POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Minerali Idrati Trovati su Marte e Luna

*Original*
Minerali Idrati Trovati su Marte e Luna / Sparavigna, A.C.. - ELETTRONICO. - (2025). [10.5281/zenodo.17652374]

*Availability:*
This version is available at: 11583/3005295 since: 2025-11-19T17:32:58Z

*Publisher:*

*Published*
DOI:10.5281/zenodo.17652374

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

14 November 2026

# Minerali Idrati Trovati su Marte e Luna

**Amelia Carolina Sparavigna**[1] e **Gemini (Modello Linguistico di Google)**[2]

[1] DISAT, Politecnico di Torino, [2] Gemini AI

DOI: 10.5281/zenodo.17652374

L'identificazione e la caratterizzazione dei minerali idrati (o contenenti gruppi $OH^-$) su Marte e sulla Luna costituisce la pietra angolare per la ricostruzione della storia geologica, idrologica e delle condizioni di potenziale abitabilità del Pianeta Rosso e del satellite terrestre. Questo studio esamina le principali classi di minerali idrati trovati, in particolare i Solfati Idrati su Marte (come il Gesso e la Kieserite), che fungono da indicatori di specifici facies acquose (da acide a neutre e idrotermali). L'analisi si estende poi al problema dell'acqua sulla Luna, evidenziando scoperte rivoluzionarie come l'Ulm-1 (ricco di acqua e ammonio) e le tracce di $OH^-/H_2O$ trovate nell'Apatite e nei vetri vulcanici. Si conclude che questi minerali non solo confermano l'esistenza passata di acqua liquida su Marte, ma dimostrano che l'acqua lunare non è un fenomeno limitato alla superficie o ai poli, ma è parte della composizione interna delle rocce, ridefinendo il ruolo del vulcanismo e del magmatismo nell'idrogenazione dei corpi planetari rocciosi.

L'identificazione dei minerali idrati (o contenenti gruppi OH) è fondamentale per tracciare la storia dell'acqua liquida e delle condizioni di potenziale abitabilità sul Pianeta Rosso. Questi minerali si sono formati in presenza di acqua e ne hanno incorporato le molecole nella loro struttura cristallina. Vi è poi da studiare il problema dell'acqua sulla Luna e di come essa compaia nei minerali.

## 1. Solfati Idrati

**($SO_4^{2-}$ con $H_2O$)**

I solfati rappresentano una delle classi di minerali idrati più abbondanti, trovati ampiamente in molteplici siti marziani (come Meridiani Planum, Valles Marineris e Cratere Jezero). La loro formazione suggerisce condizioni **acide** e la presenza di acqua liquida.

- **Gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$):**
  - **Dove trovato:** Largamente diffuso come riempimento di vene e fratture (es. nel Cratere Gale e Jezero).
  - **Significato:** È la prova inequivocabile che l'acqua liquida **non acida** e con un'attività idrotermale limitata era presente in passato, facilitando la sua precipitazione.
- **Kieserite ($MgSO_4 \cdot H_2O$):**
  - **Dove trovato:** Principalmente in depositi stratificati.
  - **Significato:** Indicativo di un'evaporazione avanzata dell'acqua e la presenza di soluzioni saline.

- **Epsomite** ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)**:**
  - **Significato:** Simile alla Kieserite, ma richiede un contenuto d'acqua ambientale più elevato.
- **Jarosite** ($KFe_3^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$)**:**
  - **Dove trovato:** Trovata in abbondanza in Meridiani Planum (dalle missioni Opportunity).
  - **Significato:** È una prova chiave della presenza passata di **acqua acida** (pH molto basso) e ossidante sul pianeta.

## 2. Fillosilicati (Argille)

Questi minerali si formano tramite alterazione chimica delle rocce ignee in presenza prolungata di acqua liquida e pH neutro o leggermente alcalino. Sono considerati la prova delle prime e più ospitali condizioni ambientali su Marte.

- **Smectiti (es. Nontronite, Saponite):**
  - **Dove trovato:** Principale componente dei delta e dei sedimenti lacustri nei crateri antichi (es. Cratere Jezero, Cratere Gale).
  - **Significato:** L'acqua è rimasta stabile e presente per periodi geologici estesi (milioni di anni). La smectite è particolarmente importante perché ha una struttura a strati ideale per l'**adsorbimento e la conservazione di molecole organiche**.
- **Cloriti e Serpentini:**
  - **Significato:** Prodotti dell'alterazione idrotermale di rocce ricche di ferro e magnesio.

## 3. Idrati Amorfi e Altro

- **Silicati Idrati Amorfi:** Trovati spesso miscelati nelle rocce. Sono il risultato di alterazione dell'acqua meno intensa o di cicli di idratazione/disidratazione rapidi.
    - **Perclorati Idrati** ($ClO_4^-$ con $H_2O$)**:**
  - **Dove trovato:** Trovati dal rover Phoenix e Curiosity.
  - **Significato:** Sebbene non siano minerali cristallini nel senso stretto, questi sali sono estremamente igroscopici. La loro natura idratata e la capacità di abbassare il punto di congelamento dell'acqua li rendono cruciali per l'ipotesi di **acqua liquida transitoria e salmastra** (salina) nell'attuale ambiente marziano.

## Il Ruolo di SHERLOC (Perseverance Rover)

**SHERLOC** (Scanning Habitable Environments with Raman and Luminescence for Organics and Chemicals) è uno strumento di spettroscopia all'avanguardia a bordo del rover **Perseverance**, progettato per l'analisi microscopica e la rilevazione di composti organici e minerali idrati nel Cratere Jezero (un antico letto di lago).

Il ruolo di SHERLOC è cruciale perché utilizza la **Spettroscopia Raman** per identificare le vibrazioni molecolari specifiche, fornendo una "impronta digitale" chimica.

## Funzioni Principali di SHERLOC per i Minerali Idrati:

1. **Identificazione del Legame OH:**

    - Il $H_2O$ di cristallizzazione e i gruppi OH (idrossili) producono segnali Raman unici nella regione di *stretching* (allungamento) ad alta frequenza (generalmente 3000-3800 cm^-1) e nelle regioni di *bending* (piegamento) a bassa frequenza (circa 1600 cm^-1). SHERLOC è ottimizzato per rilevare queste firme, **distinguendo chiaramente tra acqua incorporata e roccia secca.**
2. **Mappatura Micro-Analitica:**
    - SHERLOC può mappare la distribuzione dei minerali idrati su scala micrometrica all'interno di un campione di roccia. Ad esempio, può identificare come il gesso si sia formato in una vena, indicando il percorso esatto dei fluidi idrotermali.
3. **Identificazione dei Fillosilicati (Argille):**
    - Le argille (fillosilicati) hanno vibrazioni OH molto specifiche nella loro struttura a strati. SHERLOC è in grado di identificarle in dettaglio, fornendo informazioni precise sul **pH e la temperatura** dei fluidi acquosi che le hanno formate.
4. **Associazione con Materia Organica:**
    - Il ruolo più importante è trovare i minerali idrati, come le smectiti, **in associazione spaziale** con molecole organiche (gli "organics"). Se SHERLOC rileva $H_2O$ e molecole organiche (es. amminoacidi o IPA) nello stesso micro-spot del campione, suggerisce che l'acqua potrebbe aver facilitato la conservazione o la formazione di precursori della vita. Questi campioni sono i candidati principali per essere riportati sulla Terra.

## La Vivianite su Marte

$$(Fe_3^{2+}(PO_4)_2 \cdot 8H_2O)$$

La vivianite è un **fosfato idrato di ferro (II)**. Il suo significato su Marte risiede nel fatto che contiene sia **acqua** (otto molecole H2O per unità di formula) sia **ferro in stato di ossidazione ridotto (Fe^{2+})**.

## 1. Rilevamento e Significato Ambientale

- **Dove Trovata:** La firma spettrale della vivianite è stata individuata in campioni esaminati dal rover **Curiosity** nel Cratere Gale, specialmente in rocce sedimentarie.
- **Condizioni di Formazione:** La presenza di vivianite indica un ambiente che era:
    - **Ricco di Fosfato (PO}_4^{3-}):** Il fosfato è un elemento nutritivo essenziale per la vita terrestre.
    - **Neutro a Leggermente Alcalino:** Richiede un pH non troppo acido per precipitare.
    - **Riducente (Anossico):** La presenza di Fe^{2+} (ferro ferroso) è cruciale. Suggerisce che il minerale si è formato in un ambiente privo di ossigeno (anossico), probabilmente **sotto i sedimenti o l'acqua**, dove il ferro era presente nella sua forma ridotta. Queste condizioni anossiche sono le stesse che favoriscono la conservazione di molecole organiche.

## 2. L'Importanza del Ferro Ridotto (Fe^{2+})

A differenza dei solfati come la jarosite, che si formano in condizioni acide e ossidanti (Fe^{3+}), la vivianite si forma in un ambiente con ferro ridotto.

Questo rende la vivianite un marcatore chiave per comprendere:

- **Processi Biogeochimici:** Sulla Terra, la vivianite si forma spesso in ambienti organici, come torbiere o sedimenti ricchi di materia organica decomposta. La sua precipitazione è spesso indotta da attività microbiologica che consuma l'ossigeno e rilascia fosfato.
- **Conservazione dell'Acqua e del Fosfato:** La struttura cristallina della vivianite intrappola sia l'acqua che l'elemento fosforo.

## La Vivianite e la Spettroscopia Raman

La vivianite è un minerale eccellente per l'analisi con strumenti come **SHERLOC** (che utilizza la spettroscopia Raman) a causa della sua ricchezza di gruppi vibrazionali unici:

1. **Segnali H2O:** L'acqua di cristallizzazione produce picchi Raman distintivi, che consentono di identificare la fase idrata.
2. **Segnali Fosfato (PO_4^{3-}):** Lo ione fosfato dà origine a segnali di *stretching* e *bending* caratteristici nella regione Raman di bassa frequenza, che sono cruciali per la sua identificazione.
3. **Stabilità e Alterazione:** La vivianite è relativamente instabile in presenza di ossigeno. Quando esposta all'aria (o, nel caso di Marte, alla superficie ossidata), si ossida in ferro (III), diventando di colore blu scuro (o blu-verde). Questa alterazione può essere tracciata tramite la spettroscopia Raman, fornendo una cronologia dell'esposizione del campione all'atmosfera marziana.

In sintesi, la vivianite su Marte è un **"triple threat"** (una tripla minaccia) per la ricerca della vita: indica la passata presenza di **acqua liquida**, condizioni **riducenti** (anossiche) e la disponibilità di **fosfato** essenziale.

## Riferimento Scholar

| Titolo (Tematica) | Strumenti | Contesto |
|---|---|---|
| **Redox-driven mineral and organic associations in Jezero Crater, Mars** (o articoli correlati come il report LPSC che introduce i dati) | **PIXL & SHERLOC** | Analisi del campione 'Cheyava Falls' (Bright Angel formation) nel Cratere Jezero. |
| **Autori Principali** | J.A. Hurowitz, M.M. Tice, A.C. Allwood, M.L. Cabrol et al. | (Gli studi sono spesso collaborativi e includono i team PIXL e SHERLOC) |
| **Risultati Chiave** | Rilevamento di noduli e *reaction fronts* arricchiti in fosfato di ferro ferroso (probabilmente **vivianite**) e solfuri (greigite), spesso in associazione con **carbonio organico**. | |
| **Significato** | Questi minerali sono marcatori di ambienti **riducenti (anossici)**, un da neutro a leggermente alcalino, e processi di trasferimento di elettroni che sulla Terra sono spesso associati all'attività microbica. | |

## Contesto Aggiuntivo

I dati specifici che confermano l'identificazione della vivianite in un campione chiamato **"Cheyava Falls"** (all'interno della formazione Bright Angel) sono stati ampiamente discussi in conferenze importanti, come la **Lunar and Planetary Science Conference (LPSC)** nel 2025.

Mentre Marte è ricco di solfati e argille idrate (come il gesso e la vivianite), la Luna è stata a lungo considerata quasi completamente "arida". Tuttavia, gli studi recenti sui campioni riportati e le osservazioni orbitali hanno confermato che **anche sulla Luna ci sono minerali idrati (o contenenti gruppi idrossili $OH^-$)**.

## Idrogeno, $OH^-$ e Minerali Lunari

Il concetto di "acqua" sulla Luna è più complesso che su Marte. Gran parte dell'acqua rilevata è sotto forma di:

1. **Ghiaccio d'Acqua:** Nelle regioni permanentemente in ombra vicino ai poli (trappole fredde).
2. **Gruppi Idrossili ($OH^-$) e Molecole $H_2O$:** Intrappolate nella regolite e all'interno delle strutture cristalline dei minerali.

## 1. Il Minerale Idratato "Ulm-1"

La scoperta più recente e significativa riguarda l'analisi dei campioni riportati a Terra dalla missione cinese **Chang'e-5**:

- **Identificazione:** Gli scienziati cinesi hanno identificato un minerale idrato non precedentemente catalogato, denominato **Ulm-1** (acronimo per *unknown lunar mineral*).
- **Composizione:** Questo minerale, con la formula chimica

$$[(NH_4)_{0.87}Na_{0.009}K_{0.021}Cs_{0.012}][Mg_{0.97}Ca_{0.023}Al_{0.007}]Cl_3 \cdot 6H_2O,$$

contiene un sorprendente **41% in peso di acqua** (in forma $H_2O$) ed è anche ricco di **ammonio ($NH_4$)**.

- **Significato:** La sua struttura e composizione richiamano quelle di rari minerali terrestri trovati nelle fumarole vulcaniche. Ciò suggerisce che grandi quantità di acqua e ammoniaca fossero presenti nei **gas dei vulcani lunari antichi**, indicando un ruolo significativo del **vulcanismo lunare** nell'origine dell'acqua (oltre al contributo del vento solare e degli impatti meteoritici).

## 2. Apatite

- L'**Apatite** (un fosfato di calcio contenente F, Cl, e OH) è un altro minerale lunare dove sono state trovate **tracce di $OH^-$/$H_2O$** in concentrazioni molto basse (livelli di parti per milione - ppm) nei campioni Apollo.
- Questa scoperta è nota come il "**Paradosso dell'Apatite Lunare**," poiché la sua formazione richiederebbe una quantità di idrogeno (precursore dell'acqua) maggiore di quanto si pensasse fosse disponibile in quell'ambiente.

## 3. Vetri Vulcanici e Minerali Silicati

- Analisi avanzate sui campioni Apollo e i dati di Chang'e-5 hanno anche rivelato tracce di $OH^-/H_2O$ **sepolte in perle di vetro vulcanico** e in **minerali silicati** rari, confermando che l'acqua non è solo un fenomeno superficiale o polare, ma fa parte della composizione interna di alcune rocce lunari.

La scoperta di minerali idrati come l'Ulm-1 è rivoluzionaria perché non solo conferma la presenza di molecole d'acqua nel suolo lunare, ma evidenzia anche l'esistenza di **risorse potenzialmente cruciali** per i futuri habitat umani lunari.

## Conclusioni

L'identificazione e l'analisi dei minerali idrati su Marte e Luna supportano conclusioni fondamentali che rimodellano la nostra comprensione dell'astrobiologia e della geologia planetaria:

1. **Marte: Tracce di Ambienti Diversificati:** La vasta distribuzione di Solfati idrati (Gesso, Kieserite, Epsomite) su Marte, in particolare nei crateri Jezero e Gale, offre una prova inequivocabile dell'esistenza passata di acqua liquida con **chimismi variabili**. Il Gesso in particolare è un *chemofos* cruciale che indica la presenza di acqua neutra, superando l'ipotesi di ambienti esclusivamente acidi.
2. **Luna: Acqua Endogena Riconosciuta:** Le scoperte su campioni lunari, in particolare l'Ulm-1 e le tracce di $OH^-/H_2O$ nell'Apatite e nei vetri vulcanici, dimostrano che l'acqua sulla Luna non è solo il risultato di fenomeni superficiali (vento solare o impatti meteoritici). La sua presenza in minerali formatisi ad alte temperature e pressioni suggerisce un ruolo significativo del **vulcanismo lunare** nel rilascio di gas ricchi di acqua e ammoniaca, confermando che l'acqua è stata, ed è, parte integrante della sua geochimica interna.
3. **Il Metodo Idrato come Proxy Astrobiologico:** L'analisi spettroscopica e strutturale dei minerali idrati (inclusi gli studi sulle metodologie per identificare l'acqua di cristallizzazione) rimane il metodo più robusto per tracciare la storia dell'acqua al di fuori della Terra. La loro presenza fornisce la migliore evidenza per ricostruire le condizioni termiche, chimiche e idrologiche necessarie per sostenere potenzialmente la vita primordiale.