

BIOPSIA LIQUIDA PER LO SCREENING E IL MONITORAGGIO DI DNA TUMORALE CIRCOLANTE (MUTAZIONI HOTSPOT) IN CAMPIONI DI SANGUE PERIFERICO

Il tumore e le mutazioni somatiche.

I tumori sono patologie dovute ad alterazioni genetiche in cui la componente cellulare non risponde correttamente ai fattori che normalmente ne controllano la proliferazione. Una singola alterazione genetica non è in genere sufficiente a provocare il cancro. Infatti, i tumori sono processi multifasici: la progressione neoplastica consiste in una serie successiva di alterazioni genetiche che si accumulano.

La maggior parte dei **tumori** è correlata in letteratura alla presenza di mutazioni geniche somatiche^{1,2}. Tali **mutazioni somatiche** si sviluppano in modo spontaneo potenzialmente in qualsiasi tipo di cellula. Queste alterazioni del DNA possono derivare da errori casuali durante la replicazione, o dall'esposizione a fattori ambientali mutageni accidentali, professionali, o dipendenti dallo stile di vita. A differenza delle varianti patogenetiche ereditabili (*germline mutations*) che sono presenti nella linea germinale, le mutazioni somatiche non sono trasmissibili alla progenie.

Migliaia di mutazioni somatiche, che possono influenzare l'insorgenza di un tumore, lo sviluppo di metastasi o la risposta/resistenza a un trattamento, sono state catalogate su database internazionali. L'identificazione e la comprensione di queste alterazioni del DNA nel tumore possono essere cruciali nella diagnosi del cancro e nella pianificazione del suo trattamento, dal monitoraggio della risposta alla terapia all'identificazione precoce della ripresa. Inoltre, durante la progressione di un tumore, il tessuto continua a sviluppare ulteriori nuove mutazioni e queste ultime possono influenzare la risposta agli agenti terapeutici innescando meccanismi di resistenza.

La diagnosi del cancro, richiede una serie di analisi, tra le quali la **biopsia tissutale** costituisce il gold standard. La strategia terapeutica contro il cancro, e il controllo della risposta terapeutica, sono convenzionalmente decisi attraverso un approccio analitico che associa la diagnostica per immagini alla caratterizzazione patologica della biopsia del tessuto.

In passato la biopsia per il prelievo di un campione di tessuto, su cui eseguire lo studio delle risposte molecolari del tumore, era possibile solo mediante modalità invasive, come ad esempio l'agoaspirato o il prelievo intraoperatorio. Le procedure invasive spesso rappresentavano una fonte di comorbilità per il paziente. Il costo per eseguire biopsie sequenziali, per la valutazione dinamica della malattia residua e dei cambiamenti nella composizione genomica del tumore durante e dopo la terapia^{3,4}, era spesso proibitivo. Un limite della biopsia tissutale era inoltre rappresentato dal fatto che questa opzione poteva essere considerata solo quando erano noti i siti del tumore primario, o delle metastasi, e questi erano accessibili.

Onconext Liquid™ rappresenta un nuovo metodo di analisi delle mutazioni somatiche, conosciuto genericamente come "**biopsia liquida**", e studia il cell-free DNA (cfDNA), più specificamente il **DNA tumorale circolante (ctDNA)**, contenuto in un campione di sangue periferico. Lo studio del campione affianca, e sostituisce in fase di monitoraggio sequenziale dell'eterogeneità genomica del tumore, il tradizionale studio diretto del campione di tessuto tumorale prelevato mediante metodi invasivi, e rappresenta oggi una tecnologia ritenuta altamente sensibile e specifica nei confronti di mutazioni somatiche in vari tipi di cancro.³⁶⁻³⁹

Il ctDNA, infatti, porta in sé le caratteristiche patologiche del tumore originale come le mutazioni genetiche. Quindi, il ctDNA isolato dal plasma con tecniche non invasive potrebbe migliorare significativamente il sistema attuale della diagnosi del cancro o addirittura essere usato per identificare tumori allo stato iniziale.

Il DNA Tumorale Circolante (ctDNA).

Tutte le cellule, comprese le cellule tumorali, diffondono DNA nel sistema circolatorio³⁹. In pazienti affetti da cancro, ma anche da altre condizioni patologiche come l'insufficienza renale e l'infarto del miocardio, si rilevano spesso livelli maggiori di cfDNA rispetto a pazienti sani ³⁹. Il **ctDNA** è una frazione del cfDNA, diffusa nel sistema circolatorio in modo specifico dalle cellule tumorali⁴. I meccanismi, attraverso i quali le cellule tumorali rilasciano DNA nel sangue, non sono ancora stati completamente chiariti. Il ctDNA può entrare nel flusso sanguigno attraverso la secrezione diretta delle cellule tumorali vitali, come cfDNA, come vescicole dette esosomi, o in seguito a processi di apoptosi o necrosi delle cellule tumorali ^{39, 96-99}. Nel circolo ematico, il DNA persiste solo per un breve periodo di tempo (t_{1/2} di ~ 2 ore) ^{39, 100}. La maggior parte dei frammenti di cfDNA e di ctDNA hanno dimensioni comprese tra 180 e 200 paia di basi (bp) ^{39, 100-104}. Nel caso di tumori solidi il ctDNA può essere distinto dal resto del cfDNA, per la presenza di mutazioni somatiche, anche se ne rappresenta solo una piccola frazione (spesso <1%)^{100, 101, 105}. Quanto descritto non è valido in generale anche per le neoplasie ematologiche (ad esempio le leucemie), dove il sangue contiene percentuali di ctDNA molto più elevate. La frazione del ctDNA rispetto al cfDNA totale circolante aumenta proporzionalmente al progredire della malattia e il quantitativo rilevabile nei campioni può variare notevolmente tra i pazienti. ^{39, 100, 106}

La biopsia liquida.

Il termine "**biopsia liquida**" descrive una nuova metodica non invasiva, altamente sensibile ed economicamente vantaggiosa, per isolare e individuare frammenti di cfDNA circolante, tra cui **frammenti di DNA tumorale (ctDNA)**, da campioni di sangue di pazienti con cancro sospetto o diagnosticato. La biopsia liquida è utile ad ampliare la conoscenza, rispetto alle metodiche tradizionali, dell'eterogeneità genomica di un tessuto tumorale ^{5,6}. L'analisi del DNA eseguita su campione di sangue è utile per la scelta terapeutica e per il monitoring del tumore in fase di trattamento, progressione o remissione⁷⁻⁹.

La biopsia liquida offre uno strumento alternativo alla biopsia tradizionale con valutazione istologica poiché, nonostante sia ancora consigliato per la valutazione iniziale della malattia affiancare entrambe le tecniche (per il monitoraggio e i controlli dinamici dell'andamento della terapia, e della risposta del tumore) il ricorso alla biopsia liquida si conferma vantaggioso rispetto alle tecniche tradizionali (Tabella 1).

Per la definizione della terapia ottimale da adottare per il paziente, normalmente viene effettuata la caratterizzazione del profilo mutazionale del tumore primario, attraverso biopsia tradizionale, non sempre però la quantità e la qualità del materiale permette una corretta genotipizzazione, anche in considerazione della sua eterogeneità. Il ctDNA invece, rappresenta il tumore in tutta la sua eterogeneità, è facilmente ottenibile da un prelievo di sangue ed è ripetibile consentendo il monitoraggio nel tempo dello stato della malattia. Il ctDNA può anche fornire un quadro dell'evoluzione del tumore per identificare i cambiamenti genetici che possono avvenire, responsabili di ricadute, progressione e sviluppo di resistenza ai farmaci.

Inoltre, il ctDNA è in grado di offrire non solo informazioni relative al profilo genetico della lesione primaria, come avviene con la biopsia tradizionale (DNA tissutale), ma anche delle metastasi.

Alla luce di questi vantaggi, considerata la correlazione tra mutazioni nel tessuto tumorale e presenza di ctDNA, come riportato da molteplici studi, la biopsia liquida può rappresentare, in ambito clinico, un ottimo strumento di diagnosi e di prognosi per lo studio dei tumori solidi ^{39,96-99,107}. In letteratura è confermato che i tumori sono genomicamente eterogenei ¹⁰⁸⁻¹¹³ e la biopsia tradizionale del tessuto può solo fornire una "istantanea" di una porzione di tumore. Il prelievo di un campione di sangue è semplice e accessibile, e il ctDNA ivi contenuto deriva da tutti i siti tumorali fornendo il potenziale necessario per monitorare la malattia e la sua progressione in tempo reale^{39,96,97, 98, 99,110,112}. Il ctDNA è inoltre rilevabile in altri fluidi corporei come urina, liquido

cerebrospinale e saliva, e l'analisi del ctDNA potrà in futuro essere eseguita utilizzando queste fonti.¹¹⁴

Tabella 1: Vantaggi della biopsia liquida vs la biopsia tissutale

Biopsia tissutale	Biopsia liquida
<ul style="list-style-type: none"> Invasiva e costosa 	<ul style="list-style-type: none"> Non invasiva con buon rapporto costo/beneficio
<ul style="list-style-type: none"> Fortemente influenzata dalla sede del tumore: specifica quando il sito del tumore è localizzato 	<ul style="list-style-type: none"> Indipendente dalla sede del tumore
<ul style="list-style-type: none"> Valutazione limitata dall'eterogeneità 	<ul style="list-style-type: none"> Rileva anche l'eterogeneità
<ul style="list-style-type: none"> Prelievo bioptico talvolta difficile 	<ul style="list-style-type: none"> Prelievo ematico semplice e sempre accessibile
<ul style="list-style-type: none"> Non utilizzabile se il tumore primario è stato rimosso 	<ul style="list-style-type: none"> Accessibile in assenza di tumore primario percepibile o metastasi
<ul style="list-style-type: none"> Non applicabile come <i>follow-up</i> dopo la chirurgia 	<ul style="list-style-type: none"> Applicabile come <i>follow-up</i> dopo la chirurgia per monitoraggio dinamico di eventuale malattia residua
<ul style="list-style-type: none"> La ripetizione del prelievo bioptico non è ben tollerata 	<ul style="list-style-type: none"> La ripetizione del prelievo di sangue è tollerata
	<ul style="list-style-type: none"> Monitoraggio dinamico della risposta alle terapie
	<ul style="list-style-type: none"> Monitoraggio dinamico dello sviluppo di resistenza
	<ul style="list-style-type: none"> Utile strumento per la diagnosi precoce della ripresa della malattia

Utilità clinica dell'analisi del ctDNA nel monitoraggio della malattia tumorale e nella medicina di precisione

In letteratura è dimostrato che mutazioni somatiche in un determinato gruppo di geni sono spesso alla base dello sviluppo di diversi tipi di tumore (Tabella 2)¹. Questi geni includono BRAF, la famiglia del gene RAS, EGFR, PIK3CA, FOXL2, e TP53. Mutazioni somatiche nel gene BRAF sono comunemente associate al melanoma, al linfoma non-Hodgkin, al tumore del colon-retto, al carcinoma papillare della tiroide, al carcinoma del polmone non a piccole cellule, e all'adenocarcinoma del polmone, mentre mutazioni somatiche nel gene EGFR sono stati osservate nel tumore del polmone¹¹. Mutazioni nel gene PIK3CA sono più frequenti nel tumore del seno e del colon-retto¹². Mutazioni sul gene FOXL2 sono state osservate nei tumori della granulosa, e mutazioni del gene TP53 vengono rilevate in quasi tutti i tipi di cancro⁹.

L'osservazione di mutazioni hotspot può aiutare l'oncologo a consigliare un piano di trattamento personalizzato durante il quale eseguire il monitoraggio della risposta della malattia e il potenziale sviluppo di resistenza al farmaco. Per esempio, nei pazienti affetti da melanoma metastatico, se presente una specifica mutazione somatica sul gene BRAF (V600E), è spesso indicato il trattamento con inibitori di BRAF come dabrafenib, trametinib e vemurafenib, singolarmente o in combinazione¹³. Inoltre, gli inibitori di EGFR cetuximab e panitumumab si sono rivelati più utili nei pazienti con carcinoma polmonare in cui non sono presenti mutazioni sul gene KRAS (wild type) e in cui EGFR è espresso. Diversi studi clinici di rilievo hanno dimostrato che gli inibitori della tirosin-chinasi di EGFR (TKIs), afatinib e erlotinib, sono utili solo per il trattamento di pazienti i cui tumori presentano mutazioni attivanti nel dominio tirosin-chinasico del gene EGFR¹⁴.

Recenti studi hanno dimostrato la possibilità di utilizzare la biopsia liquida per monitorare le dinamiche del tumore. Diversi progetti hanno dimostrato che i risultati relativi alle mutazioni somatiche, identificate attraverso la biopsia liquida, concordano con quelli ottenuti mediante tecniche tradizionali sui medesimi pazienti^{15,16}. I dati sul ctDNA correlati con i risultati clinici e radiologici sembrano inoltre utili a scopo predittivo per la sopravvivenza del paziente^{12,13,15-17}. E'

stato anche dimostrato che la ricomparsa, o livelli crescenti, di ctDNA possono essere osservati mesi prima della ripresa della malattia. Pertanto, la rivalutazione seriale del ctDNA si è dimostrata essere utile come monitoraggio della progressione della malattia, e la comparsa di nuove mutazioni somatiche in fase di trattamento può essere associata allo sviluppo di resistenza ai farmaci in diversi tipi di tumore¹⁸. Un recente studio condotto da Perrone et al. (2014) ha mostrato risultati promettenti per l'applicazione dell'analisi del ctDNA come strumento di screening per gli individui ad alto rischio di sviluppare il tumore del colon-retto.⁴⁰ Inoltre, la quantità e il tipo di ctDNA osservati nel campione possono essere indicativi di stadio del tumore³⁹ e quindi potenzialmente utilizzati per la stadiazione.

Table 2 – Frequenza delle mutazioni somatiche per gene e tipo di tumore

Tipo di Tumore	Gene	Frequenza delle mutazioni somatiche
Colon-retto	BRAF	11%
	KRAS	36%
	NRAS	5%
	PIK3CA	14%
	TP53	45%

References: COSMIC database (<http://cancer.sanger.ac.uk/cosmic>) accessed 07/28/2015¹⁹⁻²⁵.

Il test OncoNext Liquid™ Monitor Colon.

OncoNext Liquid™ Monitor Colon è uno screening non invasivo finalizzato al rilevamento precoce dei tumori solidi, basato sull'analisi Next Generation Sequencing (NGS) del **DNA tumorale circolante (ctDNA)**.

Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** impiega le più recenti innovazioni tecnologiche sviluppate per la biopsia liquida. Grazie alla tecnologia di sequenziamento NGS oggi è possibile individuare in modo estremamente sensibile la presenza di mutazioni tumorali rilevabili anche da esigue quantità di ctDNA.

Il rilevamento contemporaneo di diverse mutazioni permette di comprendere al meglio il profilo genomico del tumore e adottare il trattamento più idoneo. I campioni di sangue possono essere prelevati al paziente prima, durante e / o dopo il trattamento mirato, o a intervalli regolari. La biopsia liquida permette il monitoraggio continuo e l'osservazione dinamica del comportamento della malattia.

Come viene effettuato il test OncoNext Liquid™ Monitor Colon.

Il test si esegue a partire da un **prelievo di sangue** (una provetta da **10 ml**). Il campione di sangue raccolto viene centrifugato per separare la componente plasmatica. Tramite un'analisi complessa di laboratorio, il ctDNA viene isolato ed **amplificato mediante tecnica PCR**. Successivamente, attraverso un processo tecnologico avanzato di **sequenziamento del DNA** mediante l'impiego di tecniche di **Next Generation Sequencing (NGS)**, si sequenziano ad elevata profondità di lettura le regioni geniche elencate in Tabella 3. Le sequenze geniche ottenute vengono successivamente analizzate attraverso un'**avanzata analisi bioinformatica**, per individuare eventuali mutazioni somatiche nei geni in esame. Le mutazioni vengono interrogate mediante il **database COSMIC (Catalogue Of Somatic Mutation In Cancer)** capace di associare le mutazioni patologiche utilizzando i dati presenti nelle pubblicazioni scientifiche.

Potenziali indicazioni per il test OncoNext Liquid™ Monitor Colon.

Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** è stato progettato per pazienti, ai quali è già stato diagnosticato un tumore, allo scopo di:

- Fornire un **profiling del tumore** per la corretta applicazione della medicina di precisione. Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** può fornire all'oncologo informazioni utili a improntare un piano di trattamento personalizzato;
- **Monitorare l'efficacia della terapia** consigliata attraverso il rilevamento della presenza di mutazioni prima e durante il trattamento;
- **Monitorare il residuo di malattia e/o la presenza di recidiva** in modo precoce nel paziente che presenta mutazioni note nel tumore primario, in particolar modo nei casi in cui i pazienti hanno subito una resezione del tumore e/o sono in periodo di remissione;

- Aiutare l'oncologo nella scelta di **nuove opzioni di trattamento** quando il paziente sviluppa resistenza alla terapia in corso;
- Fornire un **metodo alternativo di biopsia** quando il tessuto è difficile o impossibile da raggiungere, o quando oltre al sito primario della malattia metastatica possono essere presenti siti non noti, o quando la quantità di tessuto ottenuto mediante prelievo biptico tradizionale è insufficiente per la genotipizzazione molecolare;
- Fornire informazioni prognostiche;
- Essere di **supporto per l'inserimento di un paziente in un Clinical Trial**: si tratta di una funzione aggiuntiva del test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon**, per profilare correttamente il paziente e la sua malattia allo scopo di individuare un eventuale studio clinico in corso per cui tale paziente rientra nei criteri di eleggibilità.

Regioni geniche investigate.

Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** è stato progettato per il rilevamento di mutazioni somatiche hotspot in **14 geni** coinvolti nel tumore al **Colon**: **AKT1, APC, BRAF, CTNNB1, EGFR, ERBB2, FBXW7, GNAS, KRAS, MAP2K1, NRAS, PIK3CA, SMAD4, TP53**. Alcune varianti target (mutazioni hotspot) investigate sono riportate in Tabella 4.

La selezione dei geni è stata eseguita a partire dal consenso scientifico attribuito ai geni inseriti nel pannello da organizzazioni come il National Comprehensive Cancer Network (NCCN)⁵⁹ e la Società Europea di Oncologia Medica (ESMO)⁶⁰. Il pannello comprende geni, regioni geniche incluse le varianti a singolo nucleotide (SNV), e inserzioni/delezioni (indels) che si sono dimostrate utili nello studio molecolare del tessuto tumorale.

Risultati ottenibili con il test OncoNext Liquid™ Monitor Colon.

Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** fornisce informazioni relative alla assenza o alla presenza nel campione analizzato di ciascuna delle mutazioni hotspot elencate in tabella 4.

- **Risultato "POSITIVO" – Presenza di una o più mutazioni:** indica che il test ha rilevato, nel DNA estratto dal campione ematico, una o più mutazioni somatiche a livello di uno (o più) geni. Le mutazioni riscontrabili tramite il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** possono rientrare nelle seguenti categorie prognostiche:
 - con significato patologico noto;
 - **con significato benigno** in quanto sono riscontrabili in individui normali e sono prive di significato patologico;
 - **con significato incerto** in quanto non ancora note o caratterizzate dalla comunità medico-scientifica. In questo caso possono essere necessari ulteriori indagini per chiarire il significato della variante.

L'identificazione di tale/i mutazione/i può avere diverse implicazioni, in relazione alla/e variante/i rilevata/e. Il nostro genetista, in sede di consulenza genetica, spiegherà in maniera dettagliata il significato del risultato del test, indirizzando il paziente ad una successiva consulenza con lo specialista oncologo. **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** è un test di screening e non ha finalità diagnostiche per il tumore. In caso di test con risultato positivo, sono consigliabili, come follow-up, per il paziente specifici approfondimenti, inclusa la diagnostica per immagini (TAC, Risonanza Magnetica, etc.).

- **Risultato "NEGATIVO" - Assenza di mutazioni:** indica che il test non ha rilevato, nel DNA estratto dal campione ematico, nessuna delle mutazioni somatiche ricercate. Tale risultato non significa che non sia presente un tumore o che non vi sia il rischio, in futuro, che possa insorgere un tumore.

- Occasionalmente, il test potrebbe produrre un **risultato non ottimale o non conclusivo**, perché il campione non soddisfa i requisiti minimi di qualità necessari per poter considerare il risultato ottenuto ottimale e, quindi, poter procedere alla relativa emissione del referto. In tal caso, verrà richiesto il prelievo di un nuovo campione ematico al fine di ripetere l'esame.

Sul referto sarà riportato il numero totale di copie mutanti di ctDNA presenti. Le quantità di cfDNA e ctDNA presenti in un campione sono variabili. Ogni variante è associata a una percentuale minima di ctDNA, rispetto al DNA totale, che ne rappresenta il **limite di rilevabilità (LOD)**. L'interpretazione del risultato viene personalizzata sulla base della storia clinica del paziente e, opzionalmente, può essere fornita un'indicazione sulla possibilità di inclusione di un paziente in un trial clinico sulla base dei risultati del test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon**.

Utilità clinica del test OncoNext Liquid™ Monitor Colon.

In un ampio studio su diverse tipologie di tumore²⁶ è stato mostrato che una frazione di ctDNA è rilevabile in più del 75% dei pazienti con malattia metastatica (pancreas, ovaie, colon-retto, vescica, stomaco, mammella, melanoma, fegato e testa/collo) e in meno del 50% dei pazienti con malattia solo allo stadio primario (cervello, rene, prostata e tiroide). In un gruppo separato di 206 pazienti con carcinoma coloretale metastatico, gli autori hanno mostrato alta sensibilità e specificità della rilevazione ctDNA per mutazioni del gene KRAS clinicamente rilevanti (87,2% e 99,2%, rispettivamente).

Un altro studio⁸ ha rilevato mutazioni somatiche nel 68% dei pazienti, affetti da cancro del colon-retto (n = 38), sottoposti al test di biopsia liquida per un pannello di 46 mutazioni tra cui quelle relative ai geni BRAF, KRAS, EGFR e PIK3CA. In tale studio i pazienti positivi alla ricerca di mutazioni somatiche era diviso nel seguente modo: il 54% in stadio precoce (I-III) e il 93% in stadio avanzato (Stadio IV). Per quanto concerne le mutazioni e i geni coinvolti, il 50% dei pazienti ha mostrato mutazioni su KRAS, il 16% su PIK3CA e l'8% su BRAF. Nessuna mutazione su EGFR è stata rilevata nei pazienti appartenenti allo studio. I dati ottenuti hanno confermato la correlazione tra i tumori e le relative mutazioni associate in letteratura. Nei pazienti sottoposti a chirurgia per metastasi al fegato i livelli di ctDNA si sono dimostrati maggiormente utili a scopo predittivo precoce di recidiva rispetto alle tecniche di imaging o alla ricerca dell'antigene carcinoembrionario (CEA). Quattro dei soggetti sani (n = 47), inoltre, hanno presentato valori al limite della rilevabilità di ctDNA.

In uno dei più grandi trial clinici multicentrici (CORRECT)¹⁸, l'effetto di un inibitore delle chinasi (regorafenib) è stato valutato sui livelli ctDNA in pazienti con cancro coloretale metastatico. L'analisi delle mutazioni è stata condotta su un totale di 760 pazienti, che ne comprendeva 505 trattati con il principio attivo e 255 trattati con placebo. Il confronto tra campioni solidi tumorali archiviati e campioni di plasma fresco ha mostrato concordanza di risultati dal 76% - 97% per i tre geni analizzati. Mutazioni su KRAS sono state identificate nel 69% dei pazienti, le mutazioni su PIK3CA nell' 84% dei pazienti e mutazioni su BRAF nel 3% dei pazienti. Nel gruppo trattato con regorafenib, i pazienti con mutazioni su KRAS hanno mostrato una riduzione del periodo di *progression free survival* rispetto ai pazienti trattati con placebo. È interessante notare inoltre che nel gruppo dei pazienti trattati con placebo, i pazienti con più alta quantità di ctDNA avevano già una scarsa overall e *progression free survival*. Lo studio supporta quindi l'uso del ctDNA per stabilire i genotipi tumorali prima della scelta del trattamento.

Uno studio condotto nel 2015²⁷ sottolinea che i pazienti positivi, in stadio precoce da I a III per carcinoma mammario (n = 313), per mutazioni su PIK3CA mostrano dati di RFS (*recurrence free survival*) significativamente più bassi rispetto ai pazienti negativi per le medesime mutazioni. I pazienti con maggiori quantità di PIK3CA mutato (> 29 alleli) hanno mostrato RFS significativamente più bassa. Beaver et al (2014)²⁸ ha rilevato mutazioni su PIK3CA in 12 di 29 pazienti affetti da cancro al seno (pazienti di stadio I-III). Pazienti con ctDNA persistente anche dopo il trattamento si sono dimostrati più soggetti allo sviluppo di metastasi clinicamente evidenti dopo 23 mesi.

Dawson e collaboratori (2013)²⁹ hanno rilevato la presenza di ctDNA in quasi il 97% dei pazienti con carcinoma metastatico della mammella, e hanno mostrato una maggiore sensibilità e specificità del ctDNA, rispetto ai livelli di CTC e CA 15-3, nella rilevazione del tumore.

Janku e collaboratori (2015)¹⁷ hanno testato 21 mutazioni sui geni BRAF, EGFR, KRAS e PIK3CA in 157 pazienti con tumori avanzati (tra cui colon-retto, melanoma, NSCLC, cancro appendicolare, ovario e utero) in grado di migliorare il trattamento sistemico. Gli autori hanno dimostrato la concordanza tra le mutazioni nei campioni di tessuto in archivio e quelle rilevate nel cfDNA da campioni ematici. Lo stesso studio mostra che la sopravvivenza media di 41 pazienti con più dell'1% di KRAS mutato è stata in media più breve rispetto a quella di 20 pazienti con ≤ 1% di KRAS mutato (4,8 vs. 7,3 mesi, $p = 0,008$). Allo stesso modo, 67 pazienti con >1% di cfDNA mutato (BRAF, EGFR, KRAS, o PIK3CA) hanno avuto una sopravvivenza media più breve rispetto ai 33 pazienti con ≤ 1% di cfDNA mutato (5,5 vs 9,8 mesi, $p = 0,001$).

Zill et al.¹⁶, in uno studio del 2015, hanno ricercato mutazioni in un set di 54 geni, trovando KRAS e TP53 come i geni più comunemente mutati, seguiti da APC, SMAD4, GNAS, FBXW7, e BRAF anche essi ricorrentemente mutati. Durante lo studio di questi cinque geni (KRAS, TP53, APC, FBXW7, e SMAD4) la sensibilità media è stata 92,3%, la specificità 100%, e l'accuratezza diagnostica media 97,7%. Gli autori hanno anche identificato mutazioni rilevabili durante il follow-up dei pazienti, altrimenti non osservabili per le limitazioni intrinseche della metodica della biopsia del tessuto del tumore primario.

Le crescenti evidenze nel campo della biopsia liquida suggeriscono che questo tipo di analisi può essere applicato a pazienti con i più diversi tipi di cancro^{8, 9, 16, 17, 26, 27, 29-35}. Molti degli studi clinici al momento utilizzano la biopsia liquida come strumento di valutazione diagnostica, predittiva, prognostica, e di risposta del tumore al trattamento (www.clinicaltrials.gov).

Accuratezza del test.

Le tecniche attuali di sequenziamento del DNA producono risultati con un'accuratezza superiore al 99%. Benché questo test sia molto accurato bisogna sempre considerare i limiti dell'esame, di seguito descritti.

Limiti del test OncoNext Liquid™ Monitor Colon

- Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** è un test che effettua uno screening e non una diagnosi di cancro.
- Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** non rileva tutti i tumori e non può essere sostitutivo dei test che attualmente sono il gold standard per la diagnosi di cancro.
- Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** analizza solo le mutazioni più frequenti dei geni investigati. In caso di tumori che, al momento del test, non abbiano sviluppato le mutazioni specifiche ricercate, queste ultime non saranno rilevate. E' quindi possibile che mutazioni in geni non testati da **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** possano essere causa di malattia del paziente.
- L'esame non è in grado di evidenziare:
 - mutazioni localizzate nelle regioni geniche non specificamente investigate;
 - delezioni, inversioni o duplicazioni maggiori di 25 bp.
- Un risultato **"NEGATIVO" - Assenza di mutazioni** per i geni investigati non esclude la possibilità che siano presenti mutazioni localizzate in regione del genoma non investigate dall'esame.
- Un risultato positivo deve essere interpretato nel contesto della storia clinica del paziente e correlato allo stadio della malattia, ai risultati di *imaging*, ai dettagli terapeutici, e ad altri dati di laboratorio.
- In alcuni casi, il risultato di un'analisi genomica può rivelare una variante o mutazione del DNA con un significato clinico non certo o determinabile in base alle attuali conoscenze medico-scientifiche.
- L'interpretazione delle varianti genetiche si basa sulle più recenti conoscenze disponibili al momento dell'analisi. Tale interpretazione potrebbe cambiare in futuro con l'acquisizione di nuove informazioni scientifiche e mediche sulla struttura del genoma ed influire sulla valutazione stessa delle varianti.
- Alcune di queste varianti potrebbero non essere ancora state identificate o validate dalla comunità scientifica e quindi non essere riportate come patogenetiche al momento dell'analisi.

- Limite intrinseco della metodologia NGS utilizzata è la mancanza di uniformità di coverage per ciascuna regione genica analizzata. Tale limite si traduce nella possibilità, insita nelle metodiche NGS, che specifiche mutazioni dei geni selezionati potrebbero non essere state rilevate dal test.
- In caso di tumori che non abbiano ancora rilasciato DNA tumorale nel flusso sanguigno al momento del test, le mutazioni ricercate non saranno rilevate.
- Mutazioni somatiche non incluse nell'esame non saranno rilevate.
- Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** non è finalizzato all'individuazione della predisposizione ereditaria allo sviluppo dei tumori, ma rileva solo le mutazioni somatiche nel ctDNA
- Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** non è stato progettato come strumento diagnostico per il cancro, ma il suo utilizzo deve essere sempre affiancato da un'attenta valutazione del paziente anche attraverso metodiche tradizionali quali ad esempio biopsia tissutale e tecniche di imaging
- Il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** non può sostituire la valutazione clinica di un medico, gli studi di imaging, o la biopsia tradizionale dei tessuti considerata ancora il gold standard per la diagnosi del cancro.

Target coverage.

Si intende per **Target Coverage**, il numero medio di letture (reads) ottenute dal sequenziamento per ciascuna base nucleotidica costituente il gene. In generale, più è profonda la copertura di una regione più sensibile e affidabile è l'analisi. Per le varianti analizzate è necessaria una copertura di **25.000x** per il rilevamento di mutazioni di frequenza fino a **0,1%**. I requisiti interni di controllo di qualità (QC) per il test **OncoNext Liquid™ Monitor Colon** impongono una **copertura maggiore di 25.000x** su più del 99% delle basi target previste per l'analisi.

Frequenza dell'allele mutato (MAF).

La frequenza dell'allele mutato è la frequenza identificata nel campione riportata per le diverse mutazioni (sostituzioni, inserzioni e delezioni).

Specifiche di performance del test

Mutant Allele Frequency (MAF) / Tumor Fraction	Sensibilità	Valore predittivo positivo (PPV)
≥0.1%	99% (97.2%-100%)*	99.9% (99.4%-100%)*

*95% Intervallo di confidenza

Disclaimer.

I dati presentati nella relazione tecnica e nei referti sono destinati all'uso esclusivo di personale sanitario qualificato. Ogni diagnosi, consulenza, o prescrizione di trattamento in relazione ai dati contenuti nella presente relazione tecnica, o nei referti, deve essere eseguita da un operatore sanitario qualificato che tenga conto della storia clinica del singolo paziente, compresi gli esiti dei altri metodi d'analisi tradizionali (es. biopsia tumorale dei tessuti e tecniche di imaging). Le informazioni contenute nei referti e nella presente relazione tecnica sono riferibili alla data in cui gli stessi sono stati emessi; si consiglia all'operatore sanitario che prende in carico il paziente di rivalutare in un eventuale futuro la situazione emersa secondo la più recente letteratura disponibile.

Tabella 4: Mutazioni hotspot ricercate nel test OncoNext Liquid™ Monitor Colon

GENE	MUTATION	COSMIC ID
AKT1	p.E17K REF=C	COSM33765
APC	p.R805Ter REF=C	COSM19058

APC	p.R876Ter REF=C	COSM18852
APC	p.Y935Ter REF=C	COSM19031
APC	p.R1114Ter REF=C	COSM13125
APC	p.S1234fs REF=CA	COSM41617
APC	p.Q1291Ter REF=C	COSM19072
APC	p.Q1294Ter REF=C	COSM18960
APC	p.Q1303Ter REF=C	COSM13728
APC	p.E1306Ter REF=G	COSM18760
APC	p.I1307fs REF=	COSM19203
APC	p.E1309fs REF=AAAAG	COSM18764
APC	p.E1309fs REF=	COSM18719
APC	p.E1309Ter REF=G	COSM18775
APC	p.E1309fs REF=AAAAG	COSM18701
APC	p.E1309fs REF=AAAGA	COSM13113
APC	p.G1312Ter REF=G	COSM18817
APC	p.E1353Ter REF=G	COSM19048
APC	p.P1361fs REF=CC	COSM41623
APC	p.Q1367Ter REF=C	COSM13121
APC	p.P1372fs REF=AA	COSM19033
APC	p.P1373fs REF=C	COSM41619
APC	p.Q1378Ter REF=C	COSM18862
APC	p.E1379Ter REF=G	COSM18834
APC	p.Q1406Ter REF=C	COSM19087
APC	p.E1408Ter REF=G	COSM18822
APC	p.S1411fs REF=T	COSM18948
APC	p.R1450Ter REF=C	COSM13127
APC	p.S1465fs REF=AG	COSM18873
APC	p.E1464fs REF=AGAG	COSM18838
APC	p.S1465fs REF=AG	COSM13864
APC	p.L1488fs REF=TATT	COSM41618
APC	p.F1491fs REF=T	COSM19054
APC	p.T1493fs REF=C	COSM18786
		COSM19695,
APC	p.T1556fs REF=	COSM18734;
		COSM19020;
		COSM18561
APC	chr5 112175951 112175952 SYS_ERR REF=A	SYS_ERR
APC	p.E1577Ter REF=G	COSM13123
BRAF	p.V600E REF=A	COSM476
BRAF	p.L597V REF=G	COSM470
BRAF	p.D594G REF=T	COSM467
CTNNB1	p.S33Y REF=C	COSM5673
CTNNB1	p.G34V REF=G	COSM5670
CTNNB1	p.T41A REF=A	COSM5664
CTNNB1	p.T41I REF=C	COSM5676
CTNNB1	p.S45P REF=T	COSM5663
CTNNB1	p.S45F REF=C	COSM5667
EGFR	p.R451C REF=C	NA
EGFR	p.S464L REF=C	NA
EGFR	p.G465R REF=G	COSM601581
EGFR	p.G465R REF=G	COSM601582
EGFR	p.G465R REF=G	COSM5253370
EGFR	p.G465E REF=G	NA
EGFR	p.K467T REF=A	NA
EGFR	p.I491M REF=A	NA
EGFR	p.S492R REF=A	COSM236671

EGFR	p.S492R REF=C	COSM236670
ERBB2	p.S310F REF=C	COSM48358
ERBB2	p.S310Y REF=C	COSM94225
ERBB2	p.L755M REF=T	COSM1205571
ERBB2	p.L755S REF=T	COSM14060
ERBB2	p.E770_A771insAYVM REF=	COSM20959
ERBB2	p.G776V REF=G	COSM18609
ERBB2	p.V777L REF=G	COSM14062
ERBB2	p.V842I REF=G	COSM14065
ERBB2	p.R896C REF=C	COSM14066
FBXW7	p.R689W REF=G	COSM27083
FBXW7	p.D600Y REF=C	COSM167304
FBXW7	p.S582L REF=G	COSM22979
FBXW7	p.W526R REF=A	COSM30599
FBXW7	p.R505C REF=G	COSM22975
FBXW7	p.R479Q REF=C	COSM22974
FBXW7	p.R465H REF=C	COSM22965
FBXW7	p.R465C REF=G	COSM22932
GNAS	p.R201C REF=C	COSM27887
GNAS	p.R201S REF=C	COSM27899
GNAS	p.R201H REF=G	COSM27895
GNAS	p.R201L REF=G	COSM99221
GNAS	p.Q227R REF=A	COSM27896
KRAS	p.A146T REF=C	COSM19404
KRAS	p.Q61H REF=T	COSM554
KRAS	p.Q61R REF=T	COSM552
KRAS	p.Q61L REF=T	COSM553
KRAS	p.G13D REF=C	COSM532
KRAS	p.G13C REF=C	COSM527
KRAS	p.G12A REF=C	COSM522
KRAS	p.G12D REF=C	COSM521
KRAS	p.G12V REF=C	COSM520
KRAS	p.G12F REF=CC	COSM512
KRAS	p.G12R REF=C	COSM518
KRAS	p.G12C REF=C	COSM516
KRAS	p.G12S REF=C	COSM517
MAP2K1	p.F53I REF=T	COSM3503329
MAP2K1	p.F53L REF=T	COSM555604
MAP2K1	p.F53C REF=T	COSM1562837
MAP2K1	p.F53L REF=T	COSM1725008
MAP2K1	p.Q56P REF=A	COSM1235481
MAP2K1	p.K57Q REF=A	OM3155
MAP2K1	p.K57T REF=A	COSM4756761
MAP2K1	p.K57N REF=G	COSM1235478
MAP2K1	p.E203K REF=G	COSM232755
MAP2K1	p.E203V REF=A	COSM3386991
NRAS	p.Q61L REF=T	COSM583
NRAS	p.Q61R REF=T	COSM584
NRAS	p.Q61K REF=G	COSM580
NRAS	p.G13V REF=AC	COSM572
NRAS	p.G13V REF=C	COSM574
NRAS	p.G13A REF=C	COSM575
NRAS	p.G13D REF=C	COSM573
NRAS	p.G13Y REF=CC	COSM568
NRAS	p.G13N REF=CC	COSM24668
NRAS	p.G13S REF=C	COSM571

NRAS	p.G13R REF=C	COSM569
NRAS	p.G13C REF=C	COSM570
NRAS	p.G12E REF=AC	COSM144577
NRAS	p.G12V REF=C	COSM566
NRAS	p.G12D REF=C	COSM564
NRAS	p.G12A REF=C	COSM565
NRAS	p.G12P REF=CC	COSM559
NRAS	p.G12Y REF=CC	COSM560
NRAS	p.G12N REF=CC	COSM12723
NRAS	p.G12S REF=C	COSM563
NRAS	p.G12C REF=C	COSM562
NRAS	p.G12R REF=C	COSM561
PIK3CA	p.E542K REF=G	COSM760
PIK3CA	p.E545Q REF=G	COSM27133
PIK3CA	p.E545K REF=G	COSM763
PIK3CA	p.E545A REF=A	COSM12458
PIK3CA	p.E545G REF=A	COSM764
PIK3CA	p.Q546K REF=C	COSM766
PIK3CA	p.Q546R REF=A	COSM12459
PIK3CA	p.Q546P REF=A	COSM767
PIK3CA	p.M1043V REF=A	COSM12591
PIK3CA	p.M1043I REF=G	COSM773
PIK3CA	p.H1047Y REF=C	COSM774
PIK3CA	p.H1047R REF=A	COSM775
PIK3CA	p.H1047L REF=A	COSM776
PIK3CA	p.G1049R REF=G	COSM12597
SMAD4	p.A118V REF=C	COSM14215
SMAD4	p.E330A REF=A	COSM14110
SMAD4	p.D351G REF=A	COSM373800
SMAD4	p.P356L REF=C	COSM14049
SMAD4	p.R361C REF=C	COSM14140
SMAD4	p.R361H REF=G	COSM14122
SMAD4	p.G386D REF=G	COSM1150895
SMAD4	p.G510V REF=G	COSM1151558
TP53	p.E286G REF=T	COSM43565
TP53	p.E286K REF=C	COSM10726
TP53	p.E285K REF=C	COSM10722
TP53	p.R283P REF=C	COSM10743
TP53	p.R282W REF=G	COSM10704
TP53	p.R282G REF=G	COSM10992
TP53	p.R280I REF=C	COSM11287
TP53	p.R280K REF=C	COSM10728
TP53	p.R280T REF=C	COSM10724
TP53	p.G279E REF=C	COSM43714
TP53	p.P278R REF=G	COSM10887
TP53	p.P278L REF=G	COSM10863
TP53	p.P278A REF=G	COSM10814
TP53	p.P278S REF=G	COSM10939
TP53	p.P278T REF=G	COSM43697
TP53	p.C277F REF=C	COSM10749
TP53	p.C275Y REF=C	COSM10893
TP53	p.V274L REF=C	COSM44443
TP53	p.V274F REF=C	COSM10769
TP53	p.R273H REF=C	COSM10660
TP53	p.R273L REF=C	COSM10779
TP53	p.R273P REF=C	COSM43896

TP53	p.R273C REF=G	COSM10659
TP53	p.V272L REF=C	COSM10859
TP53	p.V272M REF=C	COSM10891
TP53	p.G266E REF=C	COSM10867
TP53	p.G266V REF=C	COSM10958
TP53	p.G266R REF=C	COSM10794
TP53	p.G262V REF=C	COSM11198
TP53	p.E258K REF=C	COSM10988
TP53	p.P250L REF=G	COSM10771
TP53	p.R249S REF=C	COSM10817
TP53	p.R249K REF=C	COSM44091
TP53	p.R249M REF=C	COSM43871
TP53	p.R248Q REF=C	COSM10662
TP53	p.R248L REF=C	COSM6549
TP53	p.R248W REF=G	COSM10656
TP53	p.M246V REF=T	COSM43555
TP53	p.G245D REF=C	COSM43606
TP53	p.G245V REF=C	COSM11196
TP53	p.G245S REF=C	COSM6932
TP53	p.G245C REF=C	COSM11081
TP53	p.G244D REF=C	COSM10883
TP53	p.G244V REF=C	COSM43652
TP53	p.G244C REF=C	COSM11524
TP53	p.G244S REF=C	COSM10941
TP53	p.C242F REF=C	COSM10810
TP53	p.C242Y REF=C	COSM10646
TP53	p.S241F REF=G	COSM10812
TP53	p.S240G REF=T	COSM43973
TP53	p.C238F REF=C	COSM43778
TP53	p.C238Y REF=C	COSM11059
TP53	p.M237I REF=C	COSM10834
TP53	p.Y234C REF=T	COSM10725
TP53	p.Y220C REF=T	COSM10758
TP53	p.Y220H REF=A	COSM44637
TP53	p.V216M REF=C	COSM10667
TP53	p.H214R REF=T	COSM43687
TP53	p.R213Q REF=C	COSM10735
TP53	p.R213L REF=C	COSM43650
TP53	p.V197M REF=C	COSM43779
TP53	p.I195T REF=A	COSM11089
TP53	p.L194R REF=A	COSM44571
TP53	p.H193R REF=T	COSM10742
TP53	p.H193Y REF=G	COSM10672
TP53	p.P191del REF=AGG	COSM44234
TP53	p.P190L REF=G	COSM43657
TP53	p.P177_C182del REF=GCAGCGCTCATGGTGGGG	COSM43570
TP53	p.H179R REF=T	COSM10889
TP53	p.H179L REF=T	COSM43635
TP53	p.H179Y REF=G	COSM10768
TP53	p.C176F REF=C	COSM10645
TP53	p.C176Y REF=C	COSM10687
TP53	p.R175H REF=C	COSM10648
TP53	p.R175L REF=C	COSM10718
TP53	p.R175C REF=G	COSM43680
TP53	p.V173L REF=C	COSM43559
TP53	p.V173M REF=C	COSM11084

TP53	p.V172F REF=C	COSM44240
TP53	p.R158L REF=C	COSM10714
TP53	p.R158H REF=C	COSM10690
TP53	p.V157F REF=C	COSM10670
TP53	p.R156P REF=C	COSM10760
TP53	p.G154V REF=C	COSM6815
TP53	p.P152L REF=G	COSM10790
TP53	p.P151H REF=G	COSM11476
TP53	p.P151S REF=G	COSM10905
TP53	p.P151T REF=G	COSM43911
TP53	p.L145P REF=A	COSM43899
TP53	p.C141Y REF=C	COSM43708
TP53	p.C141R REF=A	COSM43901
TP53	p.A138V REF=G	COSM43818
TP53	p.C135W REF=G	COSM44219
TP53	p.C135F REF=C	COSM10647
TP53	p.C135Y REF=C	COSM10801
TP53	p.K132R REF=T	COSM11582
TP53	p.K132E REF=T	COSM10813

Bibliografia.

- Greenman, C., et al., Patterns of somatic mutation in human cancer genomes. *Nature*, 2007. 446(7132): p.153-8.
- Stephens, P.J., et al., The landscape of cancer genes and mutational processes in breast cancer. *Nature*, 2012. 486(7403): p. 400-4.
- Diaz, L.A., Jr. and A. Bardelli, Liquid biopsies: genotyping circulating tumor DNA. *J Clin Oncol*, 2014. 32(6): p. 579-86.
- Heitzer, E., P. Ulz, and J.B. Geigl, Circulating tumor DNA as a liquid biopsy for cancer. *Clin Chem*, 2015. 61(1): p. 112-23.
- Lebofsky, R., et al., Circulating tumor DNA as a non-invasive substitute to metastasis biopsy for tumor genotyping and personalized medicine in a prospective trial across all tumor types. *Mol Oncol*, 2015. 9(4): p. 783-90.
- Esposito, A., et al., Monitoring tumor-derived cell-free DNA in patients with solid tumors: clinical perspectives and research opportunities. *Cancer Treat Rev*, 2014. 40(5): p. 648-55.
- Newman, A.M., et al., An ultrasensitive method for quantitating circulating tumor DNA with broad patient coverage. *Nat Med*, 2014. 20(5): p. 548-54.
- Kidess, E., et al., Mutation profiling of tumor DNA from plasma and tumor tissue of colorectal cancer patients with a novel, high-sensitivity multiplexed mutation detection platform. *Oncotarget*, 2015. 6(4): p. 2549-61.
- Forshe, T., et al., Noninvasive identification and monitoring of cancer mutations by targeted deep sequencing of plasma DNA. *Sci Transl Med*, 2012. 4(136): p. 136ra68.
- Siegel, R.L., K.D. Miller, and A. Jemal, Cancer statistics, 2015. *CA Cancer J Clin*, 2015. 65(1): p. 5-29.
- Davies, H., et al., Mutations of the BRAF gene in human cancer. *Nature*, 2002. 417(6892): p. 949-54.
- Romero, A., et al., Identification of E545k mutation in plasma from a PIK3CA wild-type metastatic breast cancer patient by array-based digital polymerase chain reaction: Circulating-free DNA a powerful tool for biomarker testing in advance disease. *Transl Res*, 2015.
- Ascierto, P.A., et al., Phase II trial (BREAK-2) of the BRAF inhibitor dabrafenib (GSK2118436) in patients with metastatic melanoma. *J Clin Oncol*, 2013. 31(26): p. 3205-11.
- Rothschild, S.I., Targeted Therapies in Non-Small Cell Lung Cancer-Beyond EGFR and ALK. *Cancers (Basel)*, 2015. 7(2): p. 930-49.
- Heidary, M., et al., The dynamic range of circulating tumor DNA in metastatic breast cancer. *Breast Cancer Res*, 2014. 16(4): p. 421.
- Zill, O.A., et al., Cell-Free DNA Next-Generation Sequencing in Pancreatobiliary Carcinomas. *Cancer Discov*, 2015.
- Janku, F., et al., Actionable mutations in plasma cell-free DNA in patients with advanced cancers referred for experimental targeted therapies. *Oncotarget*, 2015. 6(14): p. 12809-21.
- Tabernero, J., et al., Analysis of circulating DNA and protein biomarkers to predict the clinical activity of regorafenib and assess prognosis in patients with metastatic colorectal cancer: a retrospective, exploratory analysis of the CORRECT trial. *Lancet Oncol*, 2015.
- Forbes, S.A., et al., COSMIC: exploring the world's knowledge of somatic mutations in human cancer. *Nucleic Acids Res*, 2015. 43(Database issue): p. D805-11.
- Shah, S.P., et al., Mutation of FOXL2 in granulosa-cell tumors of the ovary. *N Engl J Med*, 2009. 360(26): p.2719-29.
- Schirripa, M., et al., Role of NRAS mutations as prognostic and predictive markers in metastatic colorectal cancer. *Int J Cancer*, 2015. 136(1): p. 83-90.
- Janku, F., et al., PIK3CA mutations frequently coexist with RAS and BRAF mutations in patients with advanced cancers. *PLoS One*, 2011. 6(7): p. e22769.
- Kalfa, N., et al., Activating mutations of Gsalpha in kidney cancer. *J Urol*, 2006. 176(3): p. 891-5.
- Fecteau, R.E., et al., GNAS mutations identify a set of right-sided, RAS mutant, villous colon cancers. *PLoS One*, 2014. 9(1): p. e87966.
- Sparks, A.B., et al., Mutational analysis of the APC/beta-catenin/Tcf pathway in colorectal cancer. *Cancer Res*, 1998. 58(6): p. 1130-4.
- Bettegowda, C., et al., Detection of circulating tumor DNA in early- and late-stage human malignancies. *Sci Transl Med*, 2014. 6(224): p. 224ra24.

27. Oshiro, C., et al., PIK3CA mutations in serum DNA are predictive of recurrence in primary breast cancer patients. *Breast Cancer Res Treat*, 2015. 150(2): p. 299-307.
28. Beaver, J.A., et al., Detection of cancer DNA in plasma of patients with early-stage breast cancer. *Clin Cancer Res*, 2014. 20(10): p. 2643-50.
29. Dawson, S.J., et al., Analysis of circulating tumor DNA to monitor metastatic breast cancer. *N Engl J Med*, 2013. 368(13): p. 1199-209.
30. Ignatiadis, M. and S.J. Dawson, Circulating tumor cells and circulating tumor DNA for precision medicine: dream or reality? *Ann Oncol*, 2014. 25(12): p. 2304-13.
31. Murtaza, M., et al., Non-invasive analysis of acquired resistance to cancer therapy by sequencing of plasma DNA. *Nature*, 2013. 497(7447): p. 108-12.
32. Mohamed Suhaimi, N.A., et al., Non-invasive sensitive detection of KRAS and BRAF mutation in circulating tumor cells of colorectal cancer patients. *Mol Oncol*, 2015.
33. Sanmamed, M.F., et al., Quantitative cell-free circulating BRAFV600E mutation analysis by use of droplet digital PCR in the follow-up of patients with melanoma being treated with BRAF inhibitors. *Clin Chem*, 2015. 61(1): p. 297-304.
34. Siravegna, G., et al., Clonal evolution and resistance to EGFR blockade in the blood of colorectal cancer patients. *Nat Med*, 2015.
35. Roschewski, M., et al., Circulating tumour DNA and CT monitoring in patients with untreated diffuse large B-cell lymphoma: a correlative biomarker study. *Lancet Oncol*, 2015.
36. Heitzer E, Ulz P, Geigl JB. Circulating tumor DNA as a liquid biopsy for cancer. *Clinical chemistry*. 2015;61:112-23.
37. Lebofsky R, Decraene C, Bernard V, et al. Circulating tumor DNA as a non-invasive substitute to metastasis biopsy for tumor genotyping and personalized medicine in a prospective trial across all tumor types. *Molecular oncology*. 2015;9:783-90.
38. Esposito A, Bardelli A, Criscitiello C, et al. Monitoring tumor-derived cell-free DNA in patients with solid tumors: clinical perspectives and research opportunities. *Cancer treatment reviews*. 2014;40:648-55.
39. Diaz LA Jr, Bardelli A. Liquid biopsies: genotyping circulating tumor DNA. *Journal of clinical oncology : official journal of the American Society of Clinical Oncology*. 2014;32:579-86.
40. Perrone F, Lampis A, Bertan C, et al. Circulating free DNA in a screening program for early colorectal cancer detection. *Tumori*. 2014;100:115-21.
41. Amberger JS, Bocchini CA, Schiettecatte F, Scott AF, Hamosh A. OMIM.org: Online Mendelian Inheritance in Man (OMIM®), an online catalog of human genes and genetic disorders. *Nucleic acids research*. 2015;43:D789-98.
42. Forbes SA, Beare D, Gunasekaran P, et al. COSMIC: exploring the world's knowledge of somatic mutations in human cancer. *Nucleic acids research*. 2015;43:D805-11.
43. Ascierto PA, Minor D, Ribas A, et al. Phase II trial (BREAK-2) of the BRAF inhibitor dabrafenib (GSK2118436) in patients with metastatic melanoma. *Journal of clinical oncology : official journal of the American Society of Clinical Oncology*. 2013;31:3205-11.
44. Smalley KS, Xiao M, Villanueva J, et al. CRAF inhibition induces apoptosis in melanoma cells with non-V600E BRAF mutations. *Oncogene*. 2009;28:85-94.
45. Homet Moreno B, Ribas A. Anti-programmed cell death protein-1/ligand-1 therapy in different cancers. *British journal of cancer*. 2015;112:1421-7.
46. Morelli MP, Overman MJ, Dasari A, et al. Characterizing the patterns of clonal selection in circulating tumor DNA from patients with colorectal cancer refractory to anti-EGFR treatment. *Annals of oncology : official journal of the European Society for Medical Oncology/ESMO*. 2015;26:731-6.
47. Zill OA, Greene C, Sebisano D, et al. Cell-Free DNA Next-Generation Sequencing in Pancreatobiliary Carcinomas. *Cancer discovery*. 2015;
48. Thress KS, Paweletz CP, Felip E, et al. Acquired EGFR C797S mutation mediates resistance to AZD9291 in non-small cell lung cancer harboring EGFR T790M. *Nature medicine*. 2015;21:560-2.
49. Karachaliou N, Mayo-de Las Casas C, Queralt C, et al. Association of EGFR L858R Mutation in Circulating Free DNA With Survival in the EURTAC Trial. *JAMA oncology*. 2015;1:149-57.
50. Shah SP, Köbel M, Senz J, et al. Mutation of FOXL2 in granulosa-cell tumors of the ovary. *The New England journal of medicine*. 2009;360:2719-29.
51. De Stefano A, Carlomagno C. Beyond KRAS: Predictive factors of the efficacy of anti-EGFR monoclonal antibodies in the treatment of metastatic colorectal cancer. *World journal of gastroenterology : WJG*. 2014;20:9732-43.
52. Siravegna G, Mussolin B, Buscarino M, et al. Clonal evolution and resistance to EGFR blockade in the blood of colorectal cancer patients. *Nature medicine*. 2015;21:795-801.
53. Schirripa M, Cremolini C, Loupakis F, et al. Role of NRAS mutations as prognostic and predictive markers in metastatic colorectal cancer. *International journal of cancer. Journal international du cancer*. 2015;136:83-90.
54. Wong AL, Lim JS, Sinha A, et al. Tumour pharmacodynamics and circulating cell free DNA in patients with refractory colorectal carcinoma treated with regorafenib. *Journal of translational medicine*. 2015;13:57.
55. Rodon J, Braña I, Siu LL, et al. Phase I dose-escalation and -expansion study of buparlisib (BKM120), an oral pan-Class I PI3K inhibitor, in patients with advanced solid tumors. *Investigational new drugs*. 2014;32:670-81.
56. Forshew T, Murtaza M, Parkinson C, et al. Noninvasive identification and monitoring of cancer mutations by targeted deep sequencing of plasma DNA. *Science translational medicine*. 2012;4:136ra68.
57. Madic J, Kialainen A, Bidard FC, et al. Circulating tumor DNA and circulating tumor cells in metastatic triple negative breast cancer patients. *International journal of cancer. Journal international du cancer*. 2015;136:2158-65.
58. Bettgowda C, Sausen M, Leary RJ, et al. Detection of circulating tumor DNA in early- and late-stage human malignancies. *Science translational medicine*. 2014;6:224ra24.
59. NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology (www.nccn.org/professionals/physician_gls/f_guidelines.asp#site) Accessed 15 June 2015.
60. Van Cutsem E, Cervantes A, Nordlinger B, Arnold D; ESMO Guidelines Working Group. Metastatic colorectal cancer: ESMO Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Ann Oncol*. 2014;25 Suppl 3:iii1-9.
61. Higgins MJ, Baselga J (2011) Targeted therapies for breast cancer. *J Clin Invest* 121(10):3797-803.

62. Cancer Genome Atlas Research Network (2014) Comprehensive molecular profiling of lung adenocarcinoma. *Nature* 511(7511):543-50.
63. Swanton C, Futreal A, Eisen T (2006) Her2-targeted therapies in non-small cell lung cancer. *Clin Cancer Res* 12(14 Pt 2):4377s- 4383s.
64. Nakamura H, Kawasaki N, Taguchi M, et al. (2005) Association of HER-2 overexpression with prognosis in nonsmall cell lung carcinoma: a metaanalysis. *Cancer* 103(9):1865-73.
65. Tan D, Deeb G, Wang J, et al. (2003) HER-2/neu protein expression and gene alteration in stage I-IIIa non-small-cell lung cancer: a study of 140 cases using a combination of high throughput tissue microarray, immunohistochemistry, and fluorescent in situ hybridization. *Diagn Mol Pathol* 12(4):201-11.
66. Slamon DJ, Leyland-Jones B, Shak S, et al. (2001) Use of chemotherapy plus a monoclonal antibody against HER2 for metastatic breast cancer that overexpresses HER2. *N Engl J Med* 344(11):783-92.
67. Bang YJ, Van Cutsem E, Feyereislova A, et al. (2010) Trastuzumab in combination with chemotherapy versus chemotherapy alone for treatment of HER2-positive advanced gastric or gastro-oesophageal junction cancer (ToGA): a phase 3, open-label, randomised controlled trial. *Lancet* 376(9742):687-97.
68. Chumsri S, Weidler J, Ali S, et al. (2015) Prolonged Response to Trastuzumab in a Patient With HER2-Nonamplified Breast Cancer With Elevated HER2 Dimerization Harboring an ERBB2 S310F Mutation. *J Natl Compr Canc Netw* 13(9):1066-70.
69. Cappuzzo F, Bemis L, Varella-Garcia M (2006) HER2 mutation and response to trastuzumab therapy in non-small-cell lung cancer. *N Engl J Med* 354(24):2619-21.
70. Falchook GS, Janku F, Tsao AS, et al. (2013) Non-small-cell lung cancer with HER2 exon 20 mutation: regression with dual HER2 inhibition and anti-VEGF combination treatment. *J Thorac Oncol* 8(2):e19-20.
71. Mazières J, Peters S, Lepage B, et al. (2013) Lung cancer that harbors an HER2 mutation: epidemiologic characteristics and therapeutic perspectives. *J Clin Oncol* 31(16):1997-2003.
72. Baselga J, Cortés J, Kim SB, et al. (2012) Pertuzumab plus trastuzumab plus docetaxel for metastatic breast cancer. *N Engl J Med* 366(2):109-19.
73. Swain SM, Baselga J, Kim SB, et al. (2015) Pertuzumab, trastuzumab, and docetaxel in HER2-positive metastatic breast cancer. *N Engl J Med* 372(8):724-34.
74. Verma S, Miles D, Gianni L, et al. (2012) Trastuzumab emtansine for HER2-positive advanced breast cancer. *N Engl J Med* 367(19):1783-91.
75. Cameron D, Casey M, Oliva C, et al. (2010) Lapatinib plus capecitabine in women with HER-2-positive advanced breast cancer: final survival analysis of a phase III randomized trial. *Oncologist* 15(9):924-34.
76. Geyer CE, Forster J, Lindquist D, et al. (2006) Lapatinib plus capecitabine for HER2-positive advanced breast cancer. *N Engl J Med* 355(26):2733-43.
77. Serra V, Vivancos A, Puente XS, et al. (2013) Clinical response to a lapatinib-based therapy for a Li-Fraumeni syndrome patient with a novel HER2V659E mutation. *Cancer Discov* 3(11):1238-44.
78. Ali SM, Alpaugh RK, Downing SR, et al. (2014) Response of an ERBB2-Mutated Inflammatory Breast Carcinoma to Human Epidermal Growth Factor Receptor 2-Targeted Therapy. *J Clin Oncol ePub Feb 2014*.
79. Lin NU, Winer EP, Wheatley D, et al. (2012) A phase II study of afatinib (BIBW 2992), an irreversible ErbB family blocker, in patients with HER2-positive metastatic breast cancer progressing after trastuzumab. *Breast Cancer Res Treat* 133(3):1057-65.
80. Schwab CL, Bellone S, English DP, et al. (2014) Afatinib demonstrates remarkable activity against HER2-amplified uterine serous endometrial cancer in vitro and in vivo. *Br J Cancer* 111(9):1750-6.
81. De Grève J, Teugels E, Geers C, et al. (2012) Clinical activity of afatinib (BIBW 2992) in patients with lung adenocarcinoma with mutations in the kinase domain of HER2/neu. *Lung Cancer* 76(1):123-7.
82. De Grève J, Moran T, Graas MP, et al. (2015) Phase II study of afatinib, an irreversible ErbB family blocker, in demographically and genotypically defined lung adenocarcinoma. *Lung Cancer* 88(1):63-9.
83. Gandhi L, Bahleda R, Tolaney SM, et al. (2014) Phase I study of neratinib in combination with temsirolimus in patients with human epidermal growth factor receptor 2-dependent and other solid tumors. *J Clin Oncol* 32(2):68-75.
84. Ben-Baruch NE, Bose R, Kavuri SM, et al. (2015) HER2-Mutated Breast Cancer Responds to Treatment With Single-Agent Neratinib, a Second-Generation HER2/EGFR Tyrosine Kinase Inhibitor. *J Natl Compr Canc Netw* 13(9):1061-4.
85. Kris MG, Camidge DR, Giaccone G, et al. (2015) Targeting HER2 aberrations as actionable drivers in lung cancers: phase II trial of the pan-HER tyrosine kinase inhibitor dacomitinib in patients with HER2-mutant or amplified tumors. *Ann Oncol ePub Apr 2015*.
86. Takada M, Higuchi T, Tozuka K, et al. (2013) Alterations of the genes involved in the PI3K and estrogen-receptor pathways influence outcome in human epidermal growth factor receptor 2-positive and hormone receptor-positive breast cancer patients treated with trastuzumab-containing neoadjuvant chemotherapy. *BMC Cancer* 13:241.
87. Jensen JD, Knoop A, Laenkholm AV, et al. (2012) PIK3CA mutations, PTEN, and pHER2 expression and impact on outcome in HER2-positive early-stage breast cancer patients treated with adjuvant chemotherapy and trastuzumab. *Ann Oncol* 23(8):2034- 42.
88. Berns K, Horlings HM, Hennessy BT, et al. (2007) A functional genetic approach identifies the PI3K pathway as a major determinant of trastuzumab resistance in breast cancer. *Cancer Cell* 12(4):395-402.
89. Dave B, Migliaccio I, Gutierrez MC, et al. (2011) Loss of phosphatase and tensin homolog or phosphoinositol-3 kinase activation and response to trastuzumab or lapatinib in human epidermal growth factor receptor 2-overexpressing locally advanced breast cancers. *J Clin Oncol* 29(2):166-73.
90. Loibl S, von Minckwitz G, Schneeweiss A, et al. (2014) PIK3CA Mutations Are Associated With Lower Rates of Pathologic Complete Response to Anti-Human Epidermal Growth Factor Receptor 2 (HER2) Therapy in Primary HER2-Overexpressing Breast Cancer. *J Clin Oncol ePub Sep 2014*.

92. Barbareschi M, Cuorvo LV, Girlando S, et al. (2012) PI3KCA mutations and/or PTEN loss in Her2-positive breast carcinomas treated with trastuzumab are not related to resistance to anti-Her2 therapy. *Virchows Arch* 461 (2):129-39.
93. Guarneri V, Generali DG, Frassoldati A, et al. (2014) Double-blind, placebo-controlled, multicenter, randomized, phase IIIb neoadjuvant study of letrozole-lapatinib in postmenopausal hormone receptor-positive, human epidermal growth factor receptor 2-negative, operable breast cancer. *J Clin Oncol* 32(10):1050-7.
94. Jones KL, Buzdar AU (2009) Evolving novel anti-HER2 strategies. *Lancet Oncol* 10(12):1179-87.
95. Zagouri F, Sergentanis TN, Chrysikos D, et al. (2013) Hsp90 inhibitors in breast cancer: a systematic review. *Breast* 22(5):569-78.
96. Aarthy, R., Mani, S., Velusami, S. et al. *Mol Diagn Ther* (2015) 19: 339. doi:10.1007/s40291-015-0167-y
97. Chaudhuri AA, Binkley MS, Osmundson EC, Alizadeh AA, Diehn M. Predicting radiotherapy responses and treatment outcomes through analysis of circulating tumor DNA. *Seminars in radiation oncology*. 2015;25(4):305-312. doi:10.1016/j.semradonc.2015.05.001.
98. Michail Ignatiadis, Mark Lee and Stefanie S. Jeffrey, *Clin Cancer Res* November 1 2015 (21) (21) 4786-4800; DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-14-1190
99. Jiri Polivka Jr, Martin Pesta, and Filip Janku, [Expert Review Of Molecular Diagnostics](#) Vol. 15 , Iss. 12,2015
100. Diehl F, Schmidt K, Choti MA, et al. Circulating mutant DNA to assess tumor dynamics. *Nature medicine*. 2008;14(9):985-990. doi:10.1038/nm.1789.
101. Diehl F, Li M, Dressman D, et al. Detection and quantification of mutations in the plasma of patients with colorectal tumors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2005;102(45):16368-16373. doi:10.1073/pnas.0507904102.
102. Fan HC, Blumenfeld YJ, Chitkara U, Hudgins L, Quake SR. Noninvasive diagnosis of fetal aneuploidy by shotgun sequencing DNA from maternal blood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2008;105(42):16266-16271. doi:10.1073/pnas.0808319105.
103. Sabine Jahr, Hannes Hentze, Sabine Englisch, Dieter Hardt, Frank O. Fackelmayer, Rolf-Dieter Heschand Rolf Knippers, *Cancer Res* February 2 2001 (61) (4) 1659-1665
104. Moulriere F, Robert B, Arnau Peyrotte E, et al. High Fragmentation Characterizes Tumour-Derived Circulating DNA. Lee T, ed. *PLoS ONE*. 2011;6(9):e23418. doi:10.1371/journal.pone.0023418.
105. Holdhoff et al., *JNCI J Natl Cancer Inst* (2009) 101(18): 1284-1285. doi: 10.1093/jnci/djp240
106. Newman AM, Bratman SV, To J, et al. An ultrasensitive method for quantitating circulating tumor DNA with broad patient coverage. *Nature medicine*. 2014;20(5):548-554. doi:10.1038/nm.3519.
107. Cécile Jovelett et al., *Clin Cancer Res* June 15 2016 (22) (12) 2960-2968
108. Gerlinger M, Rowan AJ, Horswell S, et al. Intratumor Heterogeneity and Branched Evolution Revealed by Multiregion Sequencing. *The New England journal of medicine*. 2012;366(10):883-892. doi:10.1056/NEJMoa1113205.
109. Hiley C, de Bruin EC, McGranahan N, Swanton C. Deciphering intratumor heterogeneity and temporal acquisition of driver events to refine precision medicine. *Genome Biology*. 2014;15(8):453. doi:10.1186/s13059-014-0453-8.
110. Ichihara E, Lovly CM. Shades of T790M – intratumor heterogeneity in EGFR mutant lung cancer. *Cancer discovery*. 2015;5(7):694-696. doi:10.1158/2159-8290.CD-15-0616.
111. Nik-Zainal S, Van Loo P, Wedge DC, et al. The Life History of 21 Breast Cancers. *Cell*. 2012;149(5):994-1007. doi:10.1016/j.cell.2012.04.023.
112. Piotrowska Z, Niederst MJ, Karlovich CA, et al. Heterogeneity Underlies the Emergence of EGFR T790 Wild-Type Clones Following Treatment of T790M-Positive Cancers with a Third Generation EGFR Inhibitor. *Cancer discovery*. 2015;5(7):713-722. doi:10.1158/2159-8290.CD-15-0399.
113. Wang Y, Waters J, Leung ML, et al. Clonal Evolution in Breast Cancer Revealed by Single Nucleus Genome Sequencing. *Nature*. 2014;512(7513):155-160. doi:10.1038/nature13600.
114. Patel eTsui, 2015, *Clinical Biochemistry*, Volume 48, Issue 15, October 2015, Pages 957–961