

Appunti Molecular Design

Saul Pierotti

April 3, 2019

Lex.1

Lex.2

- Le simulazioni di docking hanno una precisione sull'ordine degli Angstrom

Dati chimici, farmaceutici e biologici

- I dati di struttura possono essere archiviati in vari formati
 - pdb è tipico di macromolecole
 - mol2 è usato per piccole molecole
- Tutti i formati riportano delle informazioni essenziali, e altre non essenziali
 - Il tipo di atomo
 - Le coordinate atomiche xyz
 - Non è necessario inserire i legami, poichè sono dedotti dalle distanze atomiche
 - * In alcuni formati è comunque riportata una matrice di connettività
 - Spesso sono riportate informazioni sulla confidenza della posizione
 - * La confidenza è assoluta per strutture calcolate e non sperimentali
 - Può essere riportata la densità di carica elettronica dei vari atomi
 - * Viene salvata per evitare di ricalcolarla
 - Può essere riportata la geometria molecolare, ossia lo stato di ibridazione

Formato PDB

- Riporta il tipo di atomo, l'aminoacido, le coordinate
- La precisione è riportata tramite il B-factor
 - La vibrazione termica causa incertezza nella misura
- ATOM indica tutti gli atomi che partecipano alla struttura di aminoacidi
- HETATM indica atomi di solvente, piccole molecole, ecc.
- Gli H non sono mai presenti perchè non visibili ai raggi X, ma possono essere inseriti su modelli virtuali

Metodi sperimentali

- Tramite cristallografia ai raggi X, specie per macromolecole
- Per piccole molecole si usa più NMR
 - Più per ottenere la struttura, che la conformazione
 - Oggi sono usati spettrometri NMR anche per le proteine, anche se non è sempre applicabile
 - Non serve il cristallo (!)
- Per misurare precisamente gli H si usa la cristallografia a diffrazione neutronica

Metodi teorici

- L'ab initio usa modelli hard basati esclusivamente su modelli quantistici, ossia risolve l'equazione di Schroedinger
 - Non sempre è computazionalmente possibile
- I metodi semiempirici richiedono alcuni parametri sperimentali, e risolve la funzione d'onda solo per gli elettroni di valenza
 - Sono più approssimati, ma più veloci
 - Usano modelli di meccanica classica per gli altri elettroni
- Metodi di meccanica molecolare ignorano gli effetti quantistici
- Inizio inserendo una struttura 2D al PC
 - Utilizzando il metodo prescelto, viene calcolata la struttura 3D

Cambridge Crystallographic Data Centre

- E' un DB a pagamento di strutture di piccole molecole
- Presenta molte più strutture di PDB

Uso delle SMILES

- Posso usarle per effettuare una ricerca in DB, di solito per sottstrutture o gruppi funzionali
 - Questo permette di ricercare molecole con funzione biologica simile
 - La SMILES che uso è detta query

Calcolo delle strutture 3D

- Impiega metodi di minimizzazione energetica per calcolare la conformazione a partire dalla struttura 2D
 - Minimizzano l'energia interna della molecola
 - Il minimo di energia di solito corrisponde alla struttura cristallografica
- Si valuta come l'energia varia al variare della posizione, fino ad arrivare ad un minimo
- I metodi semiempirici e di meccanica molecolare sono troppo lenti
 - Si parla di secondi, ma se i composti sono milioni è un problema
 - E' stato inventato il metodo CONCORDE, che ha ridotto drasticamente i tempi
 - Con la potenza di calcolo attuale non è più un problema

Lex.3

- La pKa è essenziale per determinare la permeabilità di molecole a livello delle membrane biologiche
- I farmaci tendono ad essere carichi a pH fisiologico
- Per convenzione si usa sempre la pKa, anche per le basi

Cosa determina la pKa

- L'elemento a cui H⁺ è legato
 - Più è elettronegativo meno è acido (?)
 - Più è grande meno è acido poichè distribuisce la carica (?)
- Effetto induttivo
 - Altri atomi elettronegativi presenti nella molecola influenzano l'acidità
 - Mediato da legami σ
- Effetto di risonanza
 - Mediato da legami π
- Ibridizzazione
 - Più aumenta il carattere s più l'acido è forte
- Effetto prossimità
 - Vicinanza di un gruppo che forma legami H intramolecolari

Determinazione sperimentale della pKa

- Elettroforesi capillare, titolazione spettrofotometrica, titolazione potenziometrica
- Una pKa sperimentale è sempre preferibile ad una calcolata
- Non sempre è possibile la determinazione sperimentale per motivi tecnici o economici, e quando ho molte molecole

Metodi per determinare la pKa

- I metodi ab initio sono troppo poco precisi e richiedono molto tempo
- I metodi sperimentali richiedono di avere a disposizione un campione
- La QSAR è la tecnica più usata

A Perugia è stato sviluppato MoKa

- Molto veloce, accurato, considera le molecole poliprotiche
- Indipendente dalla rappresentazione esplicita degli H
- Calcola il LogP (partizione EtOH-H₂O) e LogD (LogP in funzione del pH)
- Può essere allenato con un modello
- Si basa sui campi GRID, dove un probe si muove e valuta le interazioni con la molecola
 - Si stanno ora sviluppando probes poliatomici
- Si creano dei livelli allontanandosi dall'atomo di riferimento
 - Il livello 0 è l'atomo stesso, e si pongono tutti i bit a 0 eccetto quello per N
 - La rappresentazione è non più binaria
 - Si crea un fingerprint concatenando questi bit
- Si crea una tabella che correla il fingerprint con la pKa, usata come modello di training
 - Usa il metodo PLS
- Bisogna considerare i tautomeri, poichè ognuno ha una sua pKa (!)

Lex.4

Proteine

- Vi sono grandi investimenti sullo studio delle proteine
- L'utilizzo di enzimi permette di effettuare reazioni chimiche estremamente selettive
- I detersivi per lavatrice hanno una grossa componente enzimatica
 - Le proteine sono stabilizzate con ponti SS e altri legami per farle resistere nelle condizioni di utilizzo
- Sono note almeno 500000 sequenze proteiche
- Le strutture proteiche 3D note sono molte meno

Cristallografia

- E' importante avere un campione proteico puro
- E' difficile ottenere il cristallo
- Una volta era un processo artigianale, ora è automatizzato
 - Si usano sali, acqua, metalli pesanti, tensioattivi
- Fare il cristallo serve ad amplificare il segnale (!)
 - Più del 99% del raggio incidente non viene deviato
- Nella zona centrale dell'immagine ho il fascio diretto, mentre attorno il pattern di diffrazione
- Dal reticolo di diffrazione non ottengo la posizione ma la densità elettronica, non discerno bene atomi da gruppi di atomi
- Una volta bisognava fare fitting della sequenza sulla densità elettronica
 - Ora si fa via software
- La strettezza della mappa di densità mi riflette la risoluzione della struttura che posso ottenere

- Si considera alta risoluzione 1.5Å, bassa risoluzione 5Å
 - Per poterci lavorare bene deve essere almeno 2.5Å
 - Per poterci lavorare bene deve essere almeno 2.5Å
- Oggi la cristallografia si fa in pochi centri specializzati
 - In Europa si fa a Grenoble dove c'è un sincrotrone

Trovare le binding pockets

- Il primo step è trovare il sito o i siti di modulazione/legame
- Un singolo composto potrebbe interagire con più di una tasca nella stessa proteina
- E' possibile descrivere un pocketoma che raccolga le tasche note, e predica le interazioni di una molecola
 - E' rappresentato come network che misura la distanza di fitting di 2 tasche
- Si fanno simulazioni di fitting provando le varie tasche disponibili

Lex.5

Molecular interaction fields (MIFs)

- Il prof ha scritto un libro che ci darà in pdf
- Goodford ha fondato la Wellcome Trust
- Il software **GRID** è gratis per l'accademia e a pagamento per i *for profit*
- Il target dei MIFs è l'insieme dell'interazione, non i singoli componenti
- La zona di interesse può essere l'intera molecola o una particolare porzione dello spazio
 - La zona di interesse è definita con una griglia
- In tale regione metto un **probe** chimico, con cui la scansione muovendolo per righe, colonne e piani
- La sonda chimica da utilizzare può essere scelta in base alle necessità
 - Posso usare ioni, piccole molecole, ecc...
 - Posso anche usare parti fittizie di molecole, ad esempio un gruppo OH non legato a nulla
 - La scelta della sonda dipende dal tipo di interazioni con la proteina che voglio studiare
- In ogni punto calcolo l'interazione del probe con la proteina
- Per simulare l'interazione calcolo la sommatoria dell'interazione del probe
 - Valuto la Van der Waals, l'interazione di carica, i legami idrogeno ed il contributo entalpico
 - Una risultante negativa indica attrazione, una positiva repulsione del probe
 - L'interazione è valutata con tutta la proteina, anche nelle zone al di fuori dalla regione di interesse (!)
- La proteina ed il probe si muovono per minimizzare l'energia libera
 - Oltre a legami diretti col probe, si valutano anche tutti i legami indotti all'interno della proteina stessa
 - Questo può alterare la conformazione in zone distanti della proteina (!)
 - Spesso una molecola d'acqua può fare da ponte per trasmettere un legame H

Contributo di Van der Waals (Lendar-Jones (?))

- E' dovuto alla fluttuazione degli elettroni di valenza
- L'energia dell'interazione è 0 per distanze infinite, diviene negativa all'avvicinarsi dei nuclei, incontra un minimo e poi aumenta verso infinito per distanza 0
 - A è il termine attrattivo e dipende da r^{-6} , B è il termine repulsivo e dipende da r^{-12}

Contributo Coulombiano

- L'interazione Coulombiana dipende da inversamente da r^2 , direttamente dal prodotto delle cariche e dalla costante dielettrica del mezzo
- La costante dielettrica è un termine preponderante, in H₂O l'interazione è 80 volte inferiore che nel vuoto

- In biologia si usa un'equazione modificata e più complessa
 - Modella l'azione dell'acqua nelle proteine, in cui la costante dielettrica non è più costante (!)

Contributo del legame H

- Il legame H è elettrostatico ma non è descritto adeguatamente dall'interazione Coulombiana
 - La direzionalità modifica l'interazione al punto da doverla descrivere separatamente
 - Dipende dalla geometria delle molecole interagenti e dei loro orbitali
- Ha una componente simile alla Lendar Jones (?), un contributo Coulombiano ed una componente geometrica
- Screenando DBs per la posizione di molecole d'acqua per un particolare gruppo chimico in diversi contesti trovo gli angoli di interazione più favorevoli
- Il carbonile forma legami H soprattutto in direzione dei lone pairs, ma un po' anche tra di essi
 - Tra i lone pairs è possibile per H₂O formare 2 legami con entrambi, ma la sovrapposizione orbitale è inferiore ## Progettare una molecola
- Tramite vari probes vedo dove certi gruppi sono favoriti

Lex.6

- Le interazioni deboli sono da 0 a 10 kcal/mol
 - La Leidar-Jones è di circa 1 kcal/mol
 - Il legame H è di circa 4 kcal/mol
 - Le interazioni ioniche possono raggiungere i 15 kcal/mol
 - La componente entropica è sulle 1.5 kcal/mol

Componente entropica

- Posso utilizzare un probe idrofobico, che spiazzare delle molecole d'acqua di solvatazione da una superficie apolare
 - Queste molecole d'acqua subiscono un guadagno energetico di circa 0.9 kcal/mol dovuto alle maggiori interazioni che possono formare quando non solvatano la superficie idrofobica
 - Si ha un ulteriore guadagno per interazioni di Leidar-Jones di circa 1 kcal/mol tra la superficie ed il probe
- Consideriamo ora lo stesso probe idrofobico su una superficie polare
 - Si hanno le stesse componenti di prima che determinano -1.9 kcal/mol, ossia guadagno entropico del solvente e interazioni Leidar-Jones
 - Si ha una perdita di energia dovuta alla rottura dell'interazione tra il gruppo polare e le molecole di acqua, di circa +2.5 kcal/mol
 - Il processo non è spontaneo in quanto ha un'energia di circa +0.6 kcal/mol
- Spesso è la parte più importante per il numero di interazioni che si formano
 - Un farmaco idrofobico è spesso più potente di uno idrofilico perchè la sua interazione col target è favorita
 - E' molto più tollerante ad imprecisioni nella previsione del legame, poichè è poco direzionale
- In biologia la selettività è data dalle interazioni polari, la potenza dell'interazione da quelle idrofobiche

Piccole molecole

- Interrogando la zona con +0.2 kcal/mol posso studiare la superficie della molecola
 - Questo mi permette di calcolare il volume e l'ingombro sterico della molecola
- L'arginina è spesso usato come amminoacido idrofobico (!)
- Posso usare probes anfifilici per evidenziare dove avviene la transizione idrofobico-idrofilico
- Studiando con probe idrofobico, H₂O e anfifilico il colesterolo posso predire come questo si posiziona sulle membrane
- Le strutture delocalizzate sono molto apolari poichè polarizzabili

Lex.7

- Possiamo attuare le tecniche precedenti anche con piccole molecole, ad esempio lipidi
- In una fosfatidilcolina sorprendentemente l'N⁺ quaternario non è idrofilico (!)
 - Osserviamo una porzione idrofobica sulla coda alifatica, una idrofila a livello del fosfato e una intermedia a livello dell'azoto
- I diacilgliceroli in acqua si dispongono con le code adiacenti per minimizzare la superficie idrofobica esposta
 - L'idrofobicità della molecola con le code appaiate è inferiore a quella della stessa con code separate (!)
- In un trigliceride similmente le code sono disposte aggrovigliate tra loro
- Minimizzare una struttura significa trovare la sua conformazione di minimo energetico

Uso dei MIF per produrre un farmaco antiinfluenzale

- In 7 anni, senza il cristallo della neuraminidasi, si è riuscito a sviluppare un farmaco capace di inibirla
 - Questo composto aveva poca affinità, con K di circa 1 μ mol
- A seguito della pubblicazione del cristallo del farmaco nella proteina si è cercato di aumentarne la potenza con poco successo
- Il prof Cruciani a Oxford ha usato i MIF per migliorarlo
 - Ha visto che usando un particolare probe vi era una zona ad alta affinità nella tasca di legame
 - Si è quindi inserito tale gruppo in posizione consona, producendo lo Zanamivir
- La GSK ha comprato la ditta che lo produceva, rinominando il farmaco Relenza
- La Gilead ha copiato il farmaco aggiungendo un estere di un gruppo carbossilico, creando il Tamiflu
 - L'estere viene idrolizzato a livello gastrico riproducendo il gruppo carbossilico
 - Lo ha fatto per evadere il brevetto e per aumentarne la permeabilità di membrana
 - Ha anche sostituito una porzione idrofila con una idrofobica, usando una previsione fatta con GRID
- La Roche ha comprato il Tamiflu a 100 milioni di dollari, ottenendoci guadagni enormi
- Il Tamiflu fino a qualche anno fa aveva il 90% di share mentre il Relenza il 10%
- Adesso si sta sviluppando resistenza al Tamiflu, mentre non vi è ancora resistenza a Relenza
 - Questo perché il Tamiflu è stato abusato mentre Relenza no

Flexible MIFs

- E' un MIF che tiene conto del movimento della proteina a seguito dell'interazione col probe
- Il risultato ottenuto è molto più accurato di un MIF statico se sto studiando una proteina con conformazione flessibile
- E' importante notare che le possibili interazioni predette sono in molti casi mutualmente esclusive (!)
- Questi campi sono usati per studiare come una certa regione possa alterare le proprie proprietà in virtù della conformazione

Preogettare lo scaffold

- GRID mi dice dove devo mettere le mie decorazioni
- Il chimico si preoccupa di creare uno scaffold per posizionare tali gruppi in modo appropriato
- Oggi esistono anche software in grado di suggerire lo scaffold appropriato
- Nota che tutti questi sistemi progettano ligandi, non farmaci, non è detto che le molecole che trovo abbiano attività biologica (!)

Lex.8

- Maybe missing (?)

Lex.9

- Non vi è correlazione tra momento idrofilico e forza delle interazioni idrofiliche (integy moment)
- E' importante disegnare descrittori non correlati tra loro, altrimenti descrivo 2 volte la stessa cosa (!)
- Se l'idrofilità è diffusa anzichè localizzata è più facile che il composto passi la BBB
- Critical packing
 - E' un parametro usato da chi studia tensioattivi e micelle, inventato da un russo
 - E' un fattore geometrico che indica il fattore critico di impacchettamento
 - Alla concentrazione micellare critica una molecola anfifilica forma micelle anzichè stare in soluzione
 - E' dato da un equazione che considera lunghezza lipofila della molecola, volume lipofilo e superficie idrofilica
- Equazione di Stokes-Einstein
 - Predice la diffusività in acqua usando solo parametri fisici
- Un modello del prof di machine learning usa i vari descrittori per predire la diffusività
- La diffusività è poi trattata come un altro descrittore
- E' in accordo con i dati sperimentali
- Elongation è un altro descrittore
 - E' la lunghezza più probabile della molecola
 - In una molecola flessibile è diversa dalla lunghezza della molecola disegnata (!)
 - Può essere calcolata con un'equazione
- LogP è il parametro più misurato sperimentalmente che si conosca
 - E' il logaritmo di una partizione
 - E' la partizione acqua/n-ottanolo
 - Una volta si usava olio di oliva ma poi si è standardizzato con n-ottanolo
 - n ottanolo è poco miscibile in acqua
 - $P = [n - ott]/[H_2O]$
 - Se LogP è 0 significa che P=1 e quindi la molecola ha la stessa solubilità in acqua e n-ottanolo
 - Se è 1 è 10 volte più solubile in n-ottanolo, se -1 viceversa
 - Approssima il comportamento sulle membrane
- Calcolare il LogP
 - Riesco a correlare bene con la conformazione, ma vi sono outliers
 - Gli outliers sono molecole molto flessibili che non hanno una conformazione ben definita
 - Quale conformazione scelgo per la previsione?
- pH fluidi biologici 7.4
- Posso dire al software di modificare la molecola per adattarla al pH di lavoro
 - Modifica lo stato di protonazione in base al pH
 - Usa l'algoritmo di MoKa
 - Il LogP varia molto con il pH (!)

Lex.10

- Metabolismo
- Farmacocinetica
- Organoidi usati per studiare metabolismo di xenobiotici

Lex.11

- Profarmaci

- Il Fluoro è isosterico all'idrogeno
- Previsione dei siti di metabolismo con MetaSite
- Il fluoro è spesso utilizzato per gestire il metabolismo dei farmaci
 - Il legame F-C è molto forte e difficile da rompere
- Devo valutare l'ingombro sterico