

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

Direttore Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA TRIENNALE

IN

SCIENZE GEOLOGICHE

**DISTRIBUZIONE DEI DEPOSITI EOLICI A
OVEST DEL CRATERE ENDEAVOUR
(MERIDIANI PLANUM, MARTE)**

Relatore: Prof. Matteo Massironi

Correlatore: Prof. Aldino Bondesan

Laureanda: Rita Poli

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

Indice

ABSTRACT	
1 – PREMESSA	1
2 – STATO D’ARTE DELLA RICERCA E SCOPO DEL LAVORO	1
3 – OPPORTUNITY E MARTE.....	3
3.1 - La missione.....	3
3.2 - Inquadramento geologico e geomorfologico dell’area.....	4
3.2.1 - Marte.....	4
3.2.2 - Area analizzata.....	5
4 – STRUMENTI E METODI	6
5 – RISULTATI	10
5.1 - Carta geomorfologica	10
5.1.1 - Descrizione delle forme eoliche	11
5.2 - Analisi statistica sui crateri.....	16
5.2.1 - Tipologia di crateri.....	16
6 – DISCUSSIONE RISULTATI	17
7 – CONCLUSIONI.....	21
BIBLIOGRAFIA.....	
SITOGRAFIA	

ABSTRACT

With a specific focus on the Opportunity rover, which is going through Meridiani Planum - located in Mars equatorial region – a morphological investigation through the use of HiRISE: high-resolution images was carried out.

Researches have been performed to understand at what point the study of these environments and their classification was.

There are different forms, for example ripples, TARs, polygonal dunes, transverse dunes, impact craters, ejecta and substrate. From this division a morphological map of the area was created.

More accurate observations showed a particular distribution of polygonal dunes into the craters. For this reason a statistical analysis to determine a possible relationship between the diameters of the craters and the presence of the dunes was carried out. Then a further relationship was investigated between the height of the crater, its diameter and the ability (or not) of wind to transport the sand outside the crater, forming dune fields that go up on the side of the crater itself.

1 – PREMESSA

La tesi verte su un'analisi geomorfologica delle forme eoliche che si riscontrano su Marte. Nello specifico, la zona presa in considerazione è Meridiani Planum, area equatoriale attraversata dal rover Opportunity. L'analisi geomorfologica generale ha portato ad una più dettagliata osservazione delle forme, con particolare riguardo ad anomalie nella distribuzione delle dune.

La scelta dell'argomento è stata dettata dalla curiosità di vedere e ricercare cose nuove ed insolite se confrontate con la Terra. In particolar modo la passione nata durante gli anni di Università per la geomorfologia e l'amore per il Sistema Solare coltivato da anni hanno permesso che nascesse questa tesi che racchiude in sé entrambi gli aspetti.

La tesi si articola in sette capitoli, nei quali sarà descritto il percorso che ha portato al compimento del lavoro, comprendendo gli studi precedenti, un'introduzione geologica dell'area presa in considerazione, le procedure di elaborazione dei dati, i risultati ottenuti e la loro interpretazione, concludono il testo alcuni suggerimenti e prospettive di sviluppo della ricerca.

2 – STATO D'ARTE DELLA RICERCA E SCOPO DEL LAVORO

Ad oggi sono stati svolti molti studi su Marte, con un'attenzione particolare alle zone attraversate dai rover.

Per quanto riguarda l'ambiente eolico marziano, gli studiosi fino ad ora si sono concentrati sullo studio dei regimi e delle caratteristiche dei venti che generano le forme eoliche, come ad esempio riportato in Hayward et al., (2007) e Fenton et al., (2007).

In questi studi si sono presi in considerazione valori di pressione e temperatura che possono influenzare le correnti d'aria, e sono state ricreate le condizioni marziane grazie a simulatori, come ad esempio tunnel del vento.

Ricerche sono state svolte sulle dune che si formano all'interno di crateri poiché presentano vari *slipface*, cioè la parte di duna che è posta sottovento. Tali dune

sono state infatti studiate sia per capirne l'origine, che per studiare la direzione e le stagioni di maggiore influenza dei venti dominanti (Fenton et al., 2005).

Sono stati condotti studi sulla forza che il vento deve avere per poter trasportare i frammenti di basalto prendendo in considerazione la granulometria riportata dai rover, la densità dei basalti e i parametri di pressione, temperatura ed accelerazione gravitazionale (Yizhaq et al., 2012), studi sul movimento delle dune in base ai venti alle modalità di trasporto e sul tempo di trasporto delle particelle.

È stata proposta una classificazione delle forme eoliche presenti su Marte, definendole secondo la classificazione di McKee. Poiché non tutte le tipologie corrispondono a quelle terrestri e anche quelle paragonabili possono avere delle sostanziali differenze, è in atto una ricerca per la creazione di un database in cui vengono riportate le diverse tipologie di forme su Marte e le loro caratteristiche (Hayward et al., 2007).

Argomento tutt'ora molto discusso è costituito dalle Transverse Aeolian Ridges, forme eoliche tipiche marziane (TARs), i cui analoghi terrestri non sono ancora stati trovati. I TARs, a differenza dei ripples o delle dune, attualmente non sembrano subire movimento, probabilmente perché formati da granulometria più grossolana. Si generano trasversalmente rispetto al vento dominante e si possono osservare su tutta la superficie marziana, ma particolarmente concentrati in Meridiani Planum.

Secondo Bourke et al. (2010), Bridges et al. (2012) e Berman et al. (2013), i TARs sono definibili come piccole dune o megaripples, con una lunghezza d'onda compresa tra i 4 m e gli 8 m.

Altri autori, tra cui Balme et al. (2008) ritengono invece che i TARs siano delle vere e proprie dune con lunghezze d'onda tra i 10 m e i 60 m ed un valore medio attorno ai 40. Essi sembrano poter formare creste di varie forme, come ad esempio lineari, a reticolo oppure tipo barcane o barcanoidi terrestri.

Poiché gli articoli pubblicati più recentemente identificano i TARs come più simili a megaripples (Bridges et al., 2012), in questa tesi sono stati classificati come tali.

Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare l'ambiente eolico nel tratto di percorso svolto dal rover Opportunity che si snoda dal cratere Victoria fino alla zona ad ovest del cratere Endeavour, con particolare attenzione ai campi di dune presenti all'interno dei crateri e quelli che ne fuoriescono; ciò per cercare di individuare una probabile relazione tra la dimensione dei crateri e la presenza di campi di dune al loro interno.

3 – OPPORTUNITY E MARTE

3.1 - La missione

Opportunity è un rover che fa parte del progetto MER (Mars Exploration Rovers). Il progetto ha lo scopo di capire se Marte sia, o sia stato, un pianeta abitabile. Per stabilirlo occorrono dati di natura geologica e climatica per comprendere quali siano, o siano state le loro interazioni. Fino ad oggi si sono osservate similitudini tra Marte e la Terra: entrambi presentano atmosfera, idrosfera, criosfera e litosfera. Quello che ancora non si conosce è se il pianeta rosso ha avuto, o potrà avere, una biosfera (<http://mars.jpl.nasa.gov/programmissions/science>).

Il compito del rover è quello di prelevare ed analizzare campioni di materiale dal suolo marziano. Per fare ciò è stato dotato di strumentazioni che consentono l'immediata analisi dei campioni prelevati. Ad esempio, è dotato di una *Panoramic Camera* per identificare la tessitura e la mineralogia del substrato ed un *Alpha Particle X-Ray Spectrometer* (APXS) che serve per misurare le abbondanze degli elementi maggiori (<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/overview/>).

Opportunity atterra sulla superficie di Marte il 24 gennaio 2004. Il luogo dell'atterraggio è Meridiani Planum (Carr, 2006), che si trova nella fascia equatoriale del pianeta.

In realtà il luogo dell'atterraggio non è noto con precisione, perché il rover era protetto da airbag e per questa ragione al momento dell'impatto col suolo marziano Opportunity è rimbalzato per diversi chilometri (http://www.ansa.it/scienza/collection/rubriche/spazioastro/2014/01/08/Dieci-anni-fa-rover-Spirit-Marte_9863969.html).

Il viaggio di Opportunity inizia in uno dei crateri di Meridiani Planum, Eagle Crater e, ad oggi, dopo più di 10 anni, ha percorso 39,44 km (aggiornamento al 04/06/2014 - <http://marsrover.nasa.gov>), vivendo più a lungo di ogni previsione (stimata attorno ai 4 anni di operatività) (fig.1).

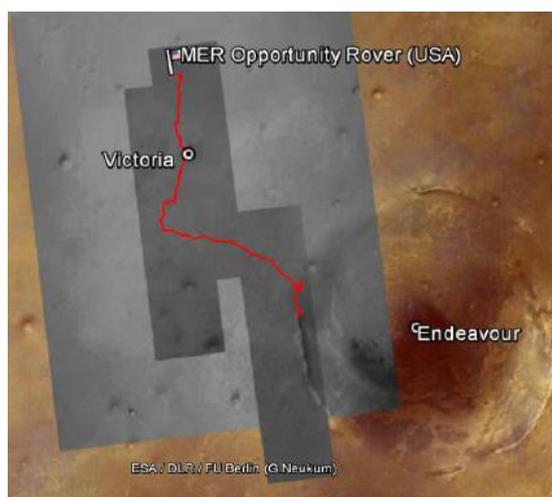


fig.1- percorso di Opportunity [Google Earth]

3.2 - Inquadramento geologico e geomorfologico dell'area

3.2.1 - Marte

Marte è il quarto pianeta del sistema solare e l'ultimo dei pianeti denominati terrestri; presenta un diametro di 6794 km ed un'atmosfera composta da argon (Ar), anidride carbonica (CO₂) e azoto (N₂) (<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Mars>).

Le rocce maggiormente presenti sulla sua superficie sono basalti ricchi in ferro; questo probabilmente deriva dai componenti che sono maggiormente presenti all'interno del pianeta (Carr,2006). Analogamente alla Terra presenta una struttura che comprende:

- crosta composta in prevalenza da silicati;
- mantello superiore che contiene olivina, pirosseno e magnetite;
- mantello inferiore composto da spinello, granato e magnetite;
- nucleo composto in prevalenza da magnetite di alta pressione (Massironi, 2013).

Questa stima della composizione è solo provvisoria e non totalmente accertata a causa della mancanza di dati sismici, che confermino gli studi svolti fino a questo momento; lo studio attualmente si basa sul momento di inerzia e sulla densità media del pianeta (Carr,2006). Per cercare di risolvere questo problema la Nasa sta progettando un lander, che probabilmente sarà attivo dal 2016, chiamato InSight. “InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) si tratta di una missione nell’ambito di NASA Discovery che posizionerà un lander geofisico sul substrato di Marte per studiarne l’interno. (<http://insight.jpl.nasa.gov/home.cfm>).

3.2.2 - Area analizzata

Marte è suddivisa in due emisferi: l’emisfero Nord è caratterizzato dalle pianizie, aree depresse rispetto allo sferoide marziano; l’emisfero Sud, invece, per la maggior parte si presenta elevato rispetto allo sferoide (corso di Geologia ed esplorazione corpi planetari. Prof. Massironi, 2013). Questa particolarità è definita “dicotomia topografica”.

L’area di interesse di questo studio è Meridiani Planum, che si trova nella fascia equatoriale marziana.

In questa zona possiamo riscontrare una vasta area che presenta forme create da processi eolici, la presenza di crateri d’impatto e testimonianze della presenza di acqua allo stato liquido in ere passate (Carr, 2006) .

In quest’area infatti si ritiene che nel tardo Noachiano (4.5- 3.5 miliardi di anni fa), ci fosse stato un oceano, quindi si ipotizza che in questo periodo l’acqua scorresse allo stato liquido sulla superficie di Marte, probabilmente grazie anche ad un’atmosfera densa. Si ritiene che ci fosse molta attività vulcanica. Nell’era Hesperiano (3.5-2.5 miliardi di anni fa) le condizioni climatiche segnarono un periodo di transizione tra le condizioni del Noachiano e le condizioni attuali di Marte. Ci fu un globale raffreddamento del pianeta, con conseguente congelamento dell’acqua e un drastica riduzione dei fiumi, che prima si pensa fossero abbondanti. Nell’era Amazoniana (2.5 miliardi – oggi) le condizioni

climatiche subirono ulteriori modifiche tra cui un assottigliamento dell'atmosfera, temperature molto basse, un clima arido dove solo saltuariamente ci fu acqua, per fusione di ghiaccio, e un vulcanesimo molto ridotto (Vogt, 2008).

Nel tratto di percorso preso in considerazione, che si snoda dal Cratere Vittoria fino a Ovest del cratere Endeavour, si possono riscontrare forme tipiche dell'ambiente desertico, come ad esempio dune di vario tipo, e megaripple, probabilmente sviluppatasi grazie al clima instauratosi nell'era Amazoniana.

Tipica è la presenza di crateri da impatto, cioè crateri che si sono formati successivamente alla collisione tra il pianeta e corpi come asteroidi o comete. I crateri, specialmente quelli più ampi, mostrano la presenza di ejecta, cioè sedimenti, o parti del substrato, che vengono spostate durante l'impatto e che si dispongono attorno al cratere.

4 – STRUMENTI E METODI

Lo studio dell'area attraversata da Opportunity è stato possibile grazie ai programmi Google Earth ed ArcGis.

Attraverso Google Earth è possibile l'esplorazione virtuale della superficie di Marte. Sono infatti pubblicate le missioni dei diversi rover, con la possibilità di visualizzare e scaricare immagini telerilevate e panoramiche da terra.

Le immagini utilizzate provengono dalle camere di ripresa CTX e HiRISE.

Le CTX (Context Camera) servono a dare un contesto geologico e sono state utilizzate assieme alle immagini HiRISE che invece sono utili per visioni di maggior dettaglio. Le immagini CTX sono riprese da una distanza orbitale di 400 km circa e permettono di coprire larghezze di circa 30 km ad una risoluzione media di circa 6m per pixel (<http://mars.jpl.nasa.gov/mro/mission/instruments>).

Le HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) sono immagini ad alta risoluzione, che permettono di studiare la superficie di Marte nel dettaglio: la cui risoluzione è di 30/60 cm per pixel

(<http://mars.jpl.nasa.gov/mro/mission/instruments>).

Una volta scaricate le immagini sono state utilizzate in ArcMap, un modulo del programma ArcGis (<http://www.esri.com/software/arcgis>).

Il formato HiRISE è georeferenziato nativamente. Al contrario le immagini CTX sono sprovviste di coordinate proprie ed è stato dunque necessario georeferenziarle.

Il processo di georeferenziazione è stato possibile grazie al programma ISIS (Integrated System for Imagers and Spectrometers) il quale è nato per trattare dati raw provenienti dalle camere (fig.2). Con il termine raw si intende il file che è stato ripreso dal sensore privo di successiva calibrazione; inoltre l'immagine nel caso di CTX si presenta capovolta. ISIS (<http://isis.astrogeology.usgs.gov/AboutIsis/index.html>) è infatti un programma che utilizza pacchetti di informazioni relativo ad ogni strumento su missioni spaziali esplorative, grazie a tali pacchetti è possibile migliorare la qualità delle immagini anche se rimangono difetti dovuti alle linee di scansione. ISIS quindi permette la georeferenziazione e la calibrazione dell'immagine che può quindi essere utilizzata nel progetto ArcGis.

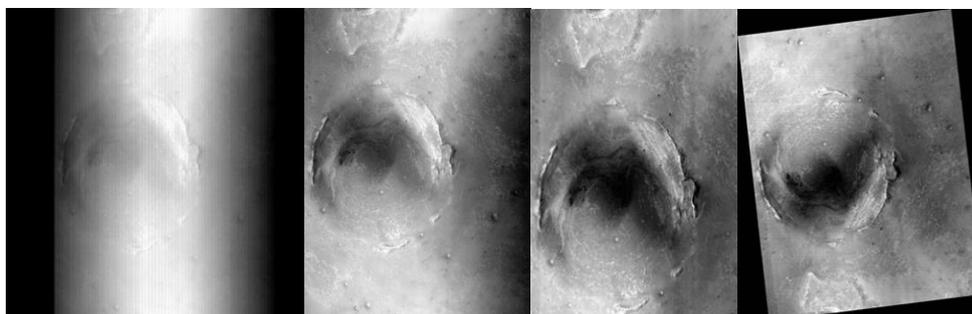


fig.2 Immagini dal formato raw all'immagine calibrata e georeferenziata

Una volta completato tale procedimento, le immagini sono state quindi inserite in ArcMap.

Una prima analisi “sommatoria” delle immagini e dai rover è servita per individuare la presenza di differenti forme eoliche, crateri da impatto e substrato affiorante. Una volta individuati, è stato possibile mappare i diversi ambienti grazie alla creazione di shapefile.

Sulla base di una legenda semplificata sono state cartografate le principali superfici osservabili, sia in funzione della presenza di crateri che di coperture eoliche.

È stata condotta un'analisi statistica sulla presenza di dune all'interno dei crateri, attraverso la misura dei diametri.

L'analisi statistica è stata realizzata sempre grazie all'aiuto di ArcMap. Tramite il programma si è potuto mappare i crateri per osservare quali e quanti all'interno contengano o meno dune, e se le sabbie eoliche riescano o meno ad uscire dal cratere.

Sono stati scelti per lo studio crateri con diametri dai 25 m ai 2700 m, per avere un range di valori che permettesse uno studio su più ampia scala possibile. I crateri con diametro inferiore ai 25 m non sono stati presi in considerazione perché troppo piccoli, la risoluzione dell'immagine è infatti insufficiente a riconoscere le dune interne. Inoltre i crateri mappati sono tutti crateri freschi, cioè non ancora riempiti e completamente coperti da sedimenti.

Individuati i crateri d'interesse e determinata la presenza o meno di dune, sono state calcolate le percentuali di crateri aventi le medesime caratteristiche, suddividendoli in range di valori. Range e percentuali sono stati correlati tramite l'uso di grafici di Excel. Inoltre, per cercare di capire come e per quale motivo si formino dune poligonali nei crateri, è stato necessario calcolare la profondità del cratere e l'altezza del suo rim per verificare una relazione tra questi elementi e la presenza o meno delle dune.

I calcoli sono stati fatti utilizzando la relazione che intercorre tra il diametro del cratere e la profondità e tra il diametro e l'altezza del rim.

La relazione utilizzata per calcolare la profondità è stata quella proposta da Garvin et al., (1998) per crateri semplici:

$$d=0.14*D^{0.90}$$

dove d è la profondità e D è il diametro del cratere.

Per calcolare l'altezza del rim si è utilizzata la seguente formula valida per crateri semplici di diametro inferiore a 3 km:

$$h=0.011*D^{1.3}$$

h è l'altezza del rim, e D è il diametro del cratere.

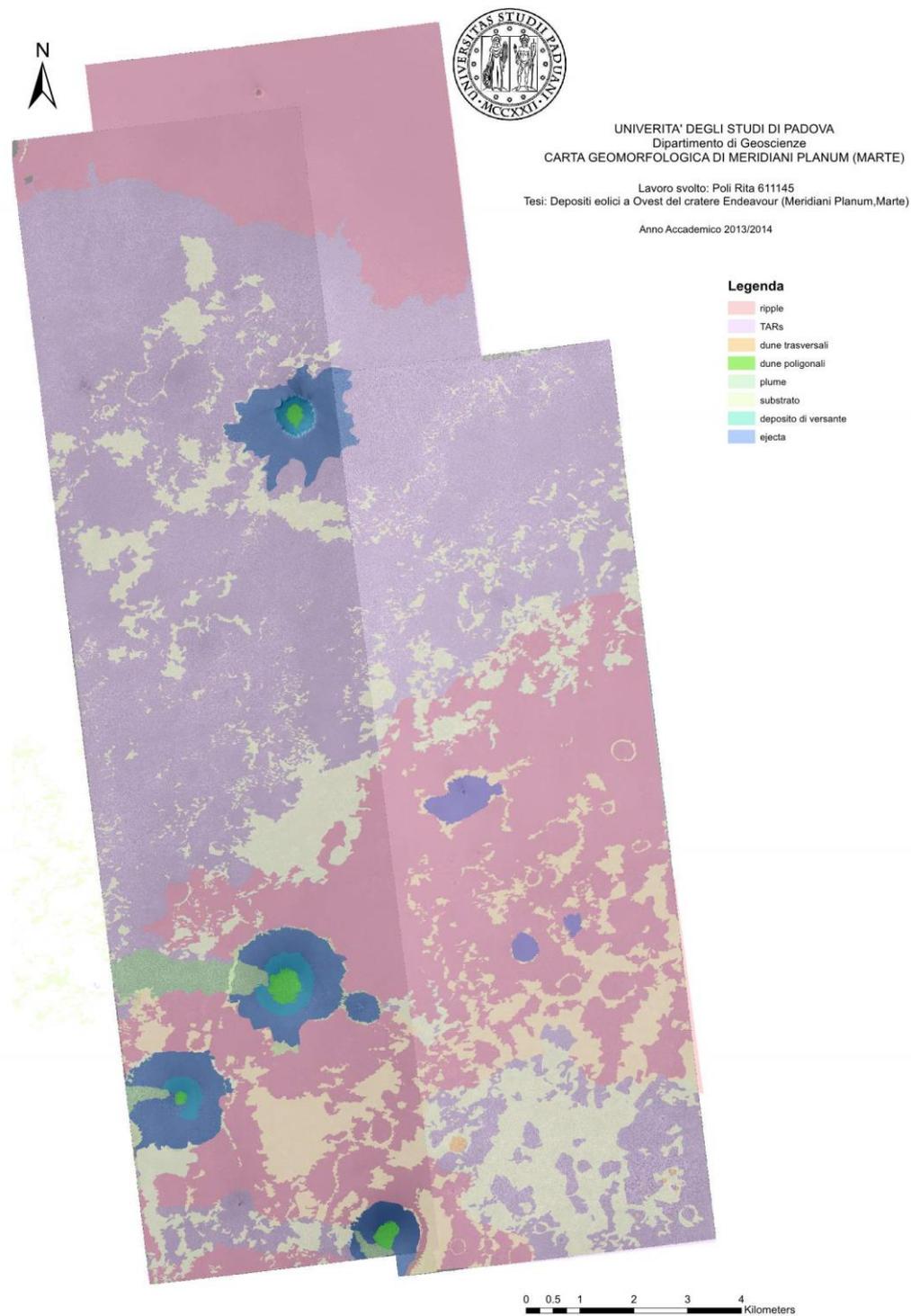
Come nel caso della relazione precedente anche di questa ne esistono versioni diverse, ma nello specifico è stata utilizzata quella usata da Robbins (2012). Le altezze del rim, calcolate per crateri completamente coperti, permettono di calcolare approssimativamente lo spessore delle unità.

Calcolate profondità e altezze sono state cercate le relazioni che potevano intercorrere tra i fattori vento e i parametri del cratere.

I dati ottenuti verranno discussi nei prossimi capitoli.

5 – RISULTATI

5.1 - Carta geomorfologica



Tav.1 - Carta morfologica Meridiani Planum, vedere in appendice carta in scala 1:30000

5.1.1 - Descrizione delle forme eoliche

La superficie marziana è composta in prevalenza da materiale basaltico, così come le sabbie che compongono le forme eoliche. Di seguito vengono riportate le descrizioni di vari ambienti eolici che sono stati individuati nel percorso di Opportunity. Si tratta di 7 ambienti differenti in cui è stata utilizzata una nomenclatura analoga a quella usata per definire le forme eoliche terrestri.

Studi hanno rilevato che in zona equatoriale marziana, tra i 30°N e 30°S i venti dominanti soffiano da est verso ovest (Barlow, 2008).

Ripple

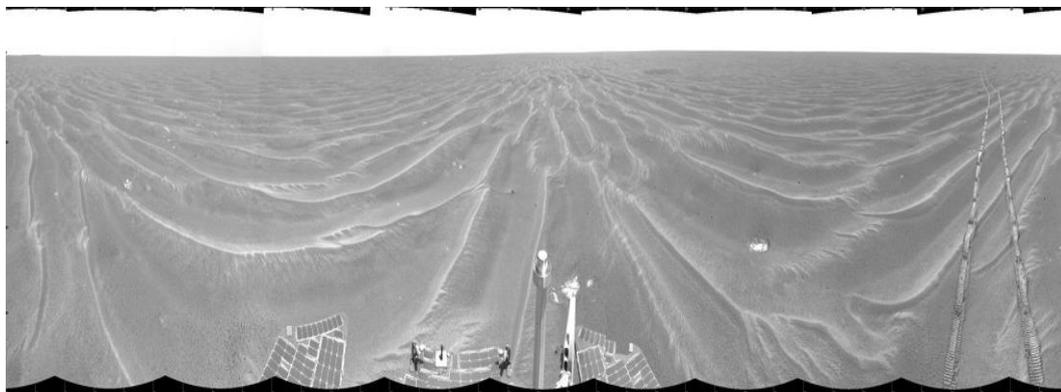


fig.3 Panoramica realizzata da Opportunity in una zona di ripple. Sol 397
(http://mars.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20050315a/merb_sol397_ncam_site48_360_cyl-B406R1_br2.jpg)

Le prime morfologie incontrate dal rover, una volta atterrato, sono stati dei ripple (fig.3), cartografati in Tav.1 con il colore rosa.

Il limite tra i ripple e le dune è stato tracciato in base alla distanza media tra due creste. Le zone contrassegnate come ripple hanno infatti in media una lunghezza d'onda compresa tra 1 m e 3 m (Bourke et al., 2010); questa dimensione non è tipica dei ripple terrestri che hanno una lunghezza d'onda tra i 10 cm e i 60 cm (Ciccacci, 2010), anche se si mantiene una convergenza nella terminologia.

L'andamento dei ripple è generalmente trasversale rispetto al vento dominante (fig.4). Grazie alla relazione che intercorre tra diametro ed altezza del rim (Robbins et al., 2012) si può stimare lo spessore dei ripple a partire dal diametro di crateri coperti. Lo spessore dei ripple è approssimativamente di 70 cm.

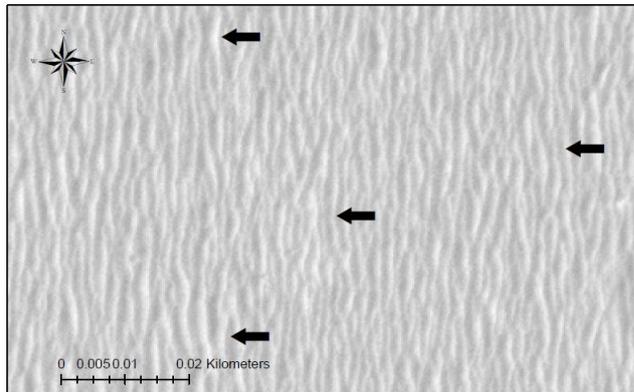


fig.4 Ripple le frecce nere indicano l'andamento del vento da est a ovest (zona di coordinate 1°57'S 5°31'W)

La dimensione delle particelle costituenti i ripples è circa 100 μm , come stabiliscono i dati provenienti dal rover Opportunity (Yizhaq et al., 2012). Queste forme sono strutturate in campi di ripple (Tav.1), di cui quello più a settentrione copre una superficie di circa 28km², mentre quello centrale raggiunge una dimensione di circa 77km².

TARs (Transversal Aeolian Ridges)

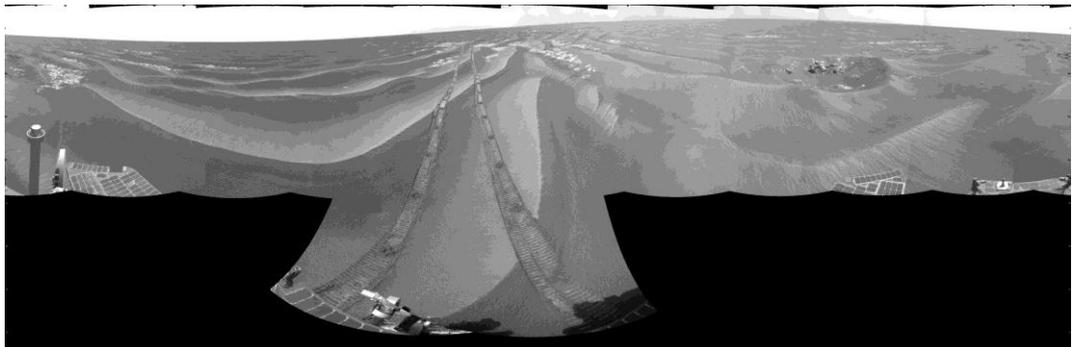


fig.5 Immagine panoramica acquisita dal rover Opportunity in cui vengono ripresi i TARs (http://mars.jpl.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20090715a/B1850_site_B99_495_navcam_CYL_L_br2.jpg)

I TARs (fig.5), rappresentati in Tav.1 con il colore lilla, presentano una lunghezza d'onda compresa fra i 4 m e gli 8 m (Bourke, M.C. et al., ed.2010) ed anche in questo caso la loro formazione prevede che siano disposti trasversalmente rispetto

alla direzione del vento (fig.6). Come in precedenza, si può parlare di campi di megaripple, poiché la loro estensione è di circa 182 km².

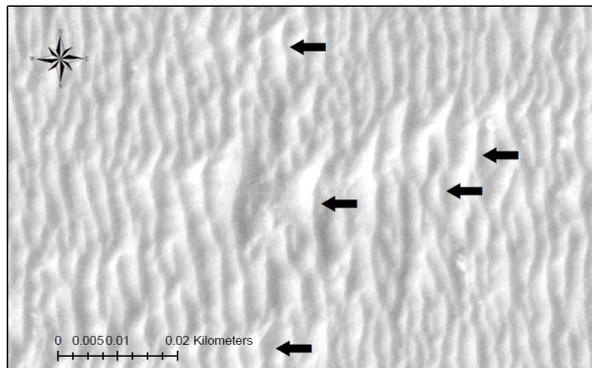


fig.6 Direzione dominante dei venti nella zona dei TARs (zona di coordinate 2°06'S 5°28'W)

Una caratteristica dei TARs è la mancanza di mobilità, probabilmente a causa della grana più grossa dei frammenti che li compongono. Dati relativi alla granulometria dei TARs non sono ancora presenti (http://www.uahirise.org/it/ESP_033262_1725). Con lo stesso metodo usato per i ripple, si approssima lo spessore dei TARs attorno a 2.5 m.

Dune Trasversali

Le dune vengono classificate come tali quando presentano una lunghezza d'onda compresa tra i 10 m e i 40 m (Bourke et al., 2010) e mediamente la distanza tra due creste nell'area d'interesse è risultata di 10 m.

In questa zona lunghezze d'onda simili si rinvengono solamente all'interno di crateri completamente ricoperti da sedimento, ma non è stato trovato alcuno studio in merito.

Le dune trasversali (fig.7) hanno uno spessore all'incirca di 18 m.

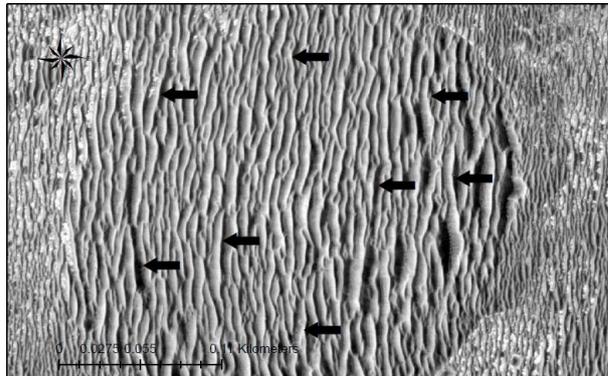


fig.7 Dune trasversali le frecce nere indicano l'andamento del vento (zona di coordinate 2°18'S 5°24'W)

Dune Poligonali

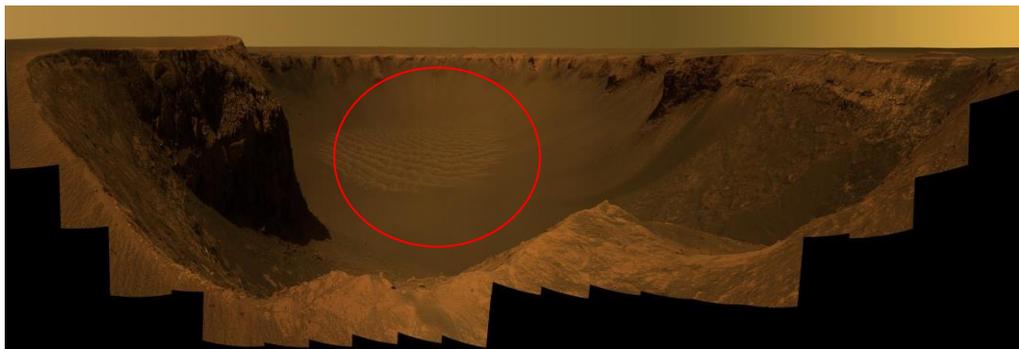


fig.8 Il cerchio evidenzia la presenza di dune poligonali all'interno del cratere

(http://mars.jpl.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20070103a/Sol991B_Cape_Verde_L257atc_br2.jpg)

Questa tipologia di dune è denominata come dune poligonali o dune a stella (fig.8); presentano creste circa parallele tra loro che vengono intersecate da creste che si dispongono quasi perpendicolarmente alle precedenti.

Esse si presentano in campi di dune sul *floor* interno dei crateri; questa è una particolarità in quanto all'esterno dei crateri, nell'area analizzata, non sono presenti forme analoghe. All'interno dei crateri infatti avviene spesso che coesistano più venti che spirano da diverse direzioni, probabilmente perché la profondità del cratere permette l'instaurarsi di moti turbolenti che prelevano la

sabbia e la depositano in modo tale che formi il reticolo che si vede in figura 8 (http://www.uahirise.org/ESP_017036_1665).

In media la lunghezza d'onda rinvenuta per queste dune è di 25m.

Campi di dune che fuoriescono dal cratere (Plume)

Sono caratterizzati dalla presenza di dune longitudinali, con lunghezza d'onda compresa tra 8 m e 10 m.

La particolarità di questi campi di dune è che vengono alimentati dalle dune poligonali presenti all'interno dei crateri, ma la loro presenza è vincolata a determinati valori dimensionali del cratere.

Lo spessore di queste dune si aggira attorno ai 2.1 m.

Substrato

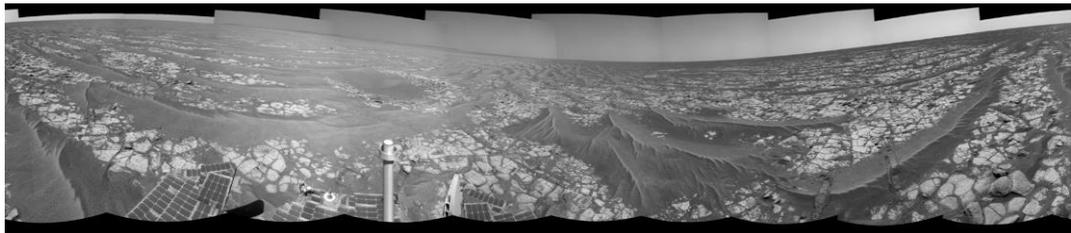


fig.9 immagine panoramica in cui viene mostrato il substrato con la presenza di dune (http://mars.jpl.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20100907a/SolB2335-CambridgeBay_br2.jpg)

Nel percorso di Opportunity si incontrano zone dove si ha prevalenza di substrato (fig.9), più o meno ricoperto da ripple e TARs.

Il substrato è costituito da materiale roccioso fratturato poligonalmente, di probabile composizione basaltica, che subisce corrosione da parte del vento. Il vento, levigando la superficie della roccia, la erode e il materiale formatosi dall'erosione viene accumulato come ripple o TARs.

Deposito di versante

Il deposito di versante si trova sulle pareti dei crateri ed è costituito dal materiale che ricade all'interno di questi ultimi lungo scarpate interne.

Ejecta

Gli ejecta sono depositi tipici dei crateri formati per impatto. Se l'impatto ha un'inclinazione di 45° o maggiore, essi si dispongono in modo approssimativamente circolare attorno al cratere e sono costituiti dal materiale che viene espulso ad alta velocità dal cratere nel momento stesso in cui avviene l'impatto.

Gli ejecta si estendono dal rim per $D/2$, dove D è il diametro del cratere (Melosh, 1985): più esso è grande più grande sarà l'ejecta, infatti la maggiore energia dell'impatto implica una più grande velocità di espulsione e del materiale e quindi la possibilità per i detriti di ricadere più lontano dal cratere.

5.2 - Analisi statistica sui crateri

L'analisi statistica dei crateri è stata condotta per comprendere le dinamiche di deposizione delle sabbie all'interno dei crateri stessi e individuare la relazione che intercorre tra il diametro del cratere e la formazione o meno di dune al suo interno.

Sono stati presi in considerazione crateri freschi, semplici e con un diametro compreso dai 25 m a 2700 m. Il numero totale di crateri trovati con queste caratteristiche nell'area di studio è pari a 72.

5.2.1 - Tipologia di crateri

I crateri sono stati suddivisi in base alla presenza o meno di dune al loro interno, poiché si è notato che non tutti i crateri presentano al loro interno dune e non tutti i crateri che contengono dune mostrano le medesime caratteristiche.

Sono stati riscontrati 4 differenti presenze di sedimenti all'interno dei crateri:

1. Per quanto riguarda crateri con diametro compreso tra 25 m e 38 m, si ha la totale assenza di dune al loro interno, vi è solo la presenza di materiali gravitativi collassati dal versante interno dei crateri. Questo probabilmente

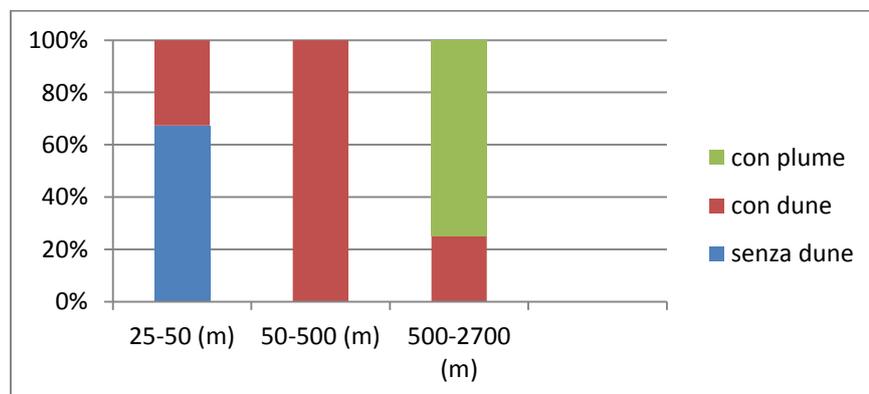
perché l'esigua profondità del cratere non consente l'instaurarsi di un moto turbolento che riorganizzi le sabbie come dune.

2. Crateri con diametro più grande (38 m-710 m) presentano al loro interno delle forme eoliche caratteristiche, classificate come dune poligonali (vedi capitolo 5.1), che non fuoriescono dal cratere, ma rimangono sul fondo del cratere.
3. Crateri con diametri da 1800 m a 2100 m presentano, oltre alle caratteristiche dune, anche un *plume* che viene alimentato dal campo di dune sul fondo della depressione e che fuoriesce dal cratere formando un ulteriore campo di dune longitudinali (vedi capitolo 5.1).
4. Un solo cratere con diametro di 2700 m è stato rinvenuto nell'area d'analisi. Questo presenta al suo interno dune poligonali e un *plume* che però non riesce a fuoriuscire dal cratere.

6 – DISCUSSIONE RISULTATI

Dalla carta geomorfologica si è notata la presenza di diverse forme eoliche. Tra queste, particolare interesse hanno suscitato campi di dune stellate all'interno dei crateri e campi di dune longitudinali fuoriuscenti dai crateri che si osservano solo in poche depressioni.

L'analisi statistica dei crateri svolta su un campione di 72 crateri, con diametri compresi tra i 25 m e i 2700 m, ha evidenziato (tabb.1,2) come in base al diametro si abbia o meno la presenza di dune al loro interno.



tab.1 Percentuale di crateri in relazione al diametro e alla presenza o meno di dune

caratteristica	Intervallo di diametro (m)	Diametro reale (m)	Numero crateri
Senza dune	25-50	25-38	33
Con dune	50-500	38-	36
Con dune e plume	500-2700	710-1800-2140-2700	4

tab.2 Caratteristiche dei depositi eolici nei crateri, morfometria e campione statistico esaminato

Esiste poi una relazione tra il diametro di un qualsiasi cratere, la sua profondità e l'altezza del rim: questi ultimi sono due parametri che associati al diametro possono favorire o meno la presenza di depositi all'interno della depressione.

Il 67.3% dei crateri presenti nell'intervallo 25-50 m non presenta dune al suo interno. Il limite riscontrato che divide i crateri con e senza dune è di circa 38 m: al di sotto di questa soglia non si riscontra materiale che presenta forme eoliche. Questo fatto potrebbe essere spiegabile con le ridotte dimensioni di questi crateri, probabilmente troppo piccoli per fungere da trappola per i sedimenti. Per questo range di valori sono state calcolate, tramite la relazione di Garvin et al., (1998), profondità comprese tra 2.5 m e 3.6 m e un'altezza totale, data dalla somma tra la profondità e l'altezza del rim del cratere rispetto alla superficie, che è compresa tra i 3.3 m e i 4.8 m. Probabilmente le esigue altezze non permettono l'intrappolamento di materiale, ma favoriscono la sua deflazione.

Il rimanente 32.7% di questo intervallo ha crateri di dimensioni comprese tra i 38 m e i 50 m e mostra la presenza di dune all'interno.

Probabilmente il maggiore diametro in associazione con una maggiore profondità ed altezza totale, rispettivamente tra i 3.7 m e i 4.7 m e tra 4.9 m e 6.5 m, permette la ritenzione dei sedimenti che possono essere modellati dal vento.

Il 100% dei crateri compresi tra i 50 m e i 500 m mostrano al loro interno la presenza di dune poligonali. Il motivo, anche in questo caso, è da ricercarsi nelle sempre maggiori dimensioni. Aumentando i valori di profondità, altezza e diametro i crateri possono essere interpretati come barriere topografiche che permettono di creare una trappola per i sedimenti e l'instaurarsi di regimi dei venti che creano queste particolari dune (vedi capitolo 5.1.1).

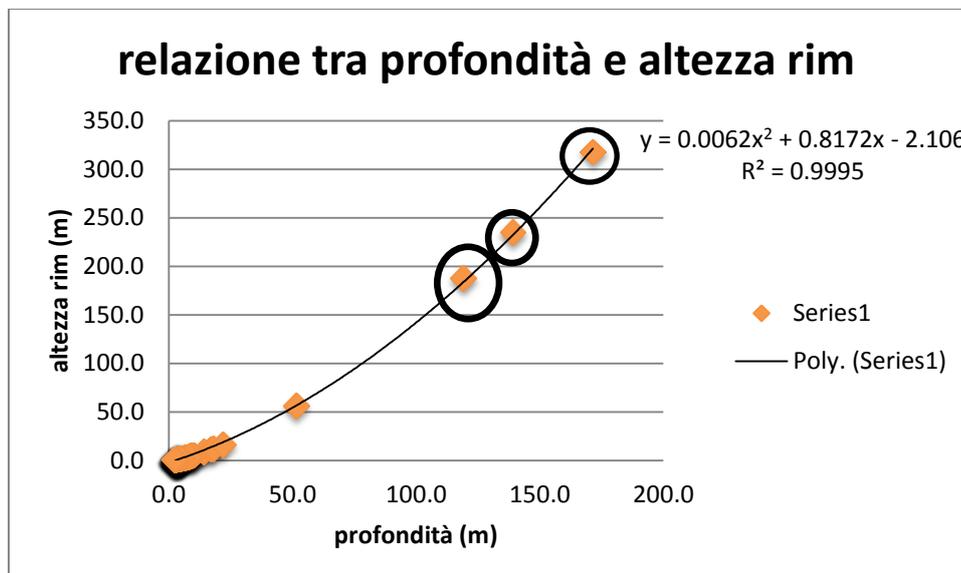
Arrivando al range di valori compreso tra i 500 m e i 2700 m si nota in tabella 1 che il 25% dei crateri presentano dune all'interno, mentre il 75% presenta sia le dune che un *plume*. Particolarmente degni di nota sono i crateri compresi tra i 1800 m-2140 m. Questi crateri presentano infatti una particolarità non riscontrata in nessun altro range di valori: sono caratterizzati da un campo di dune trasversali che risale il versante e fuoriesce da esso continuando anche all'esterno.

Il *plume* sembra essere alimentato direttamente dal campo dune stellate presenti all'interno del cratere.

Il cratere da 2700 m, invece, mostra un accenno di *plume* che a differenza degli altri due crateri non riesce a fuoriuscire dal bordo del cratere.

Come si può notare, le dimensioni degli ultimi tre crateri citati non differiscono per ordine di grandezza gli uni degli altri, e questo pone la domanda riguardante il perché in due casi il *plume* fuoriesca e in un solo caso no.

Nella bibliografia e sitografia consultata non si fa riferimento a questi particolari casi, ma probabilmente un'ipotesi del perché questo accada si può cercare nella relazione che intercorre tra la profondità del cratere e l'altezza del rim (tab.3).



tab.3 Andamento delle profondità rispetto all'altezza del rim, con una trendline.

Come rappresentato in tabella 3, profondità e altezza del rim non mostrano un andamento lineare, bensì polinomiale. La curva mostra come ad una profondità di circa 50m il rapporto tra profondità e altezza del rim sia pari a 1, mentre per valori più grandi il rapporto aumenta.

I valori del grafico (tab.3) cerchiati corrispondono rispettivamente ai diametri 1800 m, 2140 m e 2700 m; in questi valori oltre ad assistere ad un aumento del rapporto h/p si nota anche un aumento del dislivello tra i valori, infatti, a fronte di un aumento modesto delle profondità nei tre crateri, si ha un forte aumento nelle altezze del rim (tab.4)

Diametro (m)	Profondità (m)	Altezza del rim (m)	Altezza totale (m)
1800	119	187	306
2140	139	234	374
2700	171	318	489

tab.4 Valori di profondità e altezza dei crateri presi in considerazione

Considerando le particolari forme dunari presenti all'interno delle depressioni, si può intuire come si instaurino condizioni differenti rispetto all'esterno. È comune nei crateri marziani che i venti soffino in contemporanea da direzioni differenti, formando le tipiche strutture sopra descritte.

La presenza di un cratere come barriera topografica potrebbe inoltre far aumentare l'energia del vento, secondo una sorta di "Effetto Venturi"

(<http://www.scialp.it/nivologia/suolo2.htm>), e permettere il trasporto di materiale verso l'esterno. Dai valori di altezza totale (tab.4) si può notare come ci sia un ampio dislivello di altezza totale tra il cratere da 2140 m e quello da 2700 m; probabilmente proprio questo aumento di altezza rispetto al cratere con diametro 2140 m potrebbe essere la causa della mancata fuoriuscita del plume nel cratere più grande.

La spiegazione del perché i crateri di dimensioni inferiori ai 1800m non abbiano un *plume* potrebbe essere ricercata sempre nelle loro altezze totali, che non

essendo eccessivamente elevate, possono essere superate dal vento senza rilascio di materiale sui versanti del cratere.

7 – CONCLUSIONI

Lo studio dell'area Meridiani Planum ha consentito una migliore comprensione delle dinamiche che intercorrono tra ambiente di formazione e presenza di dune.

Nel capitolo “Stato dell'arte” sono state descritte le ricerche fatte fino a questo momento: esse mostrano come ci sia ancora tanto da scoprire e da discutere sulle forme eoliche marziane in senso stretto e sui processi dinamici, che cooperano alla loro creazione.

È stata poi presentata una breve panoramica sulla missione Opportunity e le missioni future sul pianeta rosso, descrivendo gli strumenti, i software e il metodo che è stato utilizzato per creare la carta morfologica e per ottenere un'analisi statistica sui crateri.

I risultati hanno mostrato come esista una relazione tra il diametro dei crateri e la presenza di dune, poiché l'indagine statistica ha messo in evidenza che per diametri inferiori a 38 m non vi è presenza di dune all'interno, mentre in tutti i crateri più grandi si osservano dune a stella. Inoltre dall'analisi statistica è risultato che crateri con diametri tra i 1800 m e i 2700 m si ha la formazione di un campo di dune uscente dal cratere.

Entrambi questi argomenti non sono stati ampiamente trattati dalle ricerche scientifiche effettuate fino ad ora, la letteratura scientifica non riporta molte citazioni su questi argomenti.

Sarebbe interessante incrementare l'acquisizione di immagini HiRISE, per poter esaminare una superficie più ampia e rendere più robusta l'analisi statistica. Un campione statistico più esteso e un approfondimento sul regime dei venti potrebbe fornire utili indizi, per la comprensione dei meccanismi di formazione e della dinamica delle dune nei crateri.

BIBLIOGRAFIA

Michael H. Carr (2006), *The Surface of Mars*

Gregory L. Vogt (2008), *Landscape of Mars a visual tour*

James B . Garvin e James J . Frawle (1998), *Geometric properties of Martian impact craters: Preliminary results from the Mars Orbiter Laser Altimeter*

Stuart J. Robbins e Brian M. Hynek¹ (2012), *A new global database of Mars impact craters ≥ 1 km: 2. Global crater properties and regional variations of the simple-to-complex transition diameter*

Bourke, M.C., et al., (2010), *Extraterrestrial dunes: An introduction to the special issue on planetary dune systems, Geomorphology*
doi:10.1016/j.geomorph.2010.04.007

Bridges et al, (2012), *Formation conditions for coarse-grained megaripples on Earth and Mars: Lessons from the Argentinean Puna and wind tunnel experiments*

Berman et al, (2013), *Further investigation of Transverse Aeolian Ridges on Mars*

H. Yizhaq et al., (2012), *Basaltic and ripples in Eagle crater as indirect evidence for the hysteresis effect in Martian saltation*

Lori K. Fenton et al. (2005), *Aeolian processes in Proctor Crater on Mars: Mesoscale modeling of dune-forming winds*

Corso di Geologia ed esplorazione corpi planetari. Prof. Massironi, 2013

Sirio Ciccacci (2010), *Le forme del rilievo. Atlante illustrato di geomorfologia*

Matt Balme et al.(2008), *Transverse Aeolian Ridges (TARs) on Mars*

Melosh (1985), *The impact ejection of living organisms into space*

Barlow (2008), *Mars:an intoduction its interior, surface and atmosphere*

SITOGRAFIA

NASA's Mars Exploration Program's Science Theme,
<http://mars.jpl.nasa.gov/programmissions/science>

http://www.cnr.it/istituti/Allegato_65397.pdf (ultima visita 13/06/2014)

Dieci anni fa il rover Spirit su Marte,
http://www.ansa.it/scienza/collection/rubriche/spazioastro/2014/01/08/Dieci-anni-fa-rover-Spirit-Marte_9863969.html (ultima visita 10/06/2014)

OPPORTUNITY UPDATE: Opportunity Recovering From Flash Memory Problem, <http://marsrover.nasa.gov> (ultima visita 10/06/2014)

InSight... into evolution of the terrestrial planets,
<http://insight.jpl.nasa.gov/home.cfm> (ultima visita 13/06/2014)

HiRISE e CTX, <http://mars.jpl.nasa.gov/mro/mission/instruments> (ultima visita 13/06/2014)

Summary <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/overview> (ultima visita 3/07/2014)
<http://isis.astrogeology.usgs.gov/AboutIsis/index.html> (ultima visita 7/06/2014)

http://mars.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20050315a/merb_sol397_nca_m_site48_360_cyl-B406R1_br2.jpg

Il vento e il trasporto della neve <http://www.scialp.it/nivologia/suolo2.htm>
Star Dunes in Crater in Tyrrhena Terra
http://www.uahirise.org/ESP_017036_1665

immagine panoramica sol 18500
http://mars.jpl.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20090715a/B1850_site_B9_9_495_navcam_CYL_L_br2.jpg

immagine panoramica sol 991
http://mars.jpl.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20070103a/Sol991B_Cape_Verde_L257atc_br2.jpg

immagine panoramica sol 2335
http://mars.jpl.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20100907a/SolB2335-CambridgeBay_br2.jpg

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare i miei genitori che mi hanno permesso di fare la mia scelta e proseguirla fino in fondo, ai Professori Matteo Massironi e Aldino Bondesan che mi hanno aiutata e sono sempre stati molto disponibili.

Un ringraziamento speciale va alla mia migliore amica, che mi costringeva a passare giornate e notti in Frinzi a studiare, così sono riuscita a passare tutti gli esami.

Al mio amore Enrico che mi ha sopportata e aiutata sia con l'italiano che con l'inglese.

Ai miei compagni di corso coi quali abbiamo affrontato esami e campi vari: saranno sempre dei ricordi bellissimi.

Grazie a tutti coloro che sono qui oggi per festeggiare con me questo giorno importante, grazie anche a chi non è potuto venire per impegni o problemi o perché si trova in un altro stato e a chi non c'è più, perché sono sicura che mi abbia accompagnato in questi anni.

Grazie ai miei nonni che anche se non sono potuti essere qui fisicamente ci sono col pensiero.

Si ringraziano anche i miei piccoli mostriciattoli per aver sopportato i miei momenti di sclero, in particolare Simone, visto che Isa non era mai a casa, (brutta che non eri a casa TVB) e Noce per aver contribuito/impedito, a suo modo, alla stesura della tesi.