - 50	20	52	28
		50 - 70	17	54	29
		70 - 90	7	62	31
		90 - 110	6	68	26
		110 - 140	9	70	21
	SVO 1	10 - 35	17.5	61.5	21
		55 - 65	22.2	64.1	13.7
		75 - 85	86	8	6
		110 - 130	93	5.5	1.5
		140 - 145	11.7	73.5	14.8
	RNV 1	0 - 65	14	49	37
		65 - 85	14	39	47
		85 - 100	12	45	43
		100 - 130	16	55	29
	SMB 1	0 - 50	6	72	22
		50 - 75	3	71	26
		75 - 105	5	73	22
		105 - 150	7	79	14
	VIL 1	0 - 50	58.3	28.9	12.8
		50 - 80	60.5	27.8	11.7
		80 - 120	89.3	7.5	3.2
		120 - 150	12.5	71	16.5

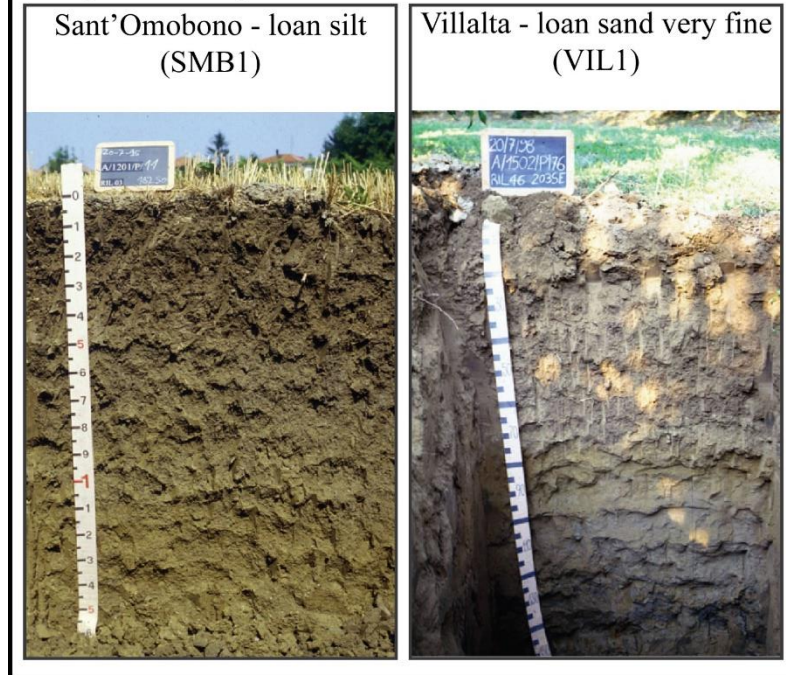
Soil Type from I Suoli dell'Emilia-Romagna (2015).
The representative soil profiles for MUD SOILS:



Soil Type from I Suoli dell'Emilia-Romagna (2015).
The representative soil profiles for MUD SOILS:



Soil Type from I Suoli dell'Emilia-Romagna (2015).
The representative soil profiles for MUD SOILS:



Proposed soil association	Soil Acronym	Depth - cm (from - to)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
S A N D S O I L	CER 1	0 - 60	96	3	1
		60 - 80	98	2	0
		80 - 110	99	1	0
		110 - 120	99	1	0
	CER 3	0 - 3	93	5.5	1.5
		5 - 10	91.3	6.9	1.8
		15 - 30	94.5	4.8	.7
		40 - 80	98.2	1.3	.5
		90 - 115	99.5	.3	.2
	CER 4	0 - 40	76.6	12.6	10.8
		40 - 50	79	13.5	7.5
		50 - 80	82	9	9
		80 - 110	88.4	7.1	4.5
	SAV 1	3 - 17	91	6	3
		17 - 60	95	5	0
		60 - 100	95	5	0
	SAV 3	10 - 35	97.8	1.2	1
		40 - 70	97.5	.7	1.8
		90 - 120	98	.3	1.7
		130 - 160	97	2.2	.8
PIR 1	0 - 20	81	9	10	
	20 - 60	93	1	6	
	60 - 70	94	1	5	

Soil Type from I Suoli dell'Emilia-Romagna (2015).
The representative soil profiles for SAND SOILS:

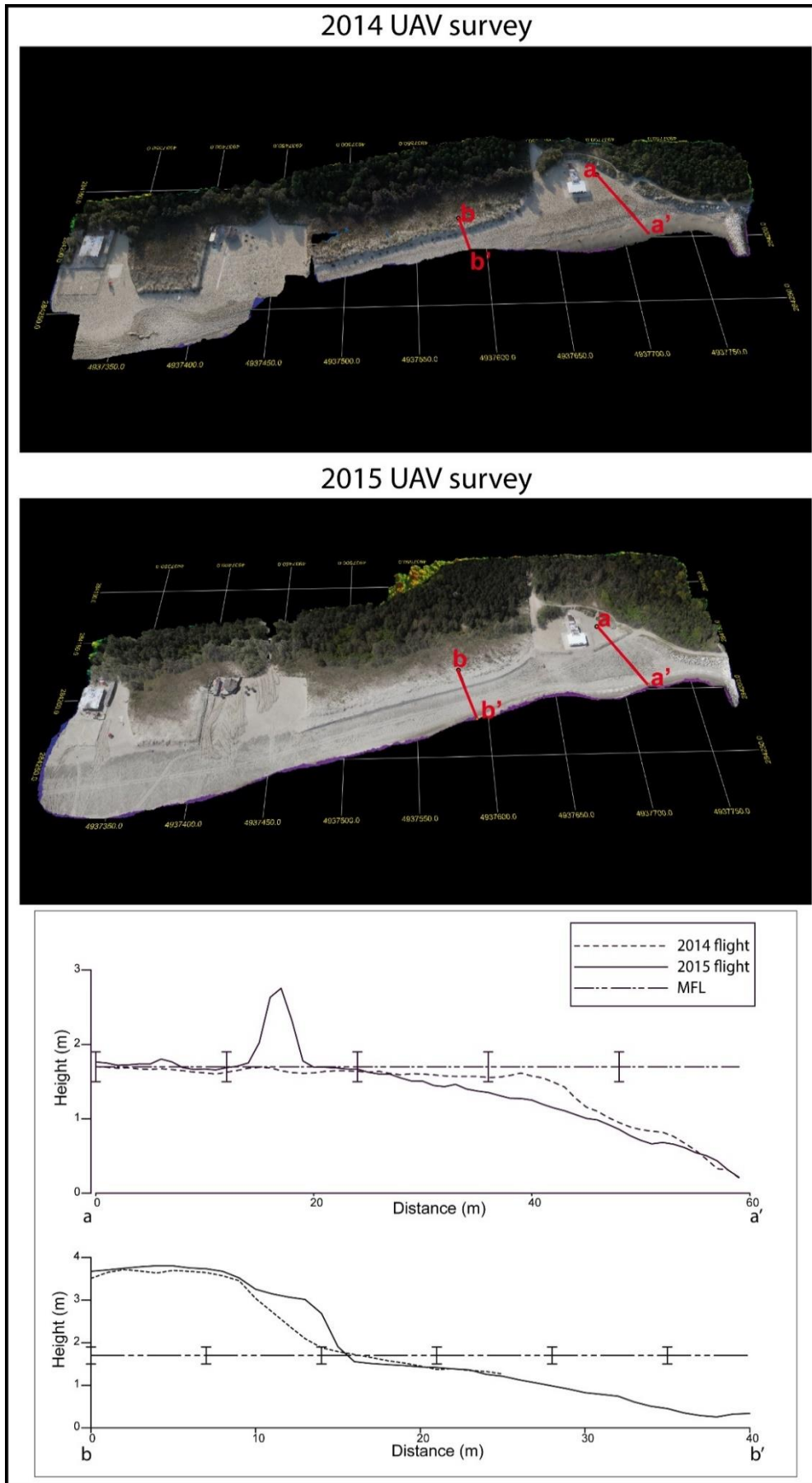


Soil Type from I Suoli dell'Emilia-Romagna (2015).
The representative soil profiles for SAND SOILS:

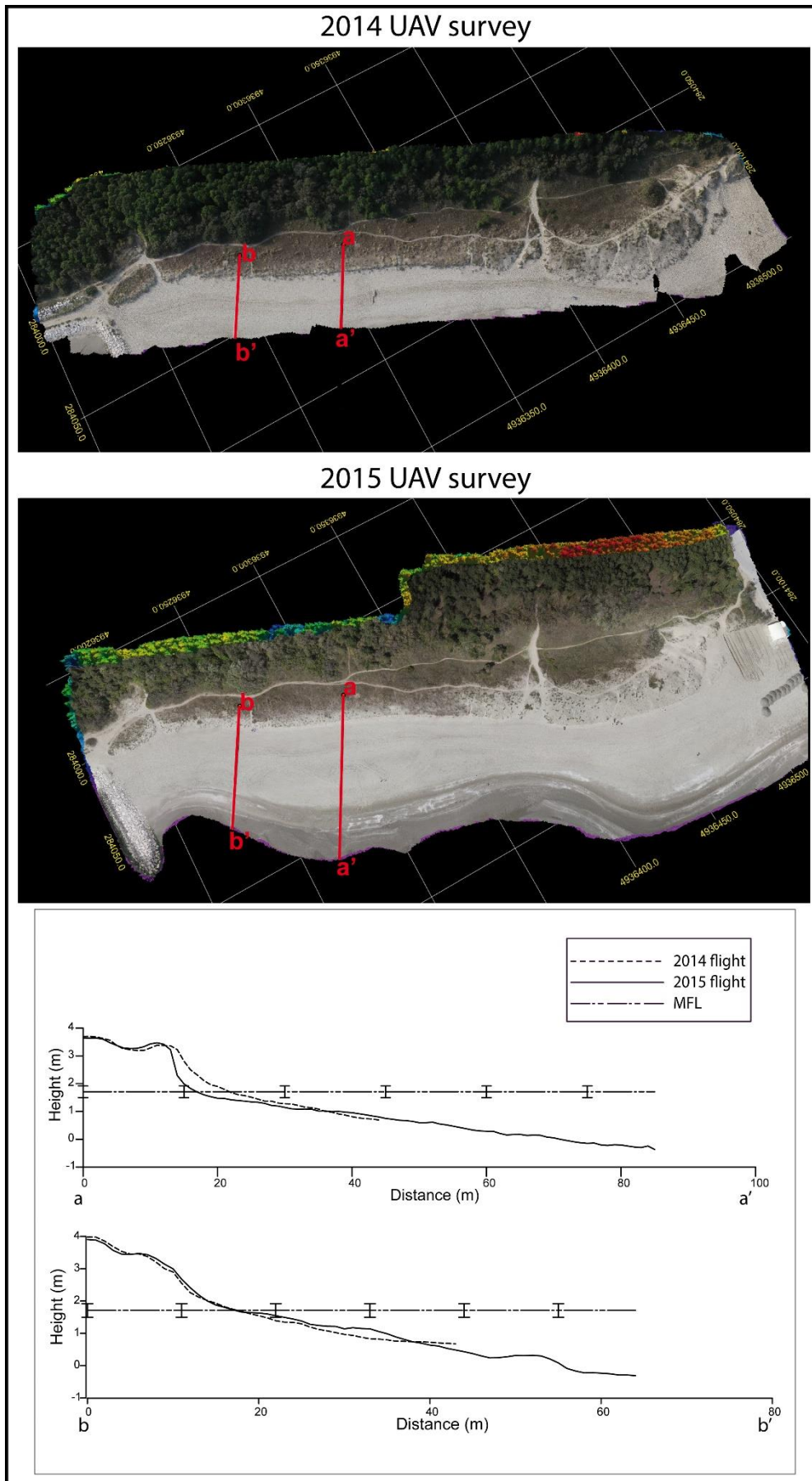


ANEXO 2

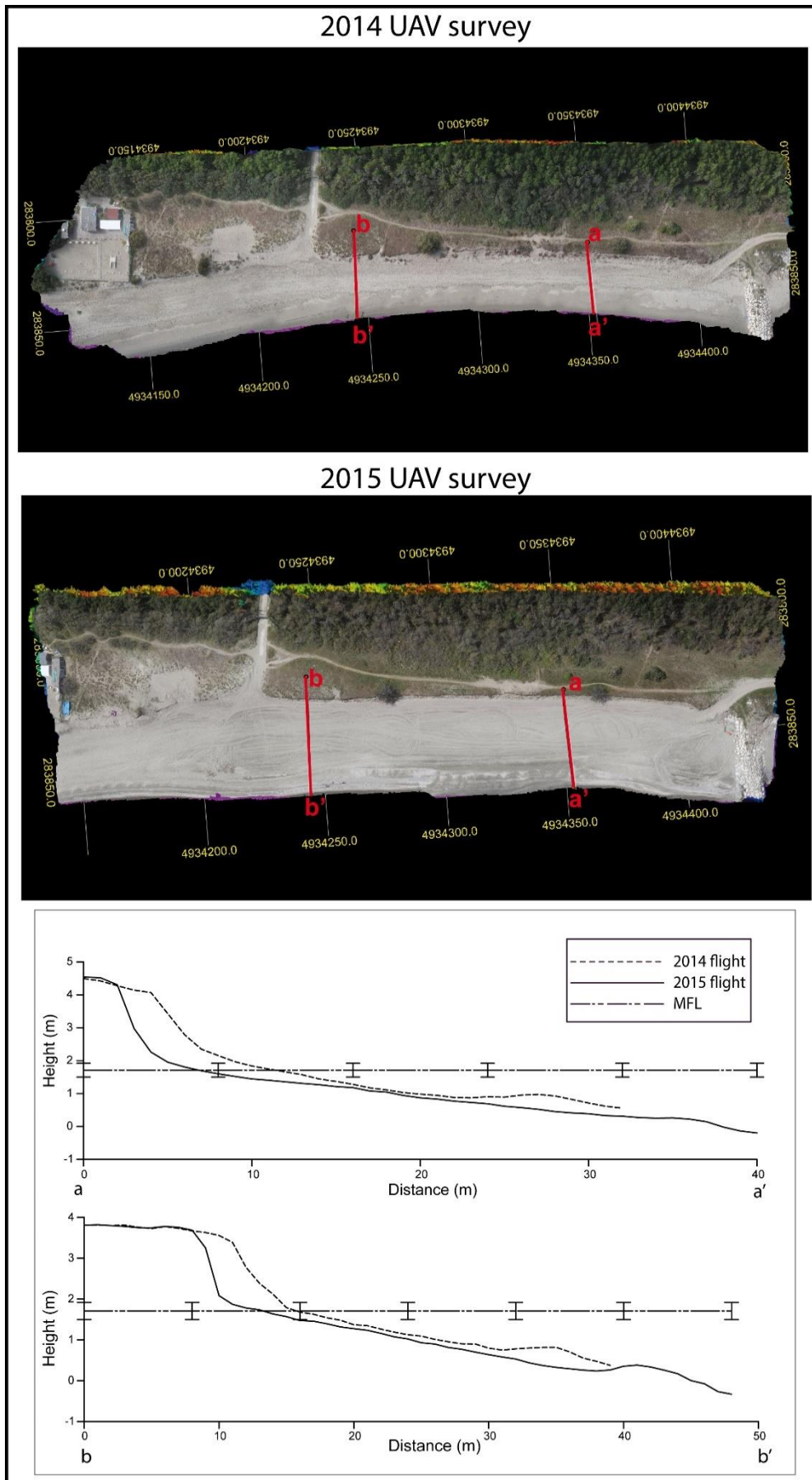
Casal Borsetti Nord:



Casal Borsetti Nord:

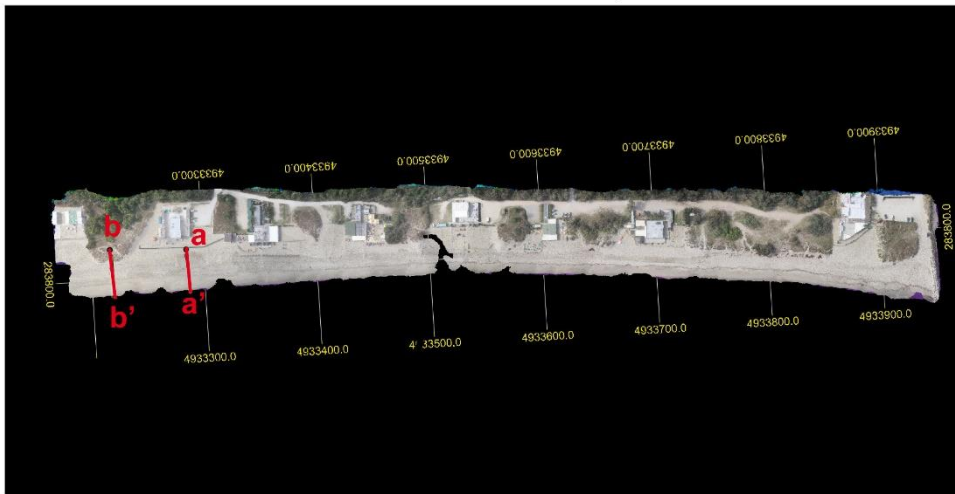


Marina Romea Nord:

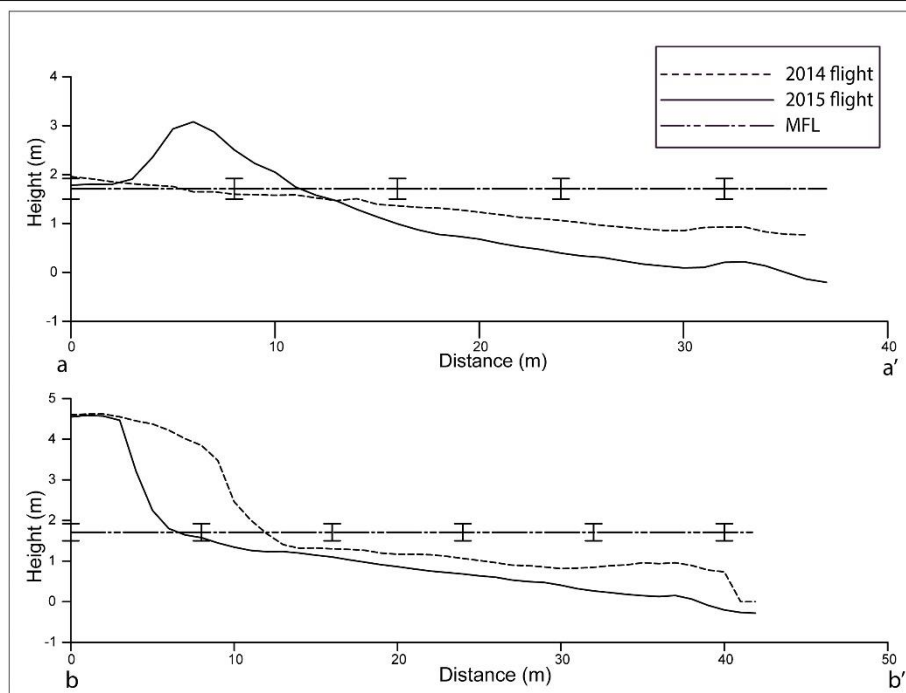
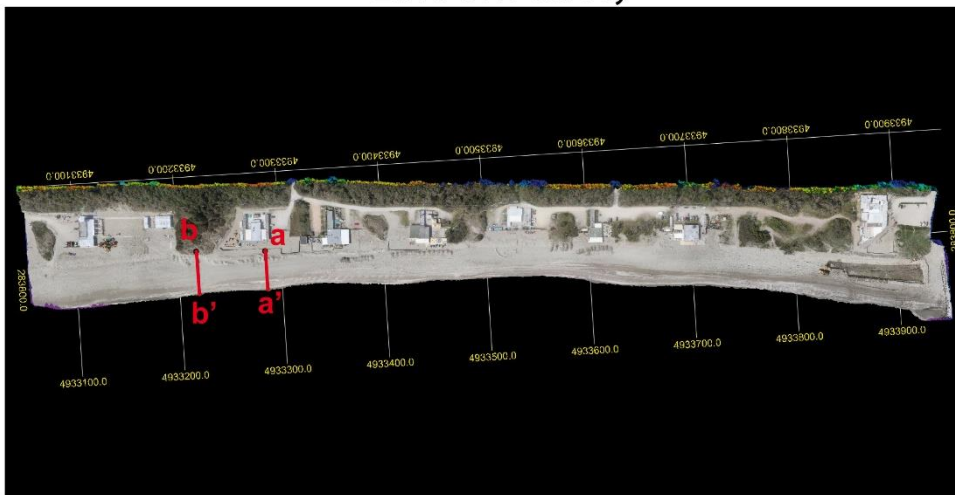


Marina Romea Sud:

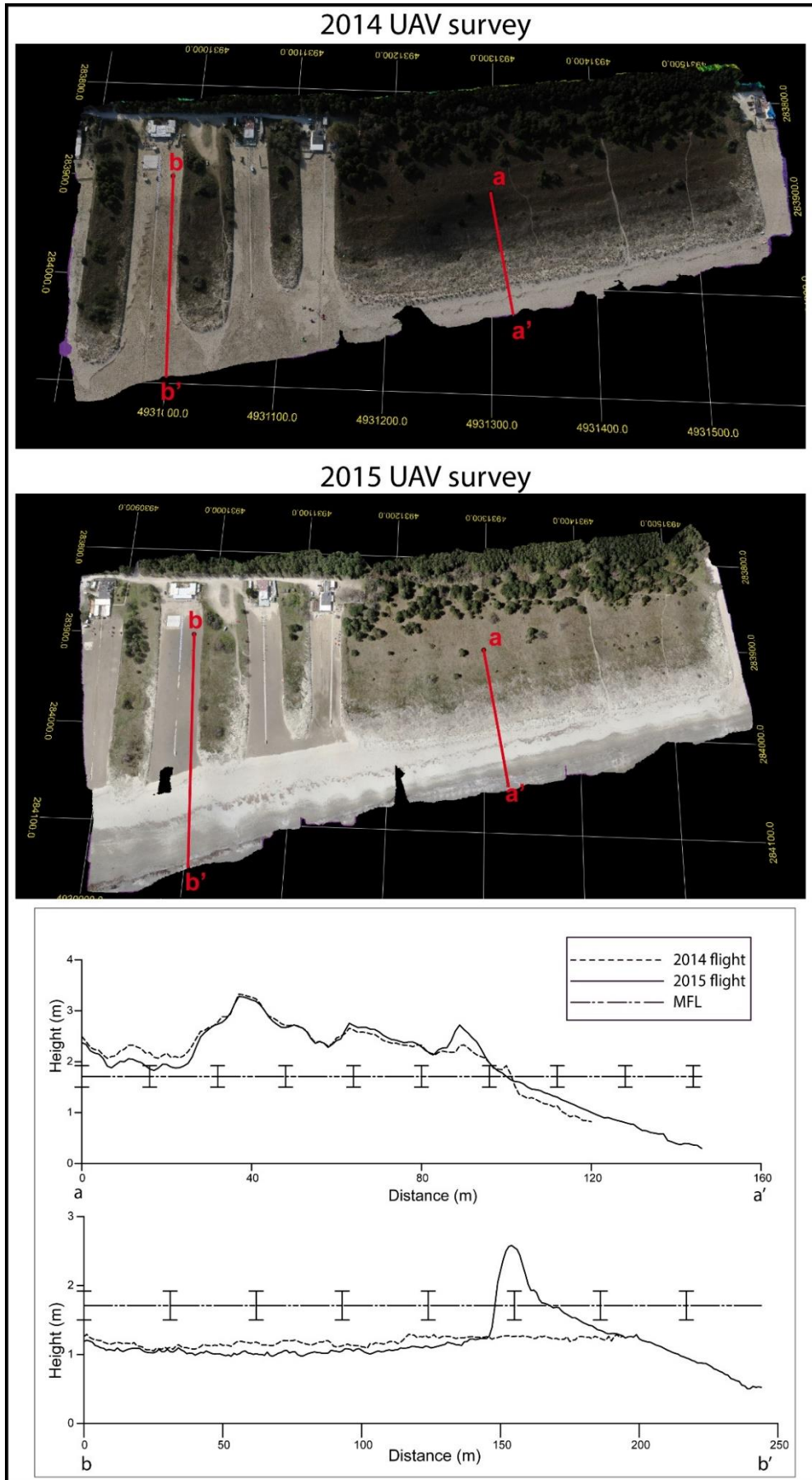
2014 UAV survey



2015 UAV survey



Porto Corsini:



Pineta Ramazzotti:

